



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKCRABANG

ENGINEERING

JOURNAL

ปีที่ 39 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2565

บทความวิจัย

1. การพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวในประเทศไทยภายใต้กรอบเวลาแบบยืดหยุ่น
พริตต์ อารังวุฒิ กาญจนนา เศรษฐนันท์ จิตติพงศ์ จำรัส ชูลีพร วงศ์ลือชา และ ก้องกิตติกร วรสาร 1
2. การบำบัดก๊าซฟอสฟอรัสในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ด้วย โอโซนเนชั่น
วิภาดา เดชะปัญญา สรรพาวุธ นนทตุลา สนั่น พุทธาบุญ สมภาพ สอนองราชฤทธิ์ และ สุพัฒน์พงษ์ มัตราช 11
3. สภาวะที่เหมาะสมต่อความขรุขระผิวในการกัดข้างของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีน
ความหนาแน่นสูงและผงไม้อย่างพาราโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง
ชัยณรงค์ ศรีวัชรบุตร สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ชาตรี หอมเขียว และ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล 23
4. อิทธิพลของแผ่นเสริมชุดผ้าเบรกต่อการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังในรถยนต์เอนกประสงค์ 7 ที่นั่ง
อนุชาจารี ขุนทิพย์ทอง เกียรติพิฟ้า ตั้งใจจิต ชัยยงค์ เสริมผล และ สิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย 35
5. อิทธิพลของปัจจัยต่อการปล่อยฝุ่นละอองที่ไม่ได้มาจากไอเสียของรถจักรยานยนต์
วรวัฒน์ ทรงกิตติ ศิริศักดิ์ พงษ์อมตย์ เฉลิมพล เปล่งสะอาด และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย 45
6. การพัฒนาตัวแบบต้นทุนในการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะบนพื้นฐานด้วย
เทคโนโลยีบล็อกเชน
กันต์ธมน สุขกระจำง 54
7. การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทสำหรับการพยากรณ์การตรวจสอบตัวอักษร
เครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์วงจรรวม
กนกอร บุญมา และ สกนธ์ คล่องบุญจิต 63
8. การศึกษาและออกแบบสำหรับกระบวนการผลิตของกระถางต้นไม้ของเล่นโดยใช้เทคนิค
ทางด้าน CAD/CAM/CAE
วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล และ วรฤช ดอนคำเพ็ง 76
9. การจัดเส้นทางขนส่งสำหรับปัญหาการรับและส่งมอบในระบบจักรยานเช่าสาธารณะ:กรณีศึกษา
ระบบจักรยานเช่าสาธารณะ จังหวัดเชียงใหม่
ศรายุทธ ก้ามะโน และ มนวิภา อาวิพันธุ์ 91

“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)
การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิงโดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

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

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความอยู่ระหว่าง 8–14 หน้ากระดาษ A4 โดยส่งหน้าแรกของบทความเป็นแบบระบุชื่อผู้แต่ง 1 หน้า และแบบไม่ระบุชื่อผู้แต่งอีก 1 หน้า บทความที่มีจำนวนหน้ามากกว่าที่กำหนดอาจไม่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ 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

คนบด

รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อุมา สืบญะเรือง

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

ดร.พิณช ธนชัยโชคศิริกุล

กองบรรณาธิการ

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อย

ติดต่อประสานงาน

จัดทำต้นฉบับ Artwork

นายวิรัช จุลไกรลสุจรี

พิสูจน์อักษร และรูปเล่ม

นายทนต์ศักดิ์ ใจชื่นแสน

ออกแบบปก



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน
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 สุจิตรจรร
สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ธีร์จุ
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-
ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติเขต 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 20 กันยายน 2564

เรื่อง แจ้งเพื่อทราบ

เรียน อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจ

กองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง” มีความประสงค์ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิศวกรรมลาดกระบัง ดังนี้

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

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อูมา สีนุญเรือง)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

การพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถาน
ประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวในประเทศไทยภายใต้กรอบเวลาแบบยืดหยุ่น

**A Mathematical Model for Service Scheduling Problem of Tourism Enterprises
in Thailand with Soft Time Windows**

พรรัตน์ ชำรงวุฒิ¹, กาญจนา เศรษฐนันท์^{1,*}, จิตติพงษ์ จำรัส¹, ชุติพร วงศ์ลือชา² และ ก้องกิดากร วรสาร³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40002

² คณะเศรษฐศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40002

³ คณะบริหารธุรกิจและการบัญชี, มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40002

Pawnrat Thumrongvut¹, Kanchana Sethanan^{1,*}, Thitipong Jamrus¹, Chuleeporn Wongloucha² and Kongkidakhon Worasan³

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,

Nai-Muang, Muang, Khon Kaen, 40002, Thailand

² Faculty of Economics, Khon Kaen University, Nai-Muang, Muang, Khon Kaen, 40002, Thailand

³ Faculty of Business Administration and Accountancy, Khon Kaen University,

Nai-Muang, Muang, Khon Kaen, 40002, Thailand

*Corresponding Author E-mail: skanch@kku.ac.th

Received: Oct 15, 2021; **Revised:** Dec 14, 2021; **Accepted:** Dec 24, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัญหาการวางแผนการจัดตารางการให้บริการสำหรับสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว เนื่องจากการวางแผนดังกล่าวต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่หลากหลายและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมการท่องเที่ยว ไม่สามารถจัดสรรทรัพยากรต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการศึกษาสำหรับการวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ไม่สามารถให้บริการในกรอบเวลาได้ให้มีค่าต่ำที่สุด ภายใต้การพิจารณาข้อจำกัดด้านเวลาทั้งของนักท่องเที่ยวและสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว ข้อจำกัดด้านระยะเวลาการเดินทาง และข้อจำกัดของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว โดยการพัฒนาแบบทางคณิตศาสตร์ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบทางคณิตศาสตร์ที่ทำการพัฒนานั้นสามารถแก้ไขปัญหาในเชิงอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในด้านการพัฒนาคุณภาพของคำตอบและระยะเวลาในการคำนวณหาคำตอบของปัญหา อีกทั้งระยะเวลาในการหาคำตอบอยู่ภายใต้กรอบระยะเวลาที่อุตสาหกรรมการท่องเที่ยวสามารถยอมรับได้

คำสำคัญ: การจัดการโซ่อุปทานการท่องเที่ยว, รูปแบบทางคณิตศาสตร์, วิถีโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มผสม, ปัญหาการจัดตารางการให้บริการ

Abstract

This research seeks to address the service scheduling problem for tourism enterprises. Such planning requires consideration of several factors and stakeholders in the tourism industry are unable to manage resources efficiently. Therefore, this study aims to minimize the total time of service operations in the tourism business that cannot accommodate all of tourists within service hours by taking into account the daily time windows of tourists and tourism enterprises, sequence-dependent travel time, and tourism enterprises' restrictions. A novel mathematical model is proposed to solve the problem. The results of this study show that the development of a mathematical model is efficient in finding answers in terms of both solution quality and time complexity. Additionally, the practical solutions for the problem instances are within the acceptable computational time for the tourism industry.

Keywords: Tourism supply chain management, Mathematical model, Mixed-integer linear programing, Service scheduling problem

1. บทนำ

การท่องเที่ยวเป็นอุตสาหกรรมบริการที่สำคัญ ซึ่งเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของโลกที่ช่วยขับเคลื่อนการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม ที่ผ่านมามีอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง การเชื่อมโยงและการประสานงานในห่วงโซ่อุปทานของการท่องเที่ยวจึงเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญในการบริหารจัดการทรัพยากรที่มีให้เกิดการใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า เพื่อความยั่งยืนในด้านการท่องเที่ยว การสร้างงาน การกระจายผลประโยชน์โดยตรงและโดยอ้อมจากการท่องเที่ยวไปสู่ผู้ที่มีรายได้น้อยอย่างเท่าเทียมภายในภูมิภาค อีกทั้งต้องพิจารณาผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Stakeholder) ของห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวทั้งหมด

ดังนั้นการศึกษานี้จะมุ่งเน้นการพัฒนาแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวเพื่อให้เกิดการบูรณาการระหว่างผู้ประกอบการธุรกิจของอุตสาหกรรมท่องเที่ยว เช่น ร้านอาหาร โรงแรม แหล่งท่องเที่ยว ร้านค้าต่าง ๆ เป็นต้น กับนักท่องเที่ยวที่มีความต้องการที่หลากหลาย โดยมีหลักการสำคัญคือ นักท่องเที่ยวที่ได้รับการบริการต้องได้รับความพึงพอใจอย่างสูงสุด และผู้ประกอบการธุรกิจต่าง ๆ หรือผู้ให้บริการจะต้องได้รับผลประโยชน์สูงสุดเช่นกัน โดยกำหนดตัวแปรในการตัดสินใจ สร้างสมการเป้าหมายเชื่อมโยงข้อจำกัดของทั้ง

ของนักท่องเที่ยวและสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว โดยใช้เทคนิคการสร้างรูปแบบด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มผสม (Mixed-Integer Linear Programming: MILP) ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาแบบวิธีแม่นยำตรง (Exact approach) ที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solution)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าแนวทางในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับอุตสาหกรรมท่องเที่ยวที่มีวิธีที่แตกต่างกันซึ่งปัญหาการวางแผนเส้นทางท่องเที่ยว (Tour route planning problem: TRPP) เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนเนื่องจากต้องมีการพิจารณาข้อมูลจำนวนมากจากผู้ที่มีส่วนได้ส่วนเสียต่าง ๆ ยกตัวอย่างงานวิจัยของ [1–4] ที่ใช้วิธีการทางเมตาเฮอริสติกส์ (Metaheuristics) มาแก้ปัญหา นอกจากนี้ [5] ยังมีการนำวิธีการกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) และวิธีการเลียนแบบอบอ่อน (Simulated Annealing: SA) และ [6] ใช้วิธีการค้นหาข้างเคียงขนาดใหญ่แบบปรับค่าได้ (Adaptive Large Neighborhood Search: ALNS) เพื่อหาเส้นทางท่องเที่ยวที่มีระยะทางที่สั้นที่สุด ต่อมา [7] ใช้วิธี SA เช่นกัน, [8] ศึกษาทฤษฎีอรรถประโยชน์พหุลักษณะ (Multi-Attribute Utility Theory: MAUT) และวิธีการค้นหาแบบทาบ (Tabu Search: TS) การนำวิธีการเหล่านี้มาประยุกต์ในการแก้ปัญหาก็ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่เหมาะสม (Near-optimal) เท่านั้น นอกจากนี้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ได้มีการนำมาใช้สำหรับปัญหาอื่น ๆ เพื่อ

หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด เช่น ปัญหาการขนส่งระหว่างท่าเรือของประเทศไทย [9], การทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือก [10] เป็นต้น ผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่ามิงงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่พิจารณาถึงเงื่อนไขทั้งของนักท่องเที่ยวและสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว ที่มีข้อจำกัดของเวลา ระยะเวลาการเดินทางระหว่างสถานที่ ความพึงพอใจของนักท่องเที่ยว และข้อจำกัดในแต่ละสถานที่นั้น ๆ ร่วมกันทั้งหมด การศึกษานี้จึงได้พัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวเพื่อลดระยะเวลาของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ไม่สามารถให้บริการในกรอบเวลาได้ให้มีค่าต่ำที่สุด ทำให้ผู้ประกอบการทุกรายในชุมชนนั้นเกิดการกระจายรายได้อย่างทั่วถึง นำไปสู่การจ้างแรงงาน และการให้บริการแก่นักท่องเที่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสามารถตอบสนองต่อความต้องการของนักท่องเที่ยวได้อย่างครบถ้วน ในการศึกษาวิจัยนี้ประกอบด้วยหัวข้อถัดไปคือวัตถุประสงค์ของการวิจัย ในส่วนหัวข้อที่ 3 กล่าวถึงวิธีการวิจัย รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการพัฒนาอธิบายในหัวข้อที่ 4 ผลการวิจัยและสรุปผลกล่าวในหัวข้อที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

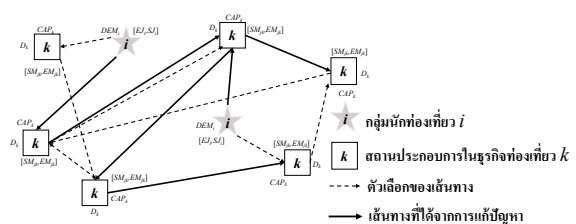
เพื่อพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ไขปัญหาวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ไม่สามารถให้บริการในกรอบเวลาได้ให้มีค่าต่ำที่สุด

3. วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว โดยจำแนกลักษณะของปัญหาและสมมติฐาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ลักษณะของปัญหา

ลักษณะของปัญหาการวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกลุ่มข้อมูลของนักท่องเที่ยว i และมีกลุ่มข้อมูลของกิจกรรมการท่องเที่ยว j ที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละกิจกรรมจะถูกเลือกหรือกำหนดจากความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวว่าต้องการไปที่ใดในสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k โดยกิจกรรมทั้งหมดของนักท่องเที่ยวแต่ละกลุ่มจะดำเนินการแล้วเสร็จไม่เกินกรอบเวลาที่นักท่องเที่ยวกำหนด (EJ_{ij}, SJ_{ij}) และกรอบเวลาของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k นั้น ๆ (SM_{jk}, EM_{jk}) อีกทั้งความสามารถในการให้บริการของแต่ละสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว (CAP_k) จะต้องรองรับปริมาณนักท่องเที่ยวได้ (DEM_i) โดยมีสมการเป้าหมายเพื่อลดระยะเวลาที่ไม่สามารถให้บริการได้ของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว (แสดงดังรูปที่ 1)



รูปที่ 1 ลักษณะปัญหา

3.2 สมมติฐาน

1) นักท่องเที่ยว

- แต่ละกิจกรรมของนักท่องเที่ยวของแต่ละกลุ่มจะได้รับบริการจากสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวเพียงครั้งละแห่งเท่านั้น
- นักท่องเที่ยวมีเวลาในการทำกิจกรรมการท่องเที่ยวที่จำกัด (Time window)
- นักท่องเที่ยวแต่ละกลุ่มมีลำดับกิจกรรมการท่องเที่ยวแตกต่างกัน (Non-permutation schedule)
- นักท่องเที่ยวทุกกลุ่มสามารถเริ่มเดินทางไปยังสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวของกิจกรรมการท่องเที่ยว

ได้ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นของกรอบเวลาที่ใช้ในการท่องเที่ยว
(Available at time zero)

- ทราบค่าระยะเวลาที่ใช้ในการท่องเที่ยว (Sightseeing time) สำหรับแต่ละกิจกรรมการท่องเที่ยวที่แน่นอน

2) สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว

- สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวสามารถให้บริการนักท่องเที่ยวครั้งละกลุ่มเท่านั้น

- สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวมีการจำกัดเวลาในการให้บริการแต่ละกิจกรรมการท่องเที่ยว (Time window)

- จำนวนนักท่องเที่ยวที่ได้รับการบริการจะไม่มากกว่าความสามารถในการให้บริการจากสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวได้ (Tourism carrying capacity)

- มีเงื่อนไขข้อจำกัดของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่บางแห่งไม่สามารถให้บริการได้ (Tourism enterprises' restrictions)

- เวลาเดินทางระหว่างสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวไม่เป็นอิสระต่อกัน (Sequence dependent travel times)

- ระยะทางระหว่างการเดินทาง (Travel time) ของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวแต่ละแห่งไม่มีความสัมพันธ์กันและทราบค่าแน่นอน

3) อื่น ๆ

- ความจุของพาหนะเพียงพอต่อจำนวนของนักท่องเที่ยวแต่ละกลุ่ม

- พิจารณาตารางกิจกรรมการท่องเที่ยวแบบวันต่อวัน

4. การพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์

การพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว กำหนดสัญลักษณ์และตัวแปรเพื่อใช้ในการพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

ดัชนี (Indices)

i, p ดัชนีของกลุ่มนักท่องเที่ยว $i, p=1, 2, \dots, N$

j, l ดัชนีของกิจกรรมการท่องเที่ยว $j, l=1, 2, \dots, O$

k, h ดัชนีของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว
 $k=1, 2, \dots, K$

พารามิเตอร์ (Parameters)

N จำนวนของกลุ่มนักท่องเที่ยว

O จำนวนกิจกรรมการท่องเที่ยว

K จำนวนของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว

PT_{ijk} ระยะเวลาที่ใช้ของกลุ่มนักท่องเที่ยว i กิจกรรม j สถานที่ k (ชั่วโมง)

TRA_{hk} ระยะเวลาเดินทางระหว่างสถานที่ h ไปยังสถานที่ k (ชั่วโมง)

M จำนวนเต็มที่มีค่ามาก

D_k เวลาที่ปิดให้บริการของสถานที่ k (ชั่วโมง)

MR_{ijk} ข้อจำกัดของกลุ่มนักท่องเที่ยว i กิจกรรม j สถานที่ k (ชั่วโมง)

CAP_k ความจุจำนวนคนของสถานที่ k (คน)

DEM_i จำนวนนักท่องเที่ยวในกลุ่ม i (คน)

SJ_i เวลาเริ่มต้นของกลุ่มนักท่องเที่ยว i (ชั่วโมง)

EJ_i เวลาสิ้นสุดของกลุ่มนักท่องเที่ยว i (ชั่วโมง)

SM_{jk} เวลาเริ่มต้นกิจกรรม j สถานที่ k (ชั่วโมง)

EM_{jk} เวลาปิดกิจกรรม j สถานที่ k (ชั่วโมง)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

T_k เวลาที่สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวไม่สามาริให้บริการได้ (ชั่วโมง)

CT_{ijk} เวลาแล้วเสร็จของกลุ่มนักท่องเที่ยว i กิจกรรม j สถานที่ k (ชั่วโมง)

ST_{ijk} เวลาเริ่มต้นของกลุ่มนักท่องเที่ยว i กิจกรรม j สถานที่ k (ชั่วโมง)

X_{ijk} มีค่าเป็น 1 เมื่อสถานที่ k มีกลุ่มนักท่องเที่ยว i ทำกิจกรรม j และมีค่าเป็น 0 อื่น ๆ

Y_{kijpl} มีค่าเป็น 1 เมื่อสถานที่ k มีกลุ่มนักท่องเที่ยว i ทำกิจกรรม j ก่อนกลุ่มนักท่องเที่ยว p ทำกิจกรรม l และมีค่าเป็น 0 อื่น ๆ

W_{ijkh} มีค่าเป็น 1 เมื่อกลุ่มนักท่องเที่ยว i ทำกิจกรรม j สถานที่ k และกิจกรรมก่อนหน้า สถานที่ h และมีค่าเป็น 0 อื่น ๆ

4.1 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

สมการเป้าหมาย (Objective function)

$$\text{Min } Z = \sum_{k \in K} T_k \quad (1)$$

สมการข้อจำกัด (Constraints)

$$T_k \geq (CT_{ijk} - D_k) \cdot X_{ijk} \quad ; \forall i, j, k \quad (2)$$

$$ST_{ijk} \geq CT_{plk} - Y_{kijpl} \cdot M \quad ; \forall i \neq p, j, l, k \quad (3)$$

$$ST_{plk} \geq CT_{ijk} - (1 - Y_{kijpl}) \cdot M \quad ; \forall i \neq p, j, l, k \quad (4)$$

$$MR_{ijk} - X_{ijk} = 0 \quad ; \forall i, j, k \quad (5)$$

$$\sum_{j \in O} DEM_i \cdot X_{ijk} \leq CAP_k \quad ; \forall i, k \quad (6)$$

$$SJ_i \leq \sum_{k \in K} CT_{ijk} \leq EJ_i \quad ; \forall i, j = O \quad (7)$$

$$ST_{ijk} \geq SM_{jk} \cdot X_{ijk} \quad ; \forall i, j, k \quad (8)$$

$$CT_{ijk} \leq EM_{jk} \cdot X_{ijk} \quad ; \forall i, j < O, k \quad (9)$$

$$CT_{ijk} \geq ST_{ijk} + PT_{ijk} - (1 - X_{ijk}) \cdot M \quad ; \forall i, j, k \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} X_{ijk} = 1 \quad ; \forall i, j \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} ST_{i1k} \geq \sum_{k \in K} W_{i1k1} \cdot TRA_{1k} \quad ; \forall i \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} ST_{ijk} \geq \sum_{k \in K} CT_{i(j-1)k} + \sum_{h \in K} \sum_{k \in K} TRA_{hk} \cdot W_{ijkh} \quad ; \forall i, j > 1 \quad (13)$$

$$\sum_{h \in K} \sum_{k \in K} W_{ijkh} = 1 \quad ; \forall i, j > 1, k \neq h \quad (14)$$

$$\sum_{k \in M} W_{i1k1} = 1 \quad ; \forall i \quad (15)$$

$$\sum_{h \in K} W_{ijkh} \leq MR_{ijk} \quad ; \forall i, j > 1, k \quad (16)$$

$$W_{i1k1} \leq MR_{i1k} \quad ; \forall i, k, h \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} W_{ijkh} \leq \sum_{k \in K} W_{i(j-1)hk} \quad ; \forall i, j > 1, h \quad (18)$$

$$ST_{ijk}, CT_{ijk}, T_k \geq 0 \quad ; \forall i, j, k \quad (19)$$

$$X_{ijk}, Y_{kijpl}, W_{ijkh} \in \{0,1\} \quad ; \forall i, j, p, l, k, h \quad (20)$$

สมการวัตถุประสงค์ที่ (1) แสดงวัตถุประสงค์เพื่อวางแผนตารางเวลาการให้บริการของสถานที่ท่องเที่ยวที่ไม่สามารถให้บริการในรอบเวลาได้ให้มีค่าต่ำที่สุด สมการที่

(2) เพื่อหาเวลาที่สถานที่ท่องเที่ยวแต่ละแห่งไม่สามารถให้บริการได้ สมการที่ (3)–(4) แสดงข้อจำกัดเกี่ยวกับลำดับก่อนหลังของกลุ่มนักท่องเที่ยว สมการที่ (5) แสดงข้อจำกัดของสถานที่ท่องเที่ยว สมการที่ (6) แสดงข้อจำกัดด้านความจุจำนวนคนของสถานที่ท่องเที่ยว สมการที่ (7)–(9) แสดงข้อจำกัดด้านเวลาของนักท่องเที่ยวและสถานที่ท่องเที่ยว สมการที่ (10) เพื่อหาเวลาแล้วเสร็จของกลุ่มนักท่องเที่ยว i กิจกรรมการท่องเที่ยว j ในสถานที่ท่องเที่ยว k ต้องมากกว่าหรือเท่ากับเวลาเริ่มต้นบวกกับเวลาที่ใช้ สมการที่ (11) เพื่อให้แน่ใจว่ากิจกรรมการท่องเที่ยวใด ๆ จะถูกจัดสรรให้กับสถานที่ท่องเที่ยวครั้งละสถานที่เท่านั้น สมการที่ (12)–(18) แสดงข้อจำกัดด้านการเดินทางระหว่างสถานที่ท่องเที่ยว ซึ่งพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของสถานที่ท่องเที่ยวที่กิจกรรมการท่องเที่ยวของแต่ละกลุ่มนักท่องเที่ยว สมการที่ (19)–(20) แสดงชนิดของตัวแปรแต่ละชนิด

4.2 ตัวอย่างและผลลัพธ์จากการตรวจสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์

ปัญหาการวางแผนจัดการตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ไม่สามารถให้บริการในรอบเวลาได้ให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งพิจารณาเงื่อนไขข้อจำกัดต่าง ๆ โดยดำเนินการทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นกับตัวอย่างปัญหขนาดเล็ก เพื่อเปรียบเทียบคำตอบและสามารถเป็นตัวแทนของปัญหาที่ซับซ้อนดังกล่าว จากนั้นดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น รวมทั้งดำเนินการตรวจสอบผลเฉลย ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของรูปแบบทางคณิตศาสตร์กำหนดให้มีจำนวนนักท่องเที่ยว 4 กลุ่ม กิจกรรมการท่องเที่ยว 3 กิจกรรม และสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว 3 แห่ง คือ ข้อมูลนำเข้า (Input data) มีดังนี้

1) ระยะเวลาที่ใช้ของกลุ่มนักท่องเที่ยว i ที่กิจกรรมการท่องเที่ยว j บนสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k และเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของกลุ่มนักท่องเที่ยว ดังตารางที่ 1

2) ระยะเวลาเดินทางระหว่างสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k ไปยังสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k ดังตารางที่ 2

3) เวลาเปิดและเวลาปิดให้บริการของกิจกรรมการท่องเที่ยว j บนสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k ดังตารางที่ 3

4) ความจุของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k มีค่าเท่ากับ 40, 50, 65 และ 50 ชั่วโมง ตามลำดับ

5) จำนวนนักท่องเที่ยว i มีค่าเท่ากับ 15, 29, 49 และ 10 คน ตามลำดับ

อธิบายความหมายโดยการยกตัวอย่างของกลุ่มนักท่องเที่ยวที่ 1 ดังนี้ นักท่องเที่ยวกลุ่มที่ 1 มีจำนวนนักท่องเที่ยว 15 คน สามารถทำกิจกรรมท่องเที่ยวได้ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 ถึงชั่วโมงที่ 12 ซึ่งกิจกรรมแรกใช้เวลา 4 ชั่วโมง สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ 1 กิจกรรมต่อมาใช้เวลา 3 ชั่วโมงที่สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ 2 และกิจกรรมสุดท้ายใช้เวลา 2 ชั่วโมงที่สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ 3 แต่ละกิจกรรมนี้นักท่องเที่ยวจะเป็นผู้ระบุสถานที่และเวลาที่ใช้ในการทำกิจกรรมนั้น ๆ เช่น การเข้าเยี่ยมชมสถานที่ต่าง ๆ การรับประทานอาหาร การพักผ่อนส่วนตัว และการซื้อของที่ระลึก เป็นต้น โดยในแต่ละสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว นักท่องเที่ยวก็เป็นผู้กำหนดความต้องการเช่นกัน เช่น พิพิธภัณฑ์ วัด ตลาด ร้านกาแฟ สวนสนุก สวนสาธารณะ ร้านค้า เป็นต้น

ตารางที่ 1 ระยะเวลาที่ใช้: PT_{ijk} (ชั่วโมง)

PT_{ijk}	กิจกรรมการท่องเที่ยว			เวลาเริ่มต้น (ชั่วโมง): S_j	เวลาสิ้นสุด (ชั่วโมง): E_j
	$j=1$	$j=2$	$j=3$		
$i=1$	1(4)	3(3)	2(2)	1	12
$i=2$	2(4)	1(5)	3(3)	1	24
$i=3$	3(3)	2(5)	1(4)	1	18
$i=4$	2(1)	3(7)	1(5)	1	24

หมายเหตุ: k (PT): หมายถึงสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k ; ระยะเวลาที่ใช้ของกลุ่มนักท่องเที่ยว (PT)

ตารางที่ 2 ระยะเวลาเดินทาง: TRA_{hk} (ชั่วโมง)

TRA_{hk}	1	2	3	4
1	0.00	0.5	0.72	0.75
2	0.58	0.00	0.67	0.83
3	0.9	0.77	0.00	0.87
4	0.83	0.55	0.90	0.00

ตารางที่ 3 เวลาเปิดและเวลาปิด: (SM_{jk}, EM_{jk}) (ชั่วโมง)

(SM_{jk}, EM_{jk})	สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k					
กิจกรรม j	1		2		3	
	เปิด	ปิด	เปิด	ปิด	เปิด	ปิด
1	0.00	20	0.02	20	0.03	20
2	0.00	20	0.02	20	0.03	20
3	0.00	20	0.02	20	0.03	20

Lingo 13.0 Solver Status [Lingo33]

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 6.24 Infeasibility: 6.55476e-013 Iterations: 296		Variables Total: 869 Nonlinear: 0 Integers: 433
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 6.24 Obj Bound: 6.24 Steps: 0 Active: 0		Constraints Total: 1557 Nonlinear: 0
		Nonzeros Total: 3896 Nonlinear: 0
		Generator Memory Used (K) 293
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00:00:00
Update Interval: 2		Interrupt Solver Close

รูปที่ 2 ผลการทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ด้วย

โปรแกรม LINGO Version 13.0

จากสมการคณิตศาสตร์ทั้ง 20 สมการ สามารถหาคำตอบที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม LINGO Version 13.0 (LINDO Systems, Inc., Chicago, IL, USA) บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดยทำการทดสอบบนคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพ Processor: Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50GHz 2.70 GHz. Installed memory (RAM): 4.00 GB. System type: 64bit Operating

System ผลเฉลยจากการประมวลผลแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งผลการคำนวณของค่าวัตถุประสงค์เท่ากับ 6.24 ชั่วโมง

ค่าของตัวแปรไบนารี Y_{kijpl} บอกถึงลำดับการเข้ารับบริการจากสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k โดยกลุ่มนักท่องเที่ยว i กิจกรรมการท่องเที่ยว j แล้วตามด้วยกลุ่มนักท่องเที่ยว p กิจกรรมการท่องเที่ยว l แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวอย่างค่าของตัวแปรไบนารี Y_{kijpl}

k	i	j	p	l	Activity
1	1	1	2	2	1
1	2	2	4	3	1
1	4	3	3	3	1
2	2	1	4	1	1
2	4	1	3	2	1
2	3	2	1	2	1
3	3	1	4	2	1
3	4	2	1	3	1
3	1	3	2	3	1

ค่าของตัวแปรไบนารี X_{ijk} บอกถึงการกำหนดเมื่อกลุ่มนักท่องเที่ยว i ในกิจกรรมการท่องเที่ยว j บนสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว k แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวอย่างค่าของตัวแปรไบนารี X_{ijk}

i	j	k	Activity
1	1	1	1
1	2	2	1
1	3	3	1
2	1	2	1
2	2	1	1
3	2	2	1
3	3	1	1
4	3	1	1

จากนั้นพิจารณาค่าตัวแปรตัดสินใจอื่นๆ โดยค่าตัวแปรตัดสินใจ ST_{ijk} และค่าตัวแปรตัดสินใจ CT_{ijk} เป็นเวลาเริ่มต้น

และสิ้นสุดการทำกิจกรรมของนักท่องเที่ยวในสถานที่ใด ๆ แสดงผลดังตารางที่ 6

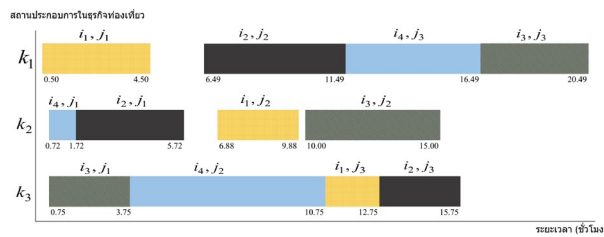
ตารางที่ 6 ตัวอย่างค่าของตัวแปรตัดสินใจ ST_{ijk} และ CT_{ijk}

i	j	k	ST_{ijk}	CT_{ijk}
1	1	1	0.5	4.5
1	2	2	6.88	9.88
1	3	3	10.75	12.75
2	1	2	1.72	5.72
2	2	1	6.49	11.49
2	3	3	12.75	15.75
3	1	3	0.75	3.75
3	2	2	10.00	15.00
3	3	1	16.49	20.49
4	1	2	0.72	1.72
4	2	3	3.75	10.75
4	3	1	11.49	16.49

พิจารณาค่าตัวแปรตัดสินใจ T_k ซึ่งแสดงเวลาที่สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวแต่ละแห่งไม่สามารถให้บริการได้ โดยอ้างอิงการคำนวณจากสมการที่ (2) แสดงผลดังตารางที่ 7 ดังนั้นค่าวัตถุประสงค์ (Objective function) จากสมการที่ (1) คือการหาผลรวมเวลาที่ต่ำที่สุดของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ไม่สามารถให้บริการในกรอบเวลาได้ มีค่าเท่ากับ $5.49 + 0.75 = 6.24$ ชั่วโมง เมื่อนำมาสร้างแผนภูมิการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวในแต่ละสถานที่จะได้ดังรูปที่ 3 ที่แสดงถึงลำดับการให้บริการแก่นักท่องเที่ยวในกิจกรรมการท่องเที่ยวใด ๆ

ตารางที่ 7 ค่าของตัวแปรตัดสินใจ T_k

T_k	เวลาที่ไม่สามารถให้บริการ (ชั่วโมง)
1	5.49
2	0.00
3	0.75



รูปที่ 3 แผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวจากรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา

จากตัวอย่างการทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวนี้พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อนำผลลัพธ์จากการทดลองไปคำนวณโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์ เอ็กเซล 2016 (Microsoft Excel 2016) โดยการจัดเรียงกลุ่มนักท่องเที่ยวเข้าสู่สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวจากนั้นทำการตรวจสอบเงื่อนไขข้อจำกัดต่าง ๆ อาทิ เวลาเริ่มต้นและเวลาแล้วเสร็จของกลุ่มนักท่องเที่ยวที่สถานประกอบการธุรกิจในแต่ละแห่ง ลำดับก่อนหลังของกิจกรรมการท่องเที่ยว เป็นต้น พบว่าผลรวมเวลาที่ต่ำที่สุดของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ไม่สามารถให้บริการในกรอบเวลาได้ มีค่าเท่ากับผลลัพธ์การคำนวณจากโปรแกรม LINGO Version 13.0 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.24 ชั่วโมง

5. ผลการวิจัย

จากการศึกษาและพัฒนาในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอสำหรับวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวเพื่อลดระยะเวลาของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ไม่สามารถให้บริการในกรอบเวลาให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจากการทดลองการแก้ไขปัญหาก็ได้สร้างตัวอย่างปัญหาที่มีขนาดแตกต่างกัน ได้แก่ กลุ่มปัญหาขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ รวมทั้งสิ้น 25 ตัวอย่าง โดยดำเนินการปรับค่าจำนวนของกลุ่มนักท่องเที่ยวระหว่าง 2 ถึง 14 กลุ่ม จำนวนกิจกรรมการท่องเที่ยวระหว่าง 3 ถึง 6 กิจกรรม และจำนวนของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวระหว่าง 2 ถึง 5 สถานที่ และปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ข้อมูลนำเข้า (Input data) ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลจริงของกรณีศึกษาในปัจจุบัน ผลการทดลองจะแสดงผลเลขของค่าวัตถุประสงค์ที่ต่ำที่สุด ระยะเวลารวมที่สถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวไม่สามารถให้บริการในกรอบเวลาได้ (ชั่วโมง)

และระยะเวลาในการคำนวณ (วินาที) ดังตารางที่ 8 โดยขนาดปัญหาที่ใหญ่ที่สุดที่รูปแบบทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้มีขนาดจำนวนนักท่องเที่ยว 13 กลุ่ม กิจกรรมการท่องเที่ยว 5 กิจกรรม และสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยว 5 แห่ง ซึ่งสามารถครอบคลุมขนาดของปัญหาจริงที่ใหญ่ที่สุดได้ ภายใต้กรอบระยะเวลาในการคำนวณที่อุตสาหกรรมท่องเที่ยวสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 8 คำตอบและเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบจากโปรแกรม LINGO Version 13.0

ขนาดของปัญหา ($N \cdot O \cdot K$)	ค่าวัตถุประสงค์ (ชั่วโมง)	เวลาในการ คำนวณ (วินาที)
2•3•3	16.98	<1
2•3•2	8.95	<1
3•3•2	9.62	1
3•3•3	16.98	1
4•3•3	26.78	1
4•4•3	31.84	1
5•3•3	28.87	2
5•4•4	18.53	1
5•5•4	45.78	1
5•5•5	29.72	2
6•4•4	40.47	2
6•5•5	67.41	2
7•3•3	19.64	3
7•5•5	38.32	3
8•4•4	44.58	3
8•5•5	52.7	3
9•5•5	53.39	3
10•4•4	61.58	3
10•5•5	148.86	11
11•5•5	154.36	252.01
11•6•5	159.8	729.21
12•5•5	201.42	1,312.62
12•6•5	164.69	8,741.83

ตารางที่ 8 คำตอบและเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบจากโปรแกรม LINGO Version 13.0 (ต่อ)

ขนาดของปัญหา ($N \cdot O \cdot K$)	ค่าวัตถุประสงค์ (ชั่วโมง)	เวลาในการ คำนวณ (วินาที)
13•5•5	203.42	1,711.56
14•5•5	257.42	> 86,487

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการแก้ไขปัญหาวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการวางแผนดังกล่าวต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่หลากหลายและผู้ใช้มีส่วนเกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวไม่สามารถจัดสรรทรัพยากรต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเพื่อให้การวางแผนดังกล่าวเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวที่ไม่สามารถให้บริการในกรอบเวลาได้ให้มีค่าต่ำที่สุด สำหรับแก้ไขปัญหาดังกล่าวในเชิงอุตสาหกรรมทำให้สถานประกอบการเหล่านี้ได้มีการวางแผนจัดการในเรื่องของค่าใช้จ่ายที่อาจจะเกิดขึ้น เช่น ค่าจ้างพนักงานที่ทำงานล่วงเวลา ค่าปรับหรือค่าสูญเสียรายได้จากการที่ไม่สามารถให้บริการได้ เป็นต้น เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายต่อการนำไปใช้งานของกรณีศึกษาได้ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพของรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาแล้ว ผลปรากฏว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพทั้งด้านการพัฒนาคุณภาพของผลเฉลยและระยะเวลาในการคำนวณซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวดังกล่าวได้ ซึ่งขณะนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้น และอยู่ระหว่างการดำเนินการต่อยอดและขยายผลไปยังกลุ่มอุตสาหกรรมท่องเที่ยวในรูปแบบการให้ภาพเป็นตัวประสานกับผู้ใช้ (Graphical user interface: GUIs) ที่ผู้ใช้งานสามารถใช้วางแผนได้สะดวก

และง่ายขึ้น นอกจากนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เช่น ธุรกิจโรงแรมและที่พัก ธุรกิจขนส่ง ธุรกิจอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น

อย่างไรก็ตามสำหรับการวางแผนการจัดตารางการให้บริการของสถานประกอบการในธุรกิจท่องเที่ยวยังต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยในด้านต้นทุน และกำไร ดังนั้นในการต่อของงานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาสถานการณ์หรือเงื่อนไขที่ใกล้เคียงความเป็นจริงของปัญหามากยิ่งขึ้น โดยมีการพิจารณาเพิ่มช่วงเวลาในการคำนวณ เพื่อความเหมาะสมกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง และในส่วนวิธีการแก้ไขปัญหของงานวิจัย ควรประยุกต์ใช้วิธีการทางเมตธีวริสติกส์ ในการพัฒนาผลเฉลยและระยะเวลาในการคำนวณ เพื่อรองรับขนาดของปัญหาในเชิงอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจากกลุ่มวิจัยการพัฒนาโมเดลเชิงระบบสำหรับอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Khamsing, K. Chindaprasert, R. Pitakaso, W. Sirirak, and C. Theeraviriyaya, "Modified ALNS algorithm for a processing application of family tourist route planning: a case study of Buriram in Thailand," *computation*, vol. 9, no. 2, pp. 23, 2021, doi: 10.3390/computation9020023.
- [2] X. Wu, H. Guan, Y. Han, and J. Ma, "A tour route planning model for tourism experience utility maximization," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 10, 2017, doi: 10.1177/1687814017732309.
- [3] X. Zhou, M. Su, Z. Liu and D. Zhang, "Smart tour route planning algorithm based on clustering center motive iteration search," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 185607–185633, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960761.

- [4] X. Zhou, B. Sun, S. Li and S. Liu, "Tour route planning algorithm based on precise interested tourist sight data mining," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153134–153168, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3010420.
- [5] Q. Pan and X. Wang, "Independent travel recommendation algorithm based on analytical hierarchy process and simulated annealing for professional tourist," *Applied Intelligence*, vol. 48, no. 6, pp. 1565–1581, 2017, doi: 10.1007/s10489-017-1014-0.
- [6] W. Sirirak and R. Pitakaso, "Marketplace location decision making and tourism route planning," *administrative sciences*, vol.8, no. 4, pp. 72, 2018, doi: 10.3390/admsci8040072.
- [7] Z. K. A. Baizal, K. M. Lhaksmana, A. A. Rahmawati, M. Kirom, and Z. Mubarak, "Travel route scheduling based on user's preferences using simulated annealing," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 1275–1287, 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i2.pp1275-1287.
- [8] M. A. Uwaisy, Z. K. A. Baizal, and M. Y. Reditya, Recommendation of scheduling tourism routes using tabu search method (case study Bandung)," *Procedia Computer Science*, vol. 157, pp. 150–159, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.08.152.
- [9] S. Boontaveeyuwat, "Optimizing the transportation of international container cargoes of Thailand under the appearances of two new deep seaports: Dawei and Pakbara ports," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 33, no. 2, pp. 104–110, 2016.
- [10] K. Sathapornprasath and P. Praneetpckkrang, "Mathematical model for paddy drying by jet spouted bed dryer," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 34, no. 4, pp. 22–29, 2017.

การบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ด้วย โอโซนเนชั่น

Treatment of Gaseous Formaldehyde in a Gross Anatomy Laboratory using Ozonation

วิภาดา เดชะปัญญา^{1,*}, สรรพาวุธ นนทกุล², สนั่น พุทธาบุญ¹, สมภพ สนองราษฎร์¹ และสุพัฒน์พงษ์ มัตราช¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมืองศรีโค วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190

² สำนักงานเทศบาลตำบลเมืองศรีโค เมืองศรีโค วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190

Wipada Dechapanya^{1,*}, Sanpawoot Nontula², Sanan Phudthabun¹, Sompop Sanongraj¹ and Supatpong Mattaraj¹

¹Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Mueang Si Khai, Warin Chamrap, Ubonratchathani, 34190, Thailand

²Office of the Mueang Si Khai Subdistrict Municipality, Mueang Si Khai, Warin Chamrap, Ubonratchathani, 34190, Thailand

*Corresponding Author E-mail: wipada.d@ubu.ac.th

Received: Oct 25, 2021; Revised: Dec 23, 2021; Accepted: Dec 28, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบโดยใช้กระบวนการโอโซนเนชั่น ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่ทำการศึกษ ได้แก่ อัตราการฟุ้งโอโซนและความเร็วพัดลมดูดอากาศ วิธีพินผิวตอบสนอง (RSM) แบบโมเดลส่วนประสมกลาง (CCD) ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ นอกจากนี้ยังได้หาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ การศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรก สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาร่างอาจารย์ใหญ่โดยนักศึกษาแพทย์ และชุดการทดลองที่สอง สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นการศึกษาร่างอาจารย์ใหญ่โดยนักศึกษาพยาบาล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่ได้จากการทดลองส่วนใหญ่มีค่าค่อนข้างสูง (สูงกว่าร้อยละ 85) สำหรับทั้งสองกรณีศึกษา ประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้จากการทำนายโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากโมเดล CCD ได้แก่ อัตราการฟุ้งโอโซนที่ 1,210 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศที่ 1.24 เมตรต่อวินาที

คำสำคัญ: ก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์, โอโซนเนชั่น, ห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์, การบำบัดก๊าซพิษ

Abstract

The main objective of this research was to study treatment of gaseous formaldehyde in a Gross Anatomy Laboratory (GAL) using the prototype of toxic gas purifier with ozonation. Factors affecting treatment removal efficiency include ozone dosage rate and air blower speed. Response Surface Methodology (RSM) with the Central Composite Design (CCD) model was applied to design the experimental sets and to analyze the statistical data. The optimal conditions for treatment of gaseous formaldehyde were also investigated. Two sets of experiment were conducted in which, the first set was for case study 1 (the cadaver studied by medical students) and the second set was for case study 2 (The cadaver studied by

nursing students). Results show that formaldehyde removal efficiencies received from most of experiments were relatively high (above 85%) for both case studies. Predicted removal efficiencies from the mathematical model were in good agreement with those from experimental data. The optimal conditions obtained from the CCD model were at the ozone dosage rate of 1,210 mg/hr and the air blower speed of 1.24 m/s.

Keywords: Gaseous formaldehyde, Ozonation, Gross Anatomy Laboratory (GAL), Toxic gas treatment

1. บทนำ

ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ การผลิตพาร์ทิเคิลบอร์ด การย้อมสีผ้า เพื่อปรับปรุงให้สีย้อมยึดติดแน่น อีกทั้งยังใช้เป็นสารประกอบในผลิตภัณฑ์และวัสดุต่าง ๆ (กาวประสานชิ้นงาน สี น้ำยาเคลือบเงา น้ำยาทำความสะอาด กระดาษทิชชู และ เฟอร์นิเจอร์) ด้านการเกษตร ได้แก่ การผลิตสารที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ในดิน และใช้เป็นสารเคลือบผลผลิตทางการเกษตรไม่ให้เน่าเสีย อีกทั้งยังมีความสำคัญอย่างมากต่อการนำไปใช้ในด้านทางการแพทย์ ได้แก่ การฆ่าเชื้อในโรงพยาบาล เครื่องมือทางการแพทย์ และใช้ในการเก็บรักษาเนื้อเยื่อทางกายวิภาค (Anatomical specimens) ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ ไม่ให้เน่าเสีย [1] เมื่อไอระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมามีการสะสมเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของบุคคลที่ปฏิบัติงานภายในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งอาการที่แสดงออกมากขึ้นกับปริมาณที่ได้รับ หากได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ตั้งแต่ 0.01 พีพีเอ็ม ไปจนถึง 30 พีพีเอ็ม จะก่อให้เกิดอาการระคายต่อผิวหนัง ดวงตา จมูก คอ และมีอาการไอ แน่นหน้าอก หากรับเข้าไปในปริมาณสูงกว่า 100 พีพีเอ็ม อาจทำให้มีโอกาเสียชีวิตได้ [2] นอกจากนี้ฟอร์มาลดีไฮด์ยังเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์อีกด้วย ทั้งนี้ OSHA ได้กำหนดค่ามาตรฐานการปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ในบรรยากาศการทำงาน ตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง ต้องไม่เกิน 0.75 พีพีเอ็ม และกำหนดค่าจำกัดที่สามารถสัมผัสได้ในช่วงระยะเวลาสั้นสำหรับเก็บตัวอย่าง 15 นาที ต้องไม่เกิน 2 พีพีเอ็ม [3]

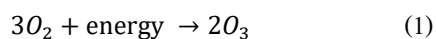
งานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาวิธีการและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศหลายวิธีการ Tseng et al. [4] ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วย

เครื่องฟอกอากาศสี่ชนิด ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) เครื่องฟอกอากาศที่มีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เครื่องฟอกอากาศที่มีการปล่อยประจุลบ (Negative ion) และเครื่องฟอกอากาศที่มีการใช้โอโซน (Ozone air cleaner) โดยมีตัวแปรสำคัญที่ศึกษา คือ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ เวลาที่ใช้ในการบำบัด 4 ชั่วโมง จากการทดสอบประสิทธิภาพเรียงลำดับจากมากสุดไปหาน้อยสุดดังนี้ เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (ร้อยละ 56.0) เครื่องฟอกอากาศด้วยการใช้โอโซน (ร้อยละ 44.2) เครื่องฟอกอากาศด้วยการปล่อยประจุลบ (ร้อยละ 30.8) และเครื่องฟอกอากาศด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (ร้อยละ 28.6) อีกทั้งยังพบว่า เครื่องฟอกอากาศด้วยโอโซนเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูง เหมาะกับการใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

กระบวนการบำบัดด้วยโอโซน (Ozonation) เป็นเทคโนโลยีทางเลือกอย่างหนึ่ง ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีต้นทุนในการดำเนินการที่ถูกกว่าวิธีอื่น ๆ และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย จากการศึกษาก่อนหน้านี้ [5] พบว่าโอโซนสามารถใช้บำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องจำลองระบบปิดที่มีแหล่งกำเนิดอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ผ่านกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process, AOP) ซึ่งโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรงเมื่อทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ เช่น ฟอร์มาลดีไฮด์จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้าย (Final products) ได้แก่ CO_2 และ H_2O ซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยและ

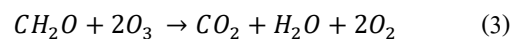
เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การบำบัดด้วยวิธีนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจึงไม่จัดว่าเป็นก๊าซมลพิษ สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ทันที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเชิงเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย พบว่าการใช้โอโซนสามารถเป็นหนึ่งในทางเลือกสำหรับการบำบัดสารมลพิษที่สามารถระเหยง่าย เช่น ฟอรั่มัลดีไฮด์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและราคาถูก

การบำบัดก๊าซฟอรั่มัลดีไฮด์ด้วยโอโซนเป็นวิธีการใช้โอโซนที่ได้จากเครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator) โดยให้ออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อทำให้ออกซิเจนแตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอมเดี่ยว จากนั้นออกซิเจนอะตอมเดี่ยวจะจับตัวกับก๊าซออกซิเจนอีกครั้ง ทำให้ได้ก๊าซโอโซนออกมา แสดงดังสมการที่ (1) กลไกการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอรั่มัลดีไฮด์และโอโซนได้ถูกศึกษา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี BHandHLYP เพื่อทำนายวิถีการเกิดปฏิกิริยา (Pathway) ซึ่งวิถีการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีอยู่ทั้งหมด 14 วิถี นำไปสู่การเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 8 ตัว ได้แก่ P1 (HCCOOH+O₂), P2 (HCO+HOOO), P3 (H₂COO+O₂), P4 (cCH₂O₂+O₂), P5(HC(O)OO+OH), P6(HCO₂+HOO), P7 (CO₂+H₂O₂) และ P8 (CO₂+2OH) แสดงดังสมการที่ (2) อย่างไรก็ตามสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอรั่มัลดีไฮด์และโอโซนมีเพียง 2 ตัวหลัก ได้แก่ P1 (HCCOOH+O₂) และ P2 (HCO+HOOO) เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ตั้งแต่ P3 ถึง P8 มีค่าการดูดพลังงานความร้อนสูงกว่า P1 และ P2 จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา [6]



ในการบำบัดอากาศเสีย โอโซนจะถูกป้อนเข้าไปในอากาศที่มีสารฟอรั่มัลดีไฮด์ปนเปื้อนอยู่ เพื่อทำการออกซิไดซ์ (Oxidize) ก๊าซฟอรั่มัลดีไฮด์ โดยตัวโอโซนเองเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong oxidizing agent) จึงเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้ายที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของฟอรั่มัลดีไฮด์ด้วยโอโซน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และน้ำ แสดงดังสมการที่ (3) [7] นอกจากนี้โอโซนซึ่งใช้เป็นสารออกซิไดซ์แล้ว ยังมีสาร

ออกซิไดซ์อื่น ๆ เช่น ก๊าซคลอรีน เป็นต้น แต่คลอรีนเป็นก๊าซพิษร้ายแรงและคงตัวอยู่ได้นานกว่าก๊าซโอโซน จึงไม่นิยมใช้กัน เนื่องจากก๊าซคลอรีนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหรือก๊าซคลอรีนส่วนเกินจะระบายออกพร้อมอากาศอากาศที่ถูกบำบัด ส่งผลกระทบต่อผู้อยู่ในบริเวณรอบข้างได้ ดังนั้นก๊าซโอโซนเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรมากกว่าก๊าซคลอรีน ทั้งนี้โอโซนเองมีแนวโน้มที่จะสลายตัวกลับเป็นก๊าซออกซิเจนได้ง่าย และมีเวลาครึ่งชีวิตเพียง 7-10 นาที ในอากาศในอาคาร [8]

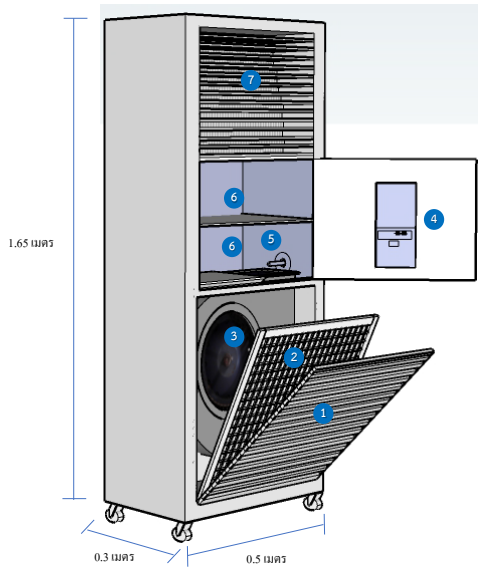


ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนในอากาศในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นในขณะที่มีการใช้งานห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องที่ออกแบบและสร้างโดยคณะผู้วิจัย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

1. เครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบแบบไหลต่อเนื่อง เป็นเครื่องที่ออกแบบโดยคณะผู้วิจัยและสั่งประกอบ โดยมีขนาด 30 เซนติเมตร × 50 เซนติเมตร × 165 เซนติเมตร และมีระยะความยาวที่อากาศไหลผ่านโซนในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 4.7 เมตร โดยภายในตัวเครื่องติดตั้งแผ่นกั้นเพื่อให้การไหลของอากาศในเครื่องเป็นแบบ plug flow เพื่อช่วยให้มีระยะเวลาสัมผัสกับโอโซนนานขึ้น และที่ด้านล่างของตัวเครื่องได้ติดตั้งพัดลมดูดอากาศ (Air blower) ซึ่งสามารถปรับความเร็วได้ทั้งหมด 10 ระดับ โดยมีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 0.85–2.11 เมตรต่อวินาที โดยขนาดและรายละเอียดของเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีองค์ประกอบดังนี้ 1) ฝาปิดแผ่นกรองอากาศ (Air filter cover) 2) แผ่นกรองอากาศ (Air filter) 3) พัดลมโบลเวอร์ (Blower) 4) แผงควบคุมความเร็วของโบลเวอร์ (Speed controller) 5) ท่อปล่อยโอโซน (Ozone inlet) 6) แผงกั้น (Baffles) และ 7) ช่องปล่อยอากาศที่ผ่านการบำบัด (Treated air outlet)



รูปที่ 1 ขนาดและรายละเอียดของเครื่องบำบัดก๊าซพิษ
ต้นแบบ

2. เครื่องกำเนิดโอโซน เป็นเครื่องสังประกอบ ซึ่งสามารถปรับอัตราการฟ่นโอโซน (Ozone dosage rate) ได้ในช่วงประมาณ 0–10,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยผลิตโอโซนจากออกซิเจนบริสุทธิ์หรืออากาศสะอาด โอโซนที่ผลิตได้จะถูกจ่ายเข้าไปยังเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบโดยไหลผ่านท่อปล่อยโอโซนดังแสดงในรูปที่ 1 (หมายเลข 5)

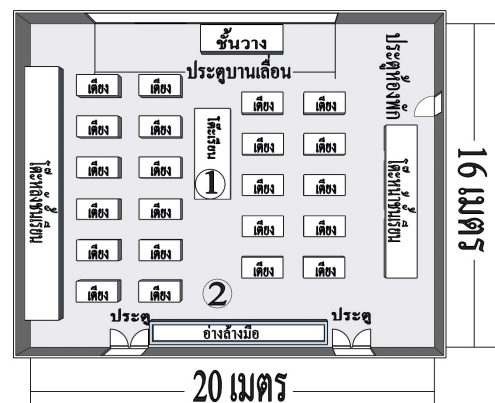
3. เครื่องวัดปริมาณก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์แบบพกพา Formaldehyde Meter/Monitor ซึ่งมีช่วงการวัดค่าตั้งแต่ 0–10 พีพีเอ็ม และมีค่าความละเอียด (Resolution) อยู่ที่ 0.01 พีพีเอ็ม จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [9] ได้ทำการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ที่วัดด้วยเครื่องวัดแบบพกพาเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้โดยเครื่อง HPLC พบว่าค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ร้อยละ 5

4. เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบดิจิทัล รุ่น DHT-1 (DAEYOON SCALE INDUSTRIAL, Seoul, Korea) ใช้ในการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์

2.2 ห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์

ห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ ของภาควิชากายวิภาคศาสตร์ วิทยาลัยแพทยศาสตรและการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มีขนาด $16 \times 20 \times 3.5$ ลูกบาศก์เมตร โดยห้องปฏิบัติการมีลักษณะโปร่งแสงอาทิตย์สามารถเข้าถึง

ได้ตลอดจากประตูบานเลื่อนยาวจรดพื้น ซึ่งสามารถเลื่อนเปิดได้และติดตั้งอยู่เกือบตลอดความยาวของห้องทางฝั่งตรงข้ามกับประตูทางเข้า และมีประตูทางเข้าออก 3 ทาง มีรางอาจารย์ใหญ่ทั้งสิ้น 22 เติง มีระบบดูดอากาศทั้งหมด 16 จุดในแต่ละจุดสามารถใช้ร่วมกัน 2 เติง โดยระบบดูดอากาศจะต่อเข้ากับท่อบริเวณหัวเตียงเพื่อดูดระบายความเข้มข้นและกลิ่นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ออกไปในลักษณะการดูดอากาศจากในห้องลงสู่ระบบปล่องด้านล่างซึ่งต่อออกไปนอกอาคาร อีกทั้งยังมีระบบทำความเย็นกระจายอยู่ทั่วทั้งห้อง จำนวน 22 ช่อง โดยทั่วไปจะทำการเปิดระบบดูดอากาศเฉพาะวันที่มีการเรียนการสอน โดยเปิดก่อนเรียนอย่างน้อย 30 นาที แผนผังห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์และจุดตรวจวัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ (จุดที่ 1 บริเวณกลางห้อง) จุดติดตั้งเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ (จุดที่ 2 ใกล้ประตูทางเข้า) แสดงดังรูปที่ 2 ทั้งนี้จุดตรวจวัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์จะอยู่ห่างจากจุดติดตั้งเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบประมาณ 7 เมตร ซึ่งเป็นระยะรัศมีในการดูดอากาศของเครื่องบำบัด สำหรับจุดติดตั้งเครื่องบำบัดเลือกจุดที่ไม่รบกวนการเรียนการสอนของผู้ใช้ห้องปฏิบัติการ แต่ไม่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์จนเกินไป



รูปที่ 2 แผนผังการติดตั้งชุดเครื่องมือสำหรับตรวจวัดและ
บำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์

2.3 การตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ก่อนการบำบัด

ก่อนการบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ คณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 120 นาที (ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่

นักศึกษาแพทย์และพยาบาล ศึกษาาร่างอาจารย์ใหญ่ในห้องปฏิบัติการ) โดยทำการอ่านค่าทุก ๆ 5 นาที เพื่อเป็น Control experiment ซึ่งการตรวจวัดจะทำอย่างน้อย 2 ชั่วโมง และตรวจวัดทั้ง 2 กรณีศึกษา ได้แก่ 1) กรณีที่มีการเรียนการสอนและเปิดร่างอาจารย์ใหญ่เพื่อศึกษาระบบต่าง ๆ ในร่างกาย โดย นศ.แพทย์ และ 2) กรณีที่มีการเรียนการสอนและมีการเปิดร่างแต่ไม่มีการผ่าร่างอาจารย์ใหญ่ ซึ่งเป็นการศึกษาโดย นศ.พยาบาล ทั้งนี้ในกรณีที่ไม่มีกรเรียนการสอน ไม่ได้ทำการศึกษาผลการบำบัดเนื่องจากเป็นช่วงที่ไม่มีผู้ใช้ห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ หรืออาจมีการใช้ในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งในการศึกษาทั้งสองกรณีมีข้อแตกต่างดังนี้คือ กรณีที่ 1 อาจารย์ใหญ่ที่ทำการศึกษาเป็นร่างใหม่ที่ยังไม่ได้ผ่านการผ่าร่างเพื่อศึกษา ส่วนกรณีที่ 2 เป็นการเรียนการสอนของนักศึกษาพยาบาลที่ศึกษาระบบอวัยวะต่าง ๆ ของอาจารย์ใหญ่ ซึ่งเป็นร่างอาจารย์ใหญ่นักศึกษาแพทย์ได้ทำการผ่าศึกษาแล้ว

2.4 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) แบบส่วนประสมกลาง (CCD) มาใช้ในการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert (Trial Version 13, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซน ซึ่งออกแบบให้การทดลองเป็นแบบสุ่ม กำหนดให้เป็น 2 ปัจจัย และมี 3 ระดับ ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนอัตราการฟุ้งโอโซนและความเร็วอากาศที่ถูกดูดเข้าไปยังเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1 จากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการออกแบบการทดลอง ได้ชุดการทดลองทั้งหมด 11 ชุด

ตารางที่ 1 ตัวแปรและค่าของตัวแปรที่ทำการศึกษาวิจัย

ปัจจัย	ค่าที่ศึกษา		
	ต่ำ	กลาง	สูง
อัตราการฟุ้งโอโซน (D, มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	700	1,100	1,500
ความเร็วพัดลมดูดอากาศ (v, เมตรต่อวินาที)	1.12	1.58	2.04

2.5 การบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยวิธีโอโซนเนชั่น

ศึกษาการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ ในขณะที่มีการใช้ห้องปฏิบัติการ โดยกำหนดตัวแปรหลักคือ อัตราการฟุ้งโอโซน 3 ค่า ได้แก่ 700, 1,100 และ 1,500 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยปรับความเร็วของพัดลมดูดอากาศ 3 ค่า ได้แก่ 1.12, 1.58 และ 2.04 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะส่งผลให้ระยะเวลาสัมผัสเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การบำบัดจะทำตามชุดการทดลองที่ได้จากโมเดล CCD ซึ่งทำการบำบัดจนค่าความเข้มข้นก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่สภาวะคงตัวหรือลดลงจนเหลือ 0 พีพีเอ็ม สำหรับแต่ละชุดการทดลอง และการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์จะอ่านค่าทุก ๆ 5 นาทีตั้งแต่ก่อนการบำบัดจนค่าเข้าสู่สมดุล ทั้งนี้ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อค่าที่ได้จากการทดลอง เช่น ระบบดูดอากาศและระบบทำความเย็นในห้องปฏิบัติการ ได้มีการควบคุมให้อยู่ในสภาวะเดียวกันตลอดการทดลองตั้งแต่ก่อนการบำบัดถึงสิ้นสุดการบำบัด ซึ่งแต่ละชุดการทดลองจะทำการบำบัด 2 ชั่วโมง

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1) งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Design-Expert 13 (Trial version) โดยพิจารณาจากค่า P เพื่อกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนอง (Response) ซึ่งค่า P ที่ได้จากการทดลองในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 95 ซึ่งที่ความเชื่อมั่นระดับนี้ให้ความถูกต้องและมีความเหมาะสม โดยที่ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงได้ว่าปัจจัยนั้น ๆ มีผลกระทบต่อร้อยละของการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ ถ้าค่า P มากกว่า 0.05 แสดงได้ว่าปัจจัยนั้น ๆ ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์

2) วิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองกำลังสอง เมื่อผลการทดลองอยู่ในจุดที่ใกล้เคียงจุดที่ดีที่สุด โดยนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ (4) [10]

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4)$$

โดยที่ y	คือ ตัวแปรผลตอบสนอง
X_i, X_j	คือ ปัจจัยการทดลอง
k	คือ จำนวนปัจจัยทั้งหมด
β_0	คือ ค่าคงที่
$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$	คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย
$\sum_{i=1}^k \beta_i X_i$	คือ เทอมของอิทธิพลเชิงเส้น (Linear Effect)
$\sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_{ii}^2$	คือ เทอมของอิทธิพลกำลัง สอง (Quadratic Effect)
$\sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$	คือ เทอมของอิทธิพลร่วม (Cross-product Effect)

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ได้มาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA, Analysis Of Variance) ของตัวแปรที่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์

3) ตรวจสอบความถูกต้อง (Model Adequacy Checking) ของแบบจำลองเพื่อสังเกตความเหมาะสมของข้อมูล ซึ่งหลังจากที่ได้มีการตรวจสอบรูปแบบจะทำให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

4) นำสมการทำนายไปหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปร ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์โดยฟังก์ชันผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimizers)

5) ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ด้วยกราฟของตัวแปรพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot)

2.7 การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด

การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด (Removal Efficiency, R.E.) ก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบร่วมกับการใช้โอโซน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$R.E. = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \quad (5)$$

โดยที่ $R.E.$	คือ ประสิทธิภาพการกำจัด ณ จุดสมดุล
C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
C_e	คือ ความเข้มข้นเฉลี่ย ณ จุดสมดุล (พีพีเอ็ม)

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ก่อนการบำบัด

ผลการตรวจวัดค่าความเข้มข้นก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการ ก่อนการบำบัดด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ ทั้ง 2 กรณีศึกษา คือกรณีที่ 1 มีการเปิดผาร่างอาจารย์ใหญ่ เพื่อศึกษาระบบต่าง ๆ ในร่างกาย และกรณีที่ 2 ไม่มีการเปิดผาร่างอาจารย์ใหญ่ พบว่าค่าความเข้มข้นก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ที่ทำการตรวจวัดในช่วงเวลา 120 นาที มีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงการตรวจวัด โดยมีค่าอยู่เฉลี่ยเท่ากับ 3.58 ± 0.074 พีพีเอ็ม และ 1.29 ± 0.019 พีพีเอ็ม สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์

ผลการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 มีการเปิดผาร่างอาจารย์ใหญ่ในการศึกษา และกรณีศึกษาที่ 2 ไม่มีการเปิดผาร่างอาจารย์ใหญ่ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนการบำบัดและค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล และประสิทธิภาพการกำจัดดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในห้องปฏิบัติการสำหรับทั้งสองกรณีศึกษา พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25–29 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 55–70 ผลจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 เท่ากับ ร้อยละ 100 ที่อัตราการฟั่นไอโซน 1,500 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.58 เมตรต่อวินาที (ชุดการทดลองที่ 10)

สำหรับการบำบัดที่อัตราการฟั่นไอโซน 1,500 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.12 เมตรต่อวินาที (ชุดการทดลองที่ 9) ไม่มีข้อมูลการบำบัดเนื่องจากเมื่อเริ่มเปิดเครื่องบำบัดก๊าซพิษ สังเกตได้ว่ามีกลิ่นฉุนของไอโซนตั้งแต่เริ่มการบำบัดในห้องปฏิบัติการ ทำให้ผู้วิจัยจำเป็นต้องหยุดการบำบัดสำหรับกรณีนี้ เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพและการฝึกปฏิบัติการของนักศึกษาและบุคลากรในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสาเหตุที่มี

กลิ่นของโอโซนอาจเป็นผลเนื่องมาจากที่ความเร็วพัดลม 1.12 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำทำให้มีปริมาณของอากาศปนเปื้อนที่ถูกดูดเข้ามาในเครื่องบำบัดน้อย เมื่อใช้อัตราการฟั่นโอโซน 1,500 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงจึงทำให้มีปริมาณโอโซนมากเกินไปในการทำปฏิกิริยากับก๊าซฟอสฟอรัสไดออกไซด์ที่ถูกดูดเข้ามาในเครื่องบำบัด ทำให้มีโอโซนเหลือตกค้างจากการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้มีกลิ่นของโอโซนในห้องปฏิบัติการสำหรับการบำบัดในชุดทดลองนี้ ผลการบำบัดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 พบว่าค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 100 ที่อัตราการฟั่นโอโซน 1,500 มิลลิกรัม

ต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.58 เมตรต่อวินาที (ชุดการทดลองที่ 10) สำหรับการบำบัดในชุดการทดลองที่ 1, 4 และ 9 ที่ความเร็วพัดลมดูดอากาศเท่ากับ 1.12 เมตรต่อวินาที ไม่สามารถทำการบำบัดได้ ที่ทุกอัตราการฟั่นโอโซน เนื่องด้วยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอสฟอรัสไดออกไซด์ในห้องปฏิบัติการมีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสไดออกไซด์ที่ถูกดูดเข้ามาบำบัดน้อย จึงส่งผลให้มีปริมาณโอโซนส่วนเกินในชุดการทดลองดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงต้องยุติการบำบัดเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นได้ ด้วยเหตุผลดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ จึงทำให้ไม่มีผลในการบำบัด

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอสฟอรัสไดออกไซด์สำหรับกรณีศึกษาที่ 1

ชุดทดลอง.	อัตราการฟั่นโอโซน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	ความเร็วพัดลมดูดอากาศ (เมตรต่อวินาที)	ความเข้มข้น. (พีพีเอ็ม)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
			C_o	C_e	
1	700	1.12	4.10 ± 0.141	0.39 ± 0.057	90.46 ± 1.709
2	700	1.58	3.13 ± 0.021	0.36 ± 0.000	88.48 ± 0.078
3	700	2.04	3.07 ± 0.042	0.68 ± 0.000	77.85 ± 0.306
4	1,100	1.12	5.35 ± 0.175	0.08 ± 0.057	98.33 ± 0.782
5	1,100	1.58	3.02 ± 0.028	0.06 ± 0.000	98.01 ± 0.019
6	1,100	1.58	3.07 ± 0.042	0.11 ± 0.000	96.42 ± 0.049
7	1,100	1.58	3.07 ± 0.058	0.11 ± 0.006	96.30 ± 0.163
8	1,100	2.04	3.55 ± 0.188	0.05 ± 0.006	98.50 ± 0.081
9	1,500	1.12	NA	NA	NA
10	1,500	1.58	3.44 ± 0.021	0.00 ± 0.000	100.00 ± 0.000
11	1,500	2.04	2.52 ± 0.014	0.05 ± 0.014	98.01 ± 0.572

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอสฟอรัสไดออกไซด์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2

ชุดทดลอง.	อัตราการฟั่นโอโซน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	ความเร็วพัดลมดูดอากาศ (เมตรต่อวินาที)	ความเข้มข้น. (พีพีเอ็ม)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
			C_o	C_e	
1	700	1.12	NA	NA	NA
2	700	1.58	1.44 ± 0.021	0.18 ± 0.007	87.81 ± 0.313

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 (ต่อ)

ชุดทดลอง.	อัตราการพ่นโอโซน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	ความเร็วพัดลมดูดอากาศ (เมตรต่อวินาที)	ความเข้มข้น. (พีพีเอ็ม)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
			C_o	C_e	
3	700	2.04	1.32 ± 0.040	0.49 ± 0.015	62.55 ± 0.067
4	1,100	1.12	NA	NA	NA
5	1,100	1.58	1.33 ± 0.071	0.03 ± 0.000	97.74 ± 0.120
6	1,100	1.58	1.35 ± 0.049	0.03 ± 0.000	97.77 ± 0.082
7	1,100	1.58	1.30 ± 0.021	0.03 ± 0.000	97.69 ± 0.038
8	1,100	2.04	1.84 ± 0.028	0.14 ± 0.000	92.39 ± 0.117
9	1,500	1.12	NA	NA	NA
10	1,500	1.58	1.44 ± 0.021	0.02 ± 0.000	100.00 ± 0.000
11	1,500	2.04	1.37 ± 0.021	0.05 ± 0.000	98.61 ± 0.021

3.3 ผลการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์และสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ โดยใช้โปรแกรม RSM

ตารางที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ที่ได้จากการทดลองสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 กับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้โปรแกรม Design-Expert 13 (Trial version) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากโปรแกรม RSM เพื่อใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยโอโซนแสดงดังสมการที่ (6) ซึ่งมีรูปแบบสมการเป็นแบบโมเดล Quadratic โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) พบว่า ค่า P ของโมเดลมีค่าเท่ากับ 0.0084 แสดงว่าโมเดลมีนัยสำคัญ ค่า lack of fit ของโมเดลมีค่า 0.0769 แสดงว่าไม่มีนัยสำคัญ และค่า P ของตัวแปร D (Ozone dosage rate) และ D^2 มีค่าเท่ากับ 0.0014 และ 0.0329 แสดงว่าอัตราการพ่น โอโซน มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P มีค่าน้อยกว่า 0.05 ส่วนค่า P ของเทอมอื่นๆ ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้มีค่ามากกว่า 0.05 ทุกเทอม แสดงว่าไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัด

$$\begin{aligned}
 R.E. = & 67.35725 + 0.061231 \times D \\
 & - 10.83943 \times v \\
 & + 0.014429 \times D \times v \\
 & - 0.000030 \times D^2 \\
 & - 3.24719 \times v^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้ สามารถนำไปวิเคราะห์ Optimization จากโปรแกรม RSM โดยสร้างกราฟเส้นระดับและกราฟสามมิติซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการบำบัดและผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 (ดังรูปที่ 3) จากรูปจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการพ่นโอโซน แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความเร็วพัดลมดูดอากาศเพิ่มขึ้น

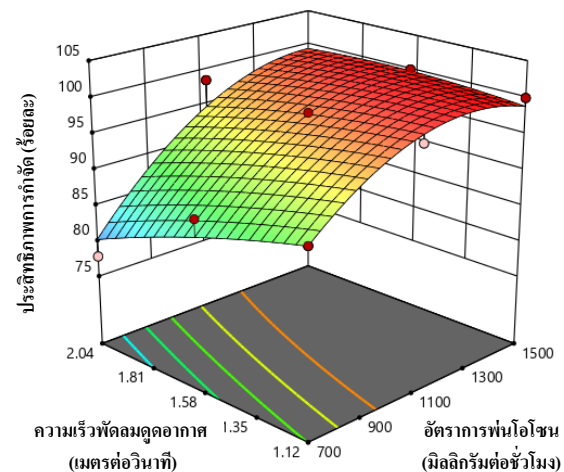
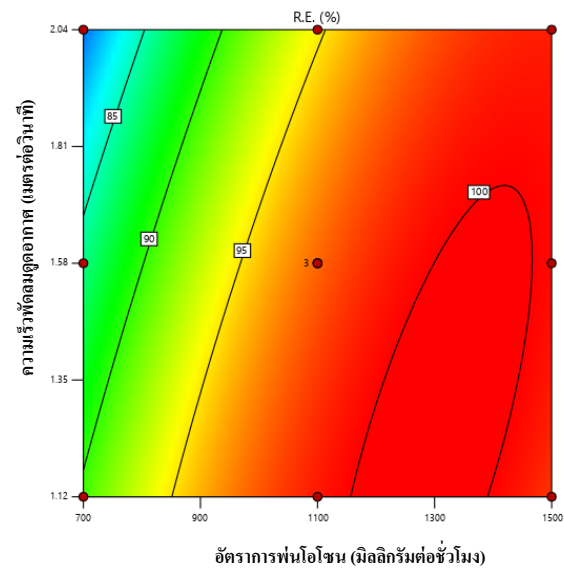
การหาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษดันแบบ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 โดยใช้โปรแกรม Expert Design 13 (Trial version) โดยกำหนดให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ต้องการมีค่าเท่ากับร้อยละ 100 ผลจากการทำนาย พบว่าสถานะการบำบัดที่เหมาะสมที่โปรแกรมแนะนำคือที่อัตราการพ่น โอโซน 1,210 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.24 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวใช้อัตราการพ่นโอโซนที่ไม่สูงเกินไปทำให้ลดค่าใช้จ่ายใน

การผลิตโอโซนจากออกซิเจนบริสุทธิ์และไม่มีโอโซนเหลือตกค้างจนก่อให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ห้องปฏิบัติการ

เมื่อได้แบบจำลองคณิตศาสตร์จาก โปรแกรม RSM แล้ว ต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้ (Model validation) โดยใช้สมการที่ (6) ไปทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 เทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง (แสดงดังตารางที่ 5) โดยตัดชุดการทดลองที่ไม่มีผลการบำบัดออก (ชุดที่ 1, 4 และ 9) ผลจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ พบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ยกเว้นในชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ผลจากการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้(สมการที่ (6)) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้สามารถใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการกำจัดได้ทั้งสองกรณีศึกษา

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดจากการทดลองและการทำนายจาก โปรแกรม RSM

ชุดการทดลอง	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	90.46 ± 1.709	90.43
2	88.48 ± 0.078	86.05
3	77.85 ± 0.306	80.31
4	98.33 ± 0.782	99.50
5	98.01 ± 0.019	97.79
6	96.42 ± 0.049	97.79
7	96.30 ± 0.163	97.79
8	98.50 ± 0.081	94.69
9	NA	98.86
10	100.00 ± 0.000	99.79
11	98.01 ± 0.572	99.36



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการบำบัดและผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (กรณีศึกษาที่ 1)

ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ (เปรียบเทียบกับการทดลองจากการกรณีศึกษาที่ 2)

ชุดการทดลอง.	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	
	การทดลอง	แบบจำลองคณิตศาสตร์
2	87.81 ± 0.313	86.24
3	62.55 ± 0.067	80.50
5	97.74 ± 0.120	98.26
6	97.77 ± 0.082	98.26

ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ (เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากกรณีศึกษาที่ 2) (ต่อ)

ชุดการทดลอง.	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	
	การทดลอง	แบบจำลองคณิตศาสตร์
7	97.69±0.038	98.26
8	92.39±0.117	95.16
10	100.00±0.000	100.67
11	98.61±0.021	100.23

4. อภิปรายผลและสรุป

4.1 อภิปรายผล

ผลการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในอากาศในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบซึ่งใช้กระบวนการโอโซนเนชั่น พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงมากกว่า ร้อยละ 85 ที่ระยะเวลาในการบำบัด 2 ชั่วโมง ยกเว้นชุดการทดลองที่ 3 ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่า ร้อยละ 85 สำหรับทั้งสองกรณีศึกษา ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. [11] ซึ่งศึกษาการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในระดับห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้โอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MnO}_x/\text{TiO}_2$ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดได้สูงถึง ร้อยละ 100 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheng et al. [12] ซึ่งได้ศึกษาการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน Nano-TiO_2 (Fe/TiO_2) ร่วมกับโอโซนเนชั่น พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 95 ที่ระยะเวลาในการบำบัด 1 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์จากงานวิจัยดังกล่าวต้องใช้กระบวนการผสมทั้งโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันร่วมกับโอโซนเนชั่นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการบำบัดที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Wilamat et al. [13] ซึ่งได้ศึกษาประสิทธิภาพการ

กำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag/TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้รังสียูวีซี (254 นาโนเมตร) และหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสง 1,030 ลูเมน) 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด เป็นแหล่งพลังงานการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา จากผลการศึกษาการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ ร้อยละ 37.93 ± 4.52 และ ร้อยละ 5.93 ± 4.13 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในอากาศโดยการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้แผ่นลวดไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ เท่ากับ ร้อยละ 61.03 ± 5.39 และ ร้อยละ 27.20 ± 1.81 ตามลำดับ ส่วนการบำบัดโดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ ร้อยละ 66.43 ± 3.29 และ ร้อยละ 68.33 ± 1.15 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่างานวิจัยนี้ค่อนข้างมาก และจากงานวิจัยของ Liang et al. [14] ซึ่งทำการศึกษการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ TiO_2/UV , $\text{Ag/TiO}_2/\text{UV}$ and $\text{Ce/TiO}_2/\text{UV}$ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ ร้อยละ 95 ที่ระยะเวลาในการบำบัด 8 ชั่วโมง ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้แต่ใช้เวลาในการบำบัดนานกว่า

4.2 สรุป

การบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบโดยใช้กระบวนการโอโซนเนชั่น ในขณะที่มีการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงมากกว่า ร้อยละ 85 สำหรับที่สภาวะความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในช่วง 5.50–1.10 พีพีเอ็ม ดังนั้นเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการที่มีการเรียนการสอนในลักษณะคล้ายกัน และจากการศึกษาสภาวะการบำบัดที่เหมาะสมที่สุดด้วย

วิธีการ RSM โดยใช้โมเดลส่วนประสมกลาง ผลจากการทำนายพบว่าสภาวะการบำบัดที่เหมาะสมที่โมเดลแนะนำคือที่อัตราการฟันทไอโซน 1,210 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.24 เมตรต่อวินาที

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณวิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์คณะผู้วิจัยในการเข้าไปใช้สถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณ สำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนเงินงบประมาณในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] The United States Environmental Protection Agency (US.EPA.). "Facts About Formaldehyde." epa.gov. <https://www.epa.gov/formaldehyde/facts-about-formaldehyde#whatisformaldehyde>. (accessed: Jul 5, 2021)
- [2] S. Dangruang, "The study of health impact assessment of workers from formaldehyde exposure, melamine faced board processing industry case study," Master dissertation, Dept. Envi. Sci., Silpakorn Univ., Bangkok, Thailand, 2011.
- [3] Occupational Safety and Health Administration (OSHA.). "OSHA Fact Sheet, Formaldehyde." odu.edu <https://www.odu.edu/content/dam/odu/offices/environmental-health-safety/docs/formaldehyde.pdf>. (accessed: Jun 29, 2021)
- [4] C. H. Tseng, C. D. Hsieh and S. S. Chen, "The Removal of Indoor Formaldehyde by Various Air Cleaners," in *Proc. the 98th A&WMA Annual Conf.* Minneapolis, MN, USA, June 21–24, 2005, pp. 457–469.
- [5] W. Dechapanya, W. and S. Nontula, "Treatment of Gaseous Formaldehyde with Continuous Source in a Closed Modeling Room Using Ozonation," *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 31, no. 1, p. 37–43, 2017.
- [6] F. Wang, H. Sun, J. Sun, X. Jia, Y. Zhang, Y. Tang, X. Pan, Z. Su, L. Hao and R. Wang, "Mechanistic and Kinetic Study of $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_3$ Reaction," *The Journal of Physical Chem. A*, vol. 114, no. 10, p. 3516–3522, 2010, doi: 10.1021/jp910754b.
- [7] J. W. Li, K. L. Pan, S. J. Yu, S. Y. Yan and M. B. Chang, "Removal of Formaldehyde over $\text{Mn}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_2$ Catalysts: Thermal Catalytic Oxidation versus Ozone Catalytic Oxidation," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 26, no. 12, p. 2546–2553, 2014, doi: 10.1016/j.jes.2014.05.030.
- [8] C. J. Weschler, "Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry," *Indoor Air*, vol. 10, p. 269–288, 2000, doi: 10.1034/j.1600-0668.2000.010004269.x
- [9] W. Dechapanya, W. S. Nontula and Phudthabun, S. "Design and Creation of Prototype Reactor for Treatment of Formaldehyde in a Gross Anatomy Laboratory," in *Proc. the 19th National Environmental Conf.* Chiang Rai, Thailand, October 7–9, 2020, pp. 328–335.
- [10] A. Chanpirak, P. Dumnin and A. Hongpuay, "Optimization of Oil Extraction from Spent Coffee Grounds (*Coffea canephora* var. *robusta*/Coffea Arabica) by Hexane Using Response Surface Methodology," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 4, p. 799–811, 2018.
- [11] M. Kim, E. Park and J. Jurng, "Oxidation of Gaseous Formaldehyde with Ozone over $\text{MnO}_x/\text{TiO}_2$ catalysts at Room Temperature (25°C)," *Powder Technology*, vol. 325, p. 368–372, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2017.10.031.
- [12] S. W. Cheng, Y. H. Li, C. S. Yuan, P. Y. Tsai, H. Z. Shen and C. H. Hung, "An Innovative Advanced Oxidation Technology for Effective Decomposition of Formaldehyde by Combining Iron Modified Nano- TiO_2 (Fe/TiO_2) Photocatalytic Degradation with Ozone

- Oxidation.” *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 18, p. 3220–3233, 2018, doi: 10.4209/aaqr.2018.05.0156.
- [13] J. Wilamat, N. Bunchudam, and A. Jaicoey, “Removal of Formaldehyde in Air using Silver-Doped TiO₂ Coated on Stainless Steel Wire under Fluorescent Light,” A Special Project, Faculty of Science, KMITL, Bangkok, Thailand, 2017.
- [14] W. Liang, J. Li and Y. Jin, “Photo-catalytic Degradation of Gaseous Formaldehyde by TiO₂/UV, Ag/TiO₂/UV and Ce/TiO₂/UV.” *Building and Environment*, vol. 51, p. 345–350, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.12.007.

สภาวะที่เหมาะสมต่อความขรุขระผิวในการกัดข้างของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีน
ความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

**Optimal Condition on Surface Roughness in Side Milling of High Density
Polyethylene and Rubberwood Flour Composites using Response Surface Methodology**

ชัยณรงค์ ศรีวัชรบุตร^{1,*}, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2}, ชาตรี หอมเขียว^{1,2} และ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล¹

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บ่อหยาง เมือง สงขลา 90000

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บ่อหยาง เมือง สงขลา 90000

Chainarong Srivabutr^{1,*}, Surasit Rawangwong^{1,2}, Chatree Homkhiew^{1,2} and Julaluk Rodjananugoon¹

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

Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

² Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Srivijaya Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

***Corresponding Author E-mail:** chainarong.s@rmutsv.ac.th

Received: Sep 24, 2021; **Revised:** Dec 06, 2021; **Accepted:** Dec 28, 2021

บทคัดย่อ

การพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพารา ถูกออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์เคนและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด จากการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักทั้ง 3 อย่าง มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุ ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างวัสดุเชิงประกอบ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที อัตราป้อน 315 มิลลิเมตร/นาที และความลึกในการตัด 1.0 มิลลิเมตร ได้ค่าความขรุขระผิว เท่ากับ 2.865 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ เท่ากับ 100% นอกจากนี้ เพื่อยืนยันผลการทดลองและเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการถดถอย เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองมีค่าผิดพลาดเฉลี่ย เท่ากับ 1.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

คำสำคัญ: เครื่องกัด, วัสดุเชิงประกอบ, ความขรุขระผิว, บล็อก-เบห์เคน, วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง

Abstract

Surface roughness prediction in side milling of high density polyethylene and rubberwood flour composites was designed by Box-Behnken and analyzed using Response Surface Methodology. Factors in this study are speed, feed rate, and depth of cut. From the experiment, it was found that all of the factors affected on the surface roughness properties. The

result of optimal condition analysis with the factors on side milling of composites found that the optimal condition was 1,000 rpm speed, 315 mm/min feed rate, and 1.0 mm depth of cut. This condition generates the surface roughness of 2.865 μm with desirability score 100%. Additionally, the real test value and the predicted response were compared to verify the accuracy of the mathematical model of the regression model. The result shows that the bias of those methods is 1.95% in which is within acceptable criteria. It was found that the optimal condition in side milling of composites obtained from the mathematical model were reliable. It is optimal for use in predicting surface roughness in composites.

Keywords: Milling, Composite Materials, Surface Roughness, Box–Behnken, Response Surface Methodology

1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีแนวโน้มในการประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อทดแทนไม้ในธรรมชาติ เนื่องจากปัจจุบันมีการตัดไม้จำนวนมากเพื่อตอบสนองต่อความต้องการทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และเชิงพาณิชย์ ทำให้ไม้มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไป WPCs มีการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ด้านการก่อสร้าง การทำเฟอร์นิเจอร์ ของเล่นเด็กและผู้สูงอายุ และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น [1],[2] นอกจากนี้ ข้อดีของการใช้งาน WPCs คือ ราคาถูก ขึ้นรูปได้ง่าย มีความคงทน ต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือผลิตภัณฑ์สีเขียว เป็นต้น [3],[4]

ผลิตภัณฑ์ WPCs ประกอบด้วยวัสดุหลักอย่างน้อย 2 ชนิด ได้แก่ พลาสติกหรือพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นเนื้อหลักใน WPCs เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และไม้หรือเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอนุภาคเล็กๆ และกระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักเหล่านั้น เรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) [5],[6] นอกจากนี้ กระบวนการผลิต WPCs สามารถใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในกระบวนการผลิต WPCs โดยข้อดีของการเติมสารเติมแต่ง คือ เพิ่มสมบัติเชิงกล กายภาพ และความร้อน ให้ดียิ่งขึ้น อาทิเช่น โลหะ เซรามิก และวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น [7]

กระบวนการขึ้นรูป WPCs สามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น การฉีด (Injection) การอัดรีด (Extrusion) และการกดอัดในแม่พิมพ์ (Compression) [4] นอกจากนี้ การแปรรูป WPCs เพื่อให้ได้รูปทรงตามความต้องการของผู้ผลิตและนำไปใช้งานได้เหมาะสมสามารถทำได้โดย

กระบวนการกลึง การตัด และการกัด เป็นต้น การกัด (Milling) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น โลหะ ไม้ พลาสติก และวัสดุผสม ซึ่งมีความแม่นยำเที่ยงตรงสูงด้วยการเคลื่อนที่ของใบมีดในทิศทางที่กำหนดให้ชิ้นงานมีรูปทรงที่เป็นไปตามความต้องการของการผลิตและขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี เช่น กัดปาดผิวด้านบนชิ้นงาน กัดผิวหน้าขนาน กัดผิวข้างเรียบ เป็นต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการกัดคือ ความเร็วรอบตัด อัตราป้อน ความลึก ขนาดดอกกัด จำนวนคมตัด และชนิดวัสดุที่นำมากัด [6]

พลาสติกหรือพอลิเมอร์ โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ เทอร์โมเซต (Thermoset) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่งพลาสติกที่ได้รับความสนใจและมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมคือ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride; PVC) และพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่น คือ ทนความร้อนสูงและมีความหนาแน่นต่ำ สามารถนำไปขึ้นรูปและใช้งานในลักษณะต่างๆ ได้ เช่น บรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ และชิ้นส่วนรถยนต์ [8],[9] วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ที่นำมาใช้ในการผสมกับพลาสติก คือ ฝงไม้หรือเส้นใยธรรมชาติ เช่น ไม้ยางพารา ปาล์ม ข้าวโพด ฟางข้าว และขุยมะพร้าว จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เช่น การทำเฟอร์นิเจอร์ วัสดุโครงสร้าง และการใช้งานด้านอื่นๆ ส่งผลทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตนั้นมีจำนวนเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งของเสียเหล่านี้เป็นส่วนผสมหลักในการผลิต WPCs เป็น

การลดของเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม ลดการเผาไหม้ขยะในสังคม และสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่องค์กร [10],[11]

เนื่องจากเป้าหมายของงานวิจัยนี้เป็นการขึ้นรูป WPCs โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตสู่การนำใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขสถานที่ร่มโล่งแจ้ง หรือสัมผัสกับความชื้นสูง ทำให้มีข้อจำกัดต่อการใช้งานและเงื่อนไขหลักที่มีผลต่อ WPCs คือ อุณหภูมิ ความชื้น และเวลาการใช้งาน ส่งผลให้ WPCs มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ชีวภาพ และเคมี [12] จากที่กล่าวข้างต้น WPCs มีแนวโน้มของการประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และในการประยุกต์ใช้งานมีความจำเป็นต้องแปรรูป WPCs เป็นรูปร่างต่างๆ ทำให้การกระบวนการกัดข้างเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจมาใช้ในการแปรรูปวัสดุชนิดนี้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผลสำเร็จของ WPCs มีคุณภาพหรือมีความขรุขระน้อยที่สุด การศึกษาผลกระทบของปัจจัยการกัดข้างที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณา การกัดที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่สำคัญ ดังนั้น ในบทความวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างของ WPCs เนื่องจาก กระบวนการกัดเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตที่สำคัญในการแปรรูปวัสดุที่นิยมใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น โครงสร้าง เฟอร์นิเจอร์ และของเล่นเด็ก เป็นต้น นอกจากนี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

2. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบค่าความขรุขระผิว คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE) เกรด V1160 ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) ในวัสดุผสม ผลิตโดยบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ผงไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้กับพลาสติก และสารคู่ควบ (Coupling Agent) ที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์และผงไม้ในงานวิจัยนี้ คือ มาเลอิก

แอนไฮไดรด์กราฟฟอเลทิลีน (Maleic Anhydride-Grafted Polyethylene; MAPE) ก่อนการผสมเม็ดพลาสติก HDPE ถูกนำไปอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อเตรียมการผสม และผงไม้ยางพาราถูกนำไปร่อนเพื่อคัดแยกขนาดผ่านตะแกรงขนาด 80 Mesh (<180 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชม.

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องกัดกึ่งอัตโนมัติ ยี่ห้อ Full Mark รุ่น FM-18S จากบริษัท เทค เอ็นซี จำกัด (กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย) ช่วงของความเร็วยรอบ 45–2,000 รอบ/นาที ช่วงของอัตราป้อนตามขั้นของเฟืองทดได้ใช้งาน 14–900 มม./นาที

2) เครื่องมือตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นดอกเอ็นมิล (End Mill) แบบ 2 คมตัด ยี่ห้อ S.A.P. จากบริษัท Supermill LLC. (Berlin, CT, USA) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. โดยมี Helix Angle คือ 30 องศา ค่า Corner Radius คือ 5 มม. และค่า Overall Length คือ 100 มม. ตามลำดับ

3) เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อมิคูโตโย รุ่น SJ-210 (มิคูโตโย จำกัด กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย)

4) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และผงไม้ยางพารา ขนาด 100 มม. × 100 มม. แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงานตัวอย่างในการทดสอบความขรุขระผิว

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบการทดลองด้วยวิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) และทำการวิเคราะห์เพื่อ

พยากรณ์สภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยใช้สูตรการผสมที่ดีที่สุดจากการทดลองก่อนหน้านี้ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (66.0 wt%) พงไม้ยางพารา (30.0 wt%) และสารควบคู่ (4.0 wt%) [13] โดยการออกแบบการทดลองที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดไว้ โดยแต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Design-Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA) ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกัดวัสดุและการทดลองเบื้องต้นเพื่อให้ได้ถึงตัวแปรต่างๆ และระดับของแต่ละปัจจัยการทดลองที่เหมาะสม ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 1 ผลตอบสนองของการทดลอง คือ ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness; Ra)

ตารางที่ 1 การกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง

Factors	(-1)	(0)	(+1)
Speed (X_1) (rpm)	500	710	1,000
Feed Rate (X_2) (mm/min)	315	450	630
Depth of Cut (X_3) (mm)	0.5	1.0	1.5

3.2 การวัดค่าความขรุขระผิว

เมื่อทำการกัดชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองซึ่งมีทั้งหมด 17 สภาวะการทดลอง (Run) เรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการถอดชิ้นงานออกมาเพื่อวัดหาค่าเฉลี่ยของความขรุขระผิว (Average Roughness; Ra) โดยทำการวัดบนผิวชิ้นงานตัวอย่าง WPCs สำหรับการทดลองนี้จะทำการวัดความขรุขระผิวด้านข้างเป็นระยะทาง 10 มม. โดยกำหนดจุดวัดที่ระยะห่างจากขอบของชิ้นงาน 20 50 และ 80 มม. และมีค่า Cut-off Length คือ 0.8 มม. ตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานพอดี ใช้เครื่องวัดความขรุขระผิวโดยทำการวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกัดโดยใน

แต่ละค่าของสภาวะการกัดจะวัด 3 ครั้ง (3 ซ้ำ) ของแต่ละการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของค่า Ra และเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกัดข้าง WPCs

3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เพื่อหาสภาวะของการทดลองและนำไปสู่การวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการทางสถิติ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลอง การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง และนำค่าการตอบสนองไปวิเคราะห์ด้วยแบบสมการถดถอย (Regression Model) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบสมการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการพยากรณ์ และผลจากการวัดค่าจริงของ WPCs

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน และการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวโดยใช้โปรแกรม Design-Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) เพื่อกำหนดลำดับการทดลอง โดยมี 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ มีการวิเคราะห์ผลดังนี้

4.1 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทาง

สถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

จากผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว โดยพิจารณาจากค่า Sequential Model Sum of Squares มีนัยสำคัญ Adjusted Coefficient of Determination (Adj-R^2) และ Predicted Coefficient of Determination (Pred-R^2) มีค่าสูง และค่า Lack- of-Fit ไม่มีนัยสำคัญ [14],[15] ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่า Ra มีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองเชิงเส้น ไค้หรือรูปแบบกำลังสอง (Quadratic Model) ซึ่งมีค่า

Adj-R² และ Pred-R² เท่ากับ 99.86% และ 99.63% ตามลำดับ โดยมีค่าใกล้เคียงกันและมากกว่ารูปแบบอื่นๆ และมีค่า *P-value* ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.6775 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ($P > 0.05$) ซึ่งหมายความว่า รูปแบบจำลอง

สมการถดถอยมีความสมรूपกับข้อมูล ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า รูปแบบเชิงเส้นโค้งหรือรูปแบบกำลังสองมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของ WPCs

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองและค่าการตอบสนองของแต่ละสภาวะการทดลอง

Run	Factors			Surface Roughness			Average
	Speed	Feed Rate	Depth of Cut	Test 1	Test 2	Test 3	Ra (μm)
	(rpm)	(mm/min)	(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	
1	1,000	450	1.5	3.414	3.483	3.408	3.435
2	500	450	1.5	3.822	4.110	4.167	4.033
3	710	630	0.5	2.984	3.527	3.223	3.245
4	500	630	1.0	3.497	4.170	3.537	3.734
5	710	315	0.5	3.171	2.956	2.927	3.018
6	710	450	1.0	3.393	3.418	3.403	3.405
7	710	450	1.0	3.468	3.451	3.411	3.443
8	1,000	315	1.0	2.831	2.915	2.858	2.868
9	710	450	1.0	3.441	3.404	3.395	3.413
10	500	450	0.5	3.394	3.237	3.461	3.364
11	710	450	1.0	3.316	3.423	3.499	3.412
12	710	315	1.5	3.734	3.429	3.491	3.551
13	710	450	1.0	3.582	3.262	3.457	3.434
14	1,000	450	0.5	2.932	2.927	2.758	2.872
15	1,000	630	1.0	3.438	3.372	3.733	3.515
16	500	315	1.0	3.731	3.460	3.643	3.611
17	710	630	1.5	4.100	3.770	4.096	3.988

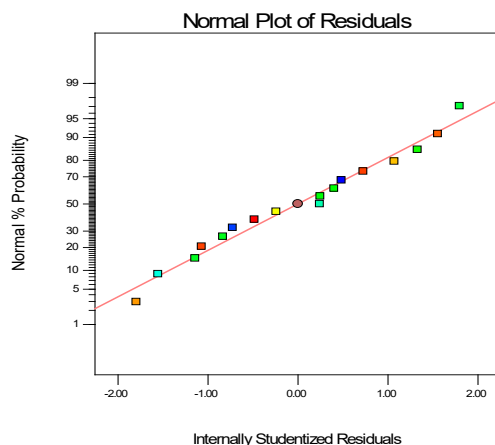
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดข้างของ WPCs

Source	Sequential P-value	Lack of Fit P-value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
Linear	< 0.0001	0.0007	0.9283	0.8769	
2FI	< 0.0001	0.0539	0.9933	0.9841	
Quadratic	0.0024	0.6775	0.9986	0.9963	Suggested
Cubic	0.6775	-	0.9983	-	Aliased

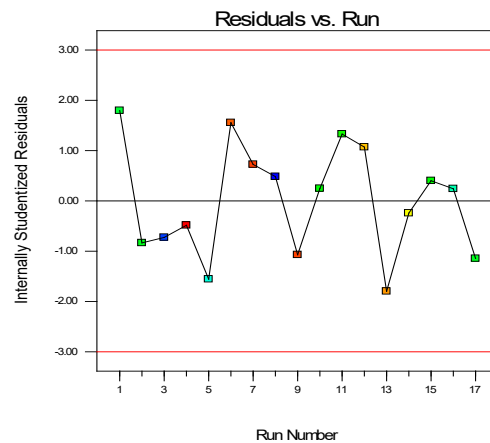
4.2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง

การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของรูปแบบจำลองเพื่อยืนยันความเพียงพอและความน่าเชื่อถือของรูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับจากการทดลอง จาก **รูปที่ 2(ก)** แสดงกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability) พบว่า ไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟทดลองจนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรงหรือแสดงเป็นเส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ **รูปที่ 2(ข)** แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง พบว่า ค่าเศษเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ทดลองจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ **รูป**

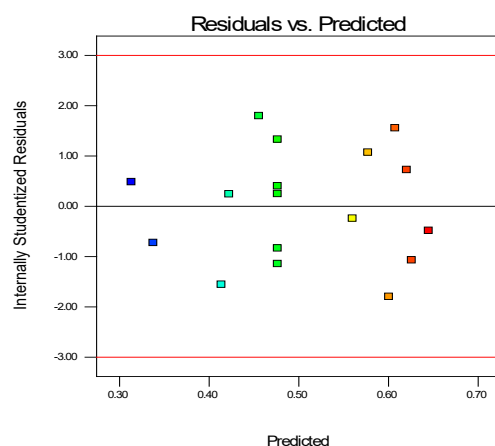
ที่ 2(ค) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อค่าพยากรณ์ พบว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวที่ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอนเช่นเดียวกันค่าเศษเหลือมีการกระจายรอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระและ **รูปที่ 2(ง)** แสดงกราฟค่าพยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริงเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการพยากรณ์โดยรูปแบบจำลองการถดถอยและการทดลองจริง พบว่า ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นการยืนยันว่ารูปแบบจำลองการถดถอยเหล่านี้สามารถพยากรณ์ค่าจากการทดลองได้อย่างแม่นยำดังนั้นจากการวิเคราะห์กราฟทั้ง 4 และข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและมีความพอเพียง



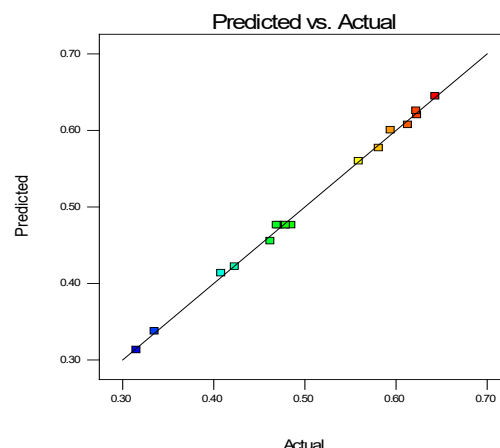
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอยของค่าความขรุขระผิว (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ(ข) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (ค) กราฟค่าเศษเหลือต่อค่าที่พยากรณ์ และ (ง) กราฟค่าพยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริง

4.3 สมการถดถอย การวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลการตอบสนองของค่าความขรุขระผิว

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและรูปแบบการทดลองการถดถอย พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยการยืนยันจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และสามารถนำข้อมูลการทดลองผลการวัดค่าความขรุขระผิวมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยทั้งหมดเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อความขรุขระผิวของ WPCs โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) และกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert Design-Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc) แสดงดังตารางที่ 4 จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความขรุขระผิวมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้งหรือกำลัง 2 (Quadratic Model) จะเห็นได้ว่า รูปแบบจำลองนั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัดที่ทำการทดลองมีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs เนื่องจาก มีค่า P -Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ($P < 0.05$) นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์สมการถดถอยสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวและทำการลดรูปแบบจำลอง (Reduced Model) ของการทดลอง แสดงดังตารางที่ 5 โดยทั่วไป การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยจากการลดรูปแบบจำลองนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลจากการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่ไม่มีผลต่อการทดลอง คือ สมการกำลัง 2 ของทั้ง 3 ปัจจัยประกอบด้วย ความเร็วรอบ (X_1^2) อัตราป้อน (X_2^2) และความลึกในการตัด (X_3^2) เนื่องจาก มีค่า P -Value มากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ($P > 0.05$) แสดงดังตารางที่ 5 ตามลำดับ

นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของความลึกในการตัด (X_3) ของการทดลองมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วนรอบ (X_1) และอัตราป้อน (X_2) สามารถสรุปได้ว่า ความลึกในการตัดมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs อย่างชัดเจน ซึ่งการลดรูปสมการถดถอยของผลการทดลอง ดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} Ra = & 4.37157 - (2.38600 \times 10^{-3}) X_1 \\ & - (2.02381 \times 10^{-3}) X_2 + (0.4710) X_3 \\ & + (3.32698 \times 10^{-6}) X_1 X_2 \\ & - (2.12000 \times 10^{-4}) X_1 X_3 \\ & - (6.66667 \times 10^{-4}) X_2 X_3 \end{aligned} \quad (1)$$

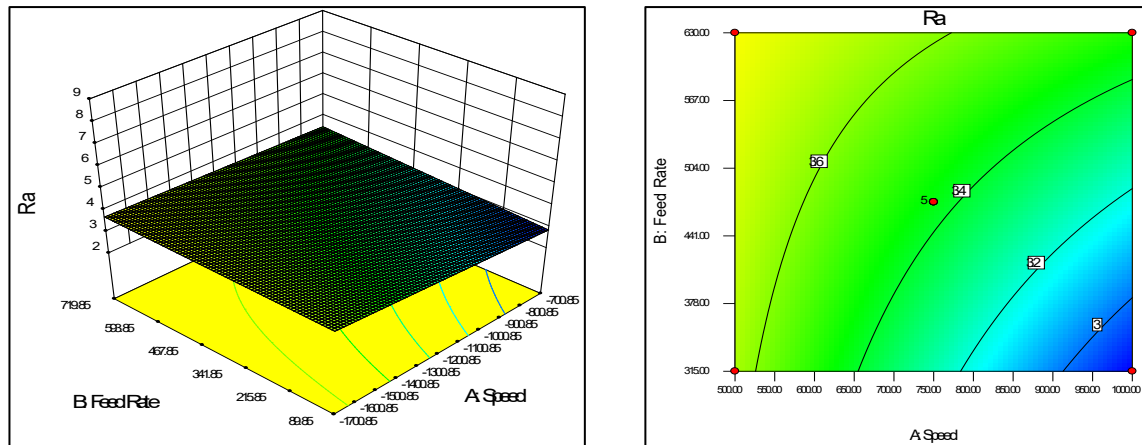
นอกจากสถานะของการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดข้าง WPCs ซึ่งเกิดจากปัจจัย 3 ชนิด คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) แล้ว การเปลี่ยนแปลงของค่าความขรุขระผิวในการกัดข้าง WPCs อาจเกิดจากปัจจัยส่วนผสมของ WPCs เช่น ปริมาณพลาสติก ยาง และเส้นใยหรือขนาดอนุภาคของเส้นใยในการผสม [14],[16] เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเกิดจากสารเสริมแรง (Reinforcement) ที่มีอนุภาคที่ใหญ่กว่าวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) นอกจากนี้ ผลการทดลองสามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3-5 ตามลำดับ กล่าวคือ จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ถ้าใช้ความเร็วรอบน้อยลงและใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมีค่ามากขึ้น และถ้าใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและอัตราป้อนน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ถ้าใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้นและใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น และถ้าใช้ความลึกในการตัดน้อยลงและอัตราป้อนน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง และจากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ถ้าใช้ความเร็วรอบน้อยลงและใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น และถ้าใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและใช้ความลึกในการตัดน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ตามลำดับ

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองต่อค่าความขรุขระผิว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
					Prob > F	
Model	1.68	9	0.19	1287.48	<0.0001	significant
X_1 -Cutting Speed	0.49	1	0.49	3391.19	<0.0001	
X_2 -Feed Rate	0.29	1	0.29	2020.37	<0.0001	
X_3 -Depth of Cut	0.78	1	0.78	5357.62	<0.0001	
$X_1 X_2$	0.077	1	0.077	530.67	<0.0001	
$X_1 X_3$	2.846×10^{-3}	1	2.846×10^{-3}	19.62	0.0030	
$X_2 X_3$	0.011	1	0.011	77.12	<0.0001	
X_1^2	4.444×10^{-3}	1	4.444×10^{-3}	7.63	0.1009	
X_2^2	4.137×10^{-4}	1	4.137×10^{-4}	2.85	0.1352	
X_3^2	1.161×10^{-3}	1	1.161×10^{-3}	8.00	0.1254	
Residual	1.016×10^{-3}	7	1.451×10^{-4}			
Lack-of-Fit	2.946×10^{-4}	3	9.819×10^{-5}	0.54	0.6775	not significant
Pure Error	7.210×10^{-4}	4	1.803×10^{-4}			
Cor Total	1.68	16				

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยจากการลดรูปแบบจำลอง (Reduced Model)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
					Prob > F	
Model	1.65	6	0.28	403.63	<0.0001	significant
X_1 -Cutting Speed	0.53	1	0.53	771.53	<0.0001	
X_2 -Feed Rate	0.26	1	0.26	376.79	<0.0001	
X_3 -Depth of Cut	0.79	1	0.79	1152.54	<0.0001	
$X_1 X_2$	0.069	1	0.069	100.62	<0.0001	
$X_1 X_3$	2.809×10^{-3}	1	2.809×10^{-3}	4.12	0.0699	
$X_2 X_3$	0.011	1	0.011	16.16	0.1204	
Residual	6.822×10^{-3}	10	6.822×10^{-4}			
Lack-of-Fit	5.769×10^{-3}	6	9.615×10^{-4}	3.65	0.1153	not significant
Pure Error	1.053×10^{-3}	4	2.633×10^{-4}			
Cor Total	1.66	16				



ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) ได้สภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที อัตราป้อน 315 มม./ต่อนาที และความลึกในการตัด 1.0 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.865 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 100% ตามลำดับจากสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวของ WPCs ได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลของปัจจัยว่าสอดคล้องกับการทดลองที่ได้จากค่าพยากรณ์หรือไม่ โดยทำการขึ้นรูป

ชิ้นงานตัวอย่างและทดสอบค่าความขรุขระผิวจากสภาวะที่เหมาะสมของการกัดข้างจากการพยากรณ์ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 6 โดยการทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าความขรุขระผิวจากการทดลองจริงและหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างค่าจากการพยากรณ์ (Predicted) และค่าจากการทดลองจริง (Observed) [5],[17],[18] แสดงดังตารางที่ 6 โดยกำหนดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการพยากรณ์สำหรับค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5% พบว่า ค่าจริงที่ได้จากการทดลองและค่าพยากรณ์ที่ได้จากสมการถดถอยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย เท่ากับ 1.95% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



รูปที่ 6 การยืนยันผลการทดลองจากสภาวะที่เหมาะสมจากการพยากรณ์ผลตอบสนอง

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวของสภาวะที่เหมาะสมระหว่างค่าที่ได้จากการพยากรณ์และผลการทดลองจริง

Factors	X_1 (rpm)	X_2 (mm/min)	X_3 (mm)	Test 1 (μm)	Test 2 (μm)	Test 3 (μm)	Ra (μm)
Observed	1,000	315	1.0	2.775	2.876	2.781	2.810
Predicted				-	-	-	2.865

5. สรุป

การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดข้างของ WPCs โดยการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ทำการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ทำการพยากรณ์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Resonse Surface Methodology; RSM) โดยสมการการพยากรณ์เป็นฟังก์ชันของปัจจัยการกัด WPCs ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มี

อิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิว พบว่า ปัจจัยที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที อัตราป้อน 315 มม./นาที และความลึกในการตัด 1.0 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.865 ไมโครเมตร และการทดสอบสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว แสดงให้เห็นว่า สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวมีความแม่นยำและเชื่อถือได้จากผลการศึกษา สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้กับ WPCs สำหรับกระบวนการแปรรูปเพื่อใช้งานเป็นวัสดุ

ในรูปแบบต่างๆ เช่น วัสดุโครงสร้าง ของเล่นเด็กและ
ผู้สูงอายุ อุปกรณ์ตกแต่งอาคารสถานที่ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ที่สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglu, "Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber," *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 450–458, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.048.
- [2] T. Ratanawilai and K. Taneerat, "Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering," *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 349–357, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266.
- [3] S. Khamtree, T. Ratanawilai and S. Ratanawilai, "The effect of alkaline-silane treatment of rubberwood flour for water absorption and mechanical properties of plastic composites," *Journal of Thermoplastic Composites Material*, vol. 33, no. 5, pp. 599–613, 2020, doi: 10.1177/0892705718808556.
- [4] S. Tamrakar and R. A. Lopez-Anido, "Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 10, pp. 3977–3988, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.031.
- [5] C. Homkhiew, T. Ratanawilai and W. Thongruang, "The optimal formulation of recycled polypropylene/rubberwood flour composites from experiments with mixture design," *Composites Part B-Engineering*, vol. 56, pp. 350–357, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.08.041.
- [6] T. Ratanawilaia, P. Pitsuwan, S. Jirasampata and C. Homkhiew, "Influence of Milling Factors on Surface Finish of Wood-Plastic Composites," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 32, pp. 43–48, 2015.
- [7] J. Lamaming, R. Hashim, O. Sulaiman, T. Sugimoto, M. Sato and S. Hiziroglu, "Measurement of some properties of binderless particleboards made from young and old oil palm trunks," *Measurement*, vol. 47, pp. 813–819, 2014, doi: 10.1016/j.measurement.2013.10.007.
- [8] S. Rimdusit, W. Smittakorn, S. Jittarom and S. Tiptipakorn, "Highly filled polypropylene rubber wood flour composites," *Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 17–30, 2011, doi: 10.4186/ej.2011.15.2.17.
- [9] R. Z. Huang, B. J. Kim, S. Lee, Z. Yang and Q. L. Wu, "Co-extruded wood-plastic composites with talc-filled shells: morphology, mechanical, and thermal expansion performance," *BioResources*, vol. 8, no. 2, pp. 2283–2299, 2013.
- [10] T. Ratanawilai, P. Lekanukit, S. Urapantamas, "Effect of rubberwood and palm oil content on the properties of wood-polyvinyl chloride composites," *Journal of Thermoplastic Composites Material*, vol. 27, no. 6, pp. 719–730, 2014.
- [11] N. Ayilimis, U. Buyuksari and T. Dundar, "Waste pine cones as a source of reinforcing fillers for thermoplastic composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 117, no. 4, pp. 2324–2330, 2010, doi: 10.1002/app.32076.
- [12] E. O. Olakanmi, E. A. Ogunesan, E. Vunain, R. A. Lafia-Araga, M. Doyoyo and R. Meijboom, "Mechanism of Fiber/Matrix Bond and Properties of Wood Polymer Composites Produced From Alkaline-

- Treated Daniella oliveri Wood Flour,” *Journal of Polymer Composites*, vol. 37, no. 9, pp. 2657–2672, 2016, doi: 10.1002/pc.23460.
- [13] C. Homkhiew, S. Rawangwong, W. Boonchouytan and W. Thongruang, “Mechanical and physical properties of thermoplastic natural Rubber,” *SWU Engineering Journal*, vol. 13, no 1, 107–122, 2018.
- [14] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglie, “Response surface optimization and statistical analysis of composites made from calcium carbonate filler-added recycled polypropylene and rubberwood fiber,” *Journal of Thermoplastic Composites Material*, doi: 10.1177/0892705719889988.
- [15] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, "Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design," *KKU Research Journal*, vol. 19, no. 6, pp. 780–793, 2014.
- [16] N. Ayrlmis, S. Korkut, E. Tanritanir, J. E. Winandy and S. Hiziroglu, “Effect of various fire retardants on surface roughness of plywood,” *Building and Environment*, vol.41, no. 7, 887–892, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.04.011.
- [17] C. Srivabut, T. Ratanawilai, S. Hiziroglie, “Statistical modeling and response surface optimization on natural weathering of wood-plastic composites with calcium carbonate filler,” *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 23, pp. 1503–1517, 2021, doi: 10.1007/S10163-021-01230-7.
- [18] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, W. Thongruang, “Optimizing the formulation of polypropylene and rubberwood flour composites for moisture resistance by mixture design,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol 33, no. 9, pp. 810–823, 2018, doi: 10.1177/0731684413518362.

อิทธิพลของแผ่นเสริมชุดผ้าเบรกต่อการเกิดปัญหาเบรกเสียดังในรถยนต์ เอนกประสงค์ 7 ที่นั่ง

Influence of Brake pad shim on the Brake Noise for Sports Utility Vehicle (SUV) 7 Seats

อนุชาวี ขุนทิพย์ทอง^{1,*}, เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต², ชัยยงค์ เสริมผล³ และ สิริบุญรณ์ ศิริพรอัครชัย⁴

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ขามเรียง กันทรวิชัย มหาสารคาม 44150

²สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในเมือง เมือง ขอนแก่น 40002

³สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ขามเรียง กันทรวิชัย มหาสารคาม 44150

⁴สาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านน่าน

ฝ่ายแก้ว ภูเพียง น่าน 55000

Anutcharee Khunthiptong^{1,*}, Kiatfa Tangchaichit², Chaiyong Soemphol³ and Sittiboon Siripornakarachai⁴,

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University,

Khamriang, Kantarawichai, Maha Sarakham, 44150, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,

Nai-Muang, Muang, Khon Kaen, 40002, Thailand

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University,

Khamriang, Kantarawichai, Maha Sarakham, 44150, Thailand

⁴Department of Engineering and Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Nan, Fai Kaeo, Phu Pieng, Nan, 55000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: anutcharee.k@msu.ac.th

Received: Aug 17, 2021; Revised: Jan 01, 2022; Accepted: Jan 25, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาอิทธิพลของแผ่นเสริมค่าความหน่วง (Shim) ของชุดผ้าเบรกต่อการเกิดปัญหาเบรกเสียดังสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล 7 ที่นั่ง โดยมีการศึกษาปัญหาเบรกเสียดังที่ย่านความถี่สูงตั้งแต่ 4–20 kHz ที่เรียกว่า High frequency brake squeal noise ด้วยการทดสอบบนรถยนต์จริงควบคู่กับการวิเคราะห์ปัญหาโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SimXpert 2020 ด้วยเทคนิค Complex Eigenvalue Analysis (CEA) เพื่อวิเคราะห์การเกิดปัญหา Brake squeal noise อันเนื่องมาจากความไม่เสถียรภาพของระบบภายใต้อิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยแบบจำลอง 3 มิติ (3D model) อันประกอบไปด้วย จานเบรกแบบมีช่องระบายอากาศ (Brake disc vane) แผ่นผ้าเบรก (Brake pads lining) แผ่นเพลต (Brake pads plate) และแผ่นเสริม (Brake pad shim) ผลการวิเคราะห์พบว่าข้อมูลการทดสอบบนรถยนต์และการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเทคนิค CEA มีความสอดคล้องของการเกิดปัญหาเบรกเสียดังเด่นชัดที่ย่านความถี่สูงประมาณ 14.8–16.5 kHz ที่สภาวะค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกเท่ากับ 0.5 และแรงดันของผ้าเบรกต่อจานเบรกเท่ากับ 5 MPa ในการแก้ไขและหลีกเลี่ยงปัญหาเบรกเสียดังที่ย่านความถี่สูงมีหลากหลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการออกแบบโครงสร้างชิ้นส่วนของ

ระบบเบรก การเพิ่มค่าความหน่วงให้กับโครงสร้างระบบเบรกหรือชิ้นงาน การเปลี่ยนวัสดุให้กับชิ้นงาน เป็นต้น เพื่อปรับเปลี่ยนค่าความถี่ของการสั่นพ้อง (Resonance frequency) และรูปร่างการสั่นสะเทือน (Mode vibration) ที่ก่อให้เกิดความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกอื่นเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจนนำไปสู่การเกิดปัญหาเบรกเสียงดัง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นค่าความหน่วงด้วยแผ่น Shim เพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นพ้องของรูปร่างการสั่นสะเทือนและค่าความถี่ของชุดผ้าเบรกกับจานเบรกที่ย่านความถี่สูง ในการศึกษาครั้งนี้มีการออกแบบแผ่นเสริม (Brake pad shim) 1 รูปแบบที่มีขนาดความกว้าง 38.7 มิลลิเมตร ความยาว 130.74 มิลลิเมตร และความหนา 1 มิลลิเมตร พื้นที่รวมของแผ่นเสริมเท่ากับ 7898.18 ตารางมิลลิเมตร โดยมีการเจาะพื้นผิวในรูปแบบ slot ส่วนโค้งและเจาะรูวงกลมบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน และกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุเป็น Stainless steel และเมื่อทำการเพิ่มความหน่วงด้วยแผ่น Shim บนชุดผ้าเบรกในสถานะเดียวกันกับข้างต้นด้วยเทคนิค CEA พบว่าการเพิ่มความหน่วงด้วยแผ่น Shim สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหา Brake squeal noise ที่ย่านความถี่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: Complex eigenvalue analysis (CEA), ไฟไนต์เอลิเมนต์, แผ่นเสริมชุดผ้าเบรก, เบรกเสียงดังย่านความถี่สูง

Abstract

The purpose of this research is studying influence of Brake pad shim to avoid brake high frequency noise in with range 4–16 kHz, is called “High Frequency Brake Squeal Noise” for Sports Utility Vehicle (SUV) 7 seats. The method of this studying including demonstrate on the vehicle testing and finite element analysis. The finite models existing such as Brake disc vane, Brake pads lining, Brake pads plate and Brake pad shims are established by SimXpert 2020 software. To understand brake squeal noise mechanism, the Complex Eigenvalue Analysis (CEA) technique is used for stability analysis of brake system that under influence of friction coefficient. The result showed, experimental testing on vehicle data and finite element analysis by CEA are corresponding, brake squeal noise is generated at frequency within range is 14.8–16.5 kHz on the friction coefficient 0.5 and pressure 5 MPa. To avoid brake squeal noise and unstable mode, there are various methods and approaches to correct such as brake component modification, structural damping increasing, material properties improvement etc. These methods could shift and improve resonance frequencies and mode vibrations for brake disc and brake pads where are the factors of unstable modes of brake squeal noise by friction coefficient. A sample of Brake pad shim metal is modified and studied on this research, the dimension of shape is 38.7 mm × 130.74 mm × 1 mm for the wide, length and thickness, respectively and the total area is equal 7,898.18 mm². The surface of shim is drilled to be curve slot and one circle on the middle of component and assumed the material properties is stainless steel. Then, Brake pad shims are bonded on the brake pads to increase structural damping and simulated on the similar condition by CEA, the result showed this modification could avoid high frequency brake squeal noise is efficiency.

Keyword: Complex eigenvalue analysis (CEA), Finite element, Brake pads shim, Brake high frequency

1. บทนำ

ระบบเบรกรถยนต์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญต่อความปลอดภัยในการขับขี่โดยสารของผู้ใช้รถยนต์เป็นอย่างมาก หากเมื่อใดระบบเบรกมีสถานะที่เปลี่ยนไปไม่ว่าจะเป็นการเบรกไม่อยู่ เบรกแล้วเกิดการสั่นสะเทือนหรือเสียงดังก็ยิ่ง

ส่งผลต่อความกังวลต่อผู้ใช้งาน ปัญหาเบรกเสียงดังนับเป็นปัญหาที่ผู้ผลิตรถยนต์และนักวิจัยได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับกลไกของการเกิดปัญหาโดยเฉพาะปัญหาเบรกเสียงดังย่านความถี่สูงโดยมีค่าความถี่อยู่ระหว่าง 4–18 kHz [1],[2] ซึ่งปัญหานี้ได้ก่อให้เกิดภาระค่าใช้จ่ายของผู้ผลิตรถยนต์ต่อ

การรับประกันความพึงพอใจลูกค้าในแต่ละปีนับเป็นมูลค่าหลายล้านบาท ด้วยเหตุนี้ทางผู้ผลิตรถยนต์และนักวิจัยจึงได้ให้ความสำคัญและพยายามศึกษากลไกการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังของระบบเบรกเพื่อนำมาแก้ไขที่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปัญหาเบรกเสียงดังมีความซับซ้อนทางด้านกลไกและตัวแปรพารามิเตอร์ อันได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Coefficient, μ) ความดันเบรก (Braking Pressure) และความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) เป็นต้น ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีส่วนส่งผลกระทบต่อกระตุ้นชิ้นส่วนระบบเบรกให้เกิดการสั่นสะเทือนของตัวโครงสร้างเอง (Self-Excitation) อย่างต่อเนื่องจนก่อให้เกิดความรุนแรงในการสั่นสะเทือนจนทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของระบบและปัญหาเบรกเสียงดัง [3-5] โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) ระหว่างผ้าเบรกและจานเบรknับเป็นพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อการกระตุ้นให้จานเบรกและผ้าเบรกเกิดการสั่นสะเทือนทางโครงสร้างในทิศทาง in-plane จนเกิดความรุนแรงส่งต่อไปยังการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังในทิศทาง out-plane ด้วยแรงอัดอากาศ [5],[6]

Xu wang and et al. [7] ได้ทำการศึกษการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังด้วยการทดสอบบนรถจริงควบคู่กับการจำลอง 3D model ระบบเบรกด้วยวิธีการทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพบว่าปัญหาเบรกเสียงดังเกิดจากกลไกของ Modal locking ระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกที่มีผลจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นตัวกระตุ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างจานเบรกรวมไปถึงการเพิ่มชิ้นส่วนที่เรียกว่า shim และ grease ก็สามารถเพิ่ม vibration damper ในการลดความรุนแรงการสั่นสะเทือนอันเป็นสาเหตุปัญหาเบรกเสียงดัง ต่อมา Noubay M.Ghazaly and et al. [8] ได้มีการศึกษากลไกทางด้าน Mechanism อันประกอบไปด้วย stick-slip, sprag-slip, modal coupling และ hammering excitation. อันมีผลต่อการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังด้วยวิธีการทดสอบและทางด้าน simulation จากการศึกษาพบว่ายังมีปัจจัยอื่นนอกเหนือจากลักษณะข้างต้นที่สามารถส่งผลต่อการเกิดปัญหาเบรกเสียงดัง และในปีเดียวกัน V Kumar and et al. [9] ได้ทำการศึกษการเกิดปัญหาเบรก

เสียงดังด้วยการทดสอบควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีการทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis, FEA) ซึ่งพบว่าปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูงเกิดจากการสั่นสะเทือนในทิศทาง Bending mode และปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่ต่ำเกิดจากการสั่นสะเทือนของจานเบรกในทิศทาง in-plane mode ซึ่งพบว่าแผ่น shim สามารถนำมาลดการสั่นสะเทือนในทิศทาง out-of-plane และการเกิดสภาวะ Mode coupling อันก่อให้เกิดปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูง และในปี ค.ศ. 2017 Kullayot and Supachai [10] ได้ทำการศึกษการเพิ่มความหน่วงของชุดผ้าเบรกในการลดปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่ต่ำ พบว่าการเพิ่มความหน่วงสามารถลดความรุนแรงของเสียงลงได้

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าการจำลอง 3D model ด้วยวิธีการทางด้าน FEA ถูกนำมาประยุกต์ใช้ควบคู่ไปกับการทดสอบเพื่อใช้ในการอธิบายรูปแบบและลักษณะการเกิดปัญหาการสั่นสะเทือนและเสียงด้วยเทคนิคที่นิยมใช้กันแพร่หลายในการอธิบายความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกคือเทคนิค Complex eigenvalue analysis (CEA) [1],[3] ในปี 2017 Ke Shang and et al. [11] ได้ทำการศึกษการเกิดปัญหาเบรกเสียงดัง (Brake squeal) เนื่องจากความไม่เสถียรภาพของระบบ ด้วยเทคนิค CEA ควบคู่กับ Time-frequency analysis (STFT method) ซึ่งพบว่าปัญหา Brake squeal มักเกิดที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูง ความเร็วและแรงดันต่ำ ในปีเดียวกัน Abd rahim abu baker and et al. [12] ได้ทำการศึกษการประยุกต์ใช้ Constrained layer dampers ในการแก้ไขปัญหาเบรกเสียงดัง โดยมีการออกแบบชั้น layer dampers ของแผ่น Constrained ให้มีวัสดุ 3 ชนิดคือ Silicone rubber, Ethylene propylene monomer rubber (EPDM) และ Nitrile butadiene rubber (NBR) นอกจากนี้ยังศึกษาความแตกต่างของ Constrained dampers 2 รูปแบบคือ แบบที่ 1 เป็นแบบ 3 ชั้นและแบบที่ 2 เป็นแบบ 4 ชั้น ผลการศึกษาพบว่า Constrained dampers ที่ทำจากวัสดุ NBR และ Silicone สามารถแก้ไขปัญหเบรกเสียงดังได้ดีกว่าวัสดุ EPDM และการออกแบบชั้น layer ของ Constrained dampers 4 ชั้นสามารถแก้ไขปัญหเบรก

เสียงดังได้ดีกว่า 3 ชั้น ในปี 2018 Gongyu and et al. [13] ก็ได้ทำการศึกษารูปร่างและวัสดุของแผ่น Insulator เช่นเดียวกันโดยได้มีการศึกษา 4 รูปแบบด้วยกันคือ 1. Single layer ไม่มีชั้นของ rubber และความหนาของแผ่น steel sheet 0.4 มม., 2. A-two layers มีชั้นของ rubber 1 ชั้น ความหนา 0.22 มม. และความหนาของแผ่น steel sheet 0.4 มม., 3. B-two layers มีชั้นของ rubber 1 ชั้นความหนา 0.14 มม., C-three layers มีชั้นของ rubber 2 ชั้นแต่ละชั้นหนา 0.14 มม. และความหนาของแผ่น steel sheet 0.4 มม., 4. D-three layer มีชั้นของ rubber 2 ชั้นแต่ละชั้นหนา 0.14 แต่ความหนาของแผ่น steel sheet เท่ากับ 0.5 ด้วยการทดสอบบนเครื่อง Bench test ตามมาตรฐานการทดสอบปัญหาเบรกเสียงดัง SAE J2521 พบว่าแผ่น Insulator ที่มี rubber สามารถแก้ไขปัญหามอเตอร์เสียงดังได้ดีกว่าแผ่น Insulator ที่เป็น steel sheet เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบการออกแบบแผ่น Insulator ที่มีชั้นของ rubber 2 ชั้นและมีการเพิ่มค่าความหนาของ steel sheet ด้วยนั้นสามารถแก้ไขปัญหามอเตอร์เสียงดังที่ย่านความถี่สูงและต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการเพิ่มชั้นความหนาของ rubber เพียงอย่างเดียว

ต่อมาในปี ค.ศ. 2019 [14] Dominik and et al. ได้ทำการศึกษาค่าคุณสมบัติความหน่วง (Damping) ของวัสดุ Elastomer ของแผ่น Shims ด้วยการทดสอบ 2 รูปแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเบรกเสียงดังด้วยวิธี CEA ออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีที่ 1 การทดสอบด้วย Experimental modal analyses (EMA) และวิธีที่ 2 การทดสอบด้วย Dynamic mechanical analyses (DMA) พบว่าวิธีการทดสอบแบบ DMA สามารถวัดค่าคุณสมบัติความหน่วง Rayleigh damping ได้ใกล้เคียงกับค่าคุณสมบัติจริงมากกว่าแบบ EMA

จากงานวิจัยข้างต้นได้มีการศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหามอเตอร์เสียงดังด้วยวิธีการที่หลากหลาย แต่แนวทางการแก้ไขดังกล่าวยังไม่สามารถนำไปอธิบายกลไกของการเกิดปัญหามาจนนำไปสู่การแก้ไขได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการเกิดปัญหามอเตอร์เสียงดังเป็นปัญหาที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับสภาวะเงื่อนไขที่หลากหลายแตกต่างกัน

ออกไปที่ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาอิทธิพลของแผ่น shims ต่อการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังของผู้ผลิตรถยนต์รายหนึ่ง เพื่อนำไปสู่กระบวนการและแนวทางแก้ไขปัญหามอเตอร์และการออกแบบระบบเบรกเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหามอเตอร์เสียงดัง โดยมีการทดสอบบนรถจริงควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ปัญหามอเตอร์เสียงดังด้วยเทคนิค CEA โดยแบบจำลองระบบเบรกเสมือนจริงในรูปแบบ 3 มิติ ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม FEA อันประกอบไปด้วย จานเบรกแบบมีช่องระบายอากาศ แผ่น plate ผ้าเบรก และแผ่น shim ตามลำดับ โดยมีการทดสอบหาค่าคุณสมบัติวัสดุ (Material properties) ด้วยวิธีทางด้านการ Modal testing และสภาวะเงื่อนไขที่ก่อให้เกิดปัญหามอเตอร์เสียงดังที่ได้จากการทดสอบบนรถจริงอันประกอบด้วยความเร็วเชิงมุม, ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) และแรงดันเบรกเป็นต้น เพื่อใช้ในการกำหนดเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ปัญหามอเตอร์ด้วยโปรแกรม FEA โดยงานวิจัยนี้มีการพิจารณาความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกด้วยค่า Negative damping ที่มีค่าเป็นลบ (-) โดยมีค่าความรุนแรงของเสียงมากกว่า -0.001

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. รูปแบบการเกิดปัญหามอเตอร์สั่นสะเทือนและเสียง

ปัญหามอเตอร์สั่นสะเทือนและเสียงที่เกิดขึ้นสามารถแยกออกได้ตามย่านความถี่ดังรูปที่ 1 ซึ่งแต่ละย่านความถี่มีกลไกและสภาวะเงื่อนไขในการเกิดปัญหาที่แตกต่างกันออกไปโดยที่ย่านความถี่ 500–1000 Hz เป็นย่านความถี่ต่ำสามารถแยกออกได้เป็น Groan, Moan และ Howl ซึ่งความถี่ต่ำเหล่านี้เป็นปัญหาการสั่นสะเทือนที่ไม่เกิดเสียง ส่วนปัญหามอเตอร์เสียงดังจะเกิดที่ย่านความถี่ 1–20 kHz โดยสามารถแบ่งออกเป็นปัญหามอเตอร์เสียงดังที่ย่านความถี่ต่ำคือความถี่ช่วงระหว่าง 1–4 kHz ที่เรียกว่า Low frequency squeal และเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูงคือความถี่ช่วงระหว่าง 4–20 kHz ที่เรียกว่า High frequency squeal ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาอิทธิพลของแผ่นเสริมชั้นความหน่วงต่อการเกิดปัญหามอเตอร์เสียงดังที่ย่านความถี่สูง

2.2. Complex Eigenvalue Method and Analysis (CEA)

วิธีการทางด้าน CEA เป็นเทคนิคที่นักวิจัยและผู้ผลิตรถยนต์นำมาวิเคราะห์ความไม่เสถียรภาพของระบบเบรก อันมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ความเร็ว และแรงดันเบรกเป็นตัวกระตุ้น [4-6] ซึ่งจะมีการแสดงผลออกมาในรูปแบบ Complex eigenvalue อันประกอบไปด้วยค่า Positive real (+), ค่า Negative damping (-) เป็นตัวบ่งชี้ของการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังและค่า Imaginary แสดงค่าความถี่ดังสมการที่ (1)

$$\zeta = -2 \left(\frac{\text{Re}(x)}{|\text{Im}(x)|} \right) \quad (1)$$

โดยที่

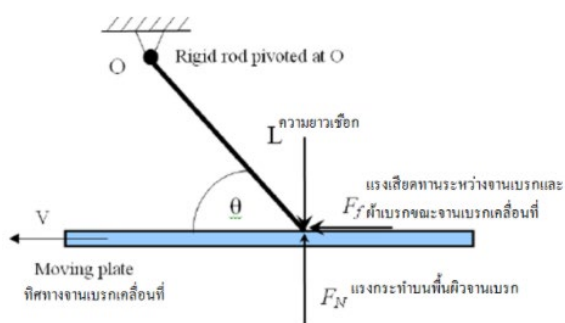
ζ = ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (Effective damping ratio)

$\text{Re}(x)$ = ค่าจริง (Real value)

$\text{Im}(x)$ = ค่าจินตภาพ (Imaginary)

2.3. ความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกอันเนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ปัญหาเบรกเสียงดังด้วยเทคนิค CEA ข้างต้นสามารถอธิบายในรูปแบบของสมการ (2) และรูปที่ 1 โดยมีพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดปัญหาความไม่เสถียรภาพของระบบอย่างมีนัยสำคัญนั่นก็คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน



รูปที่ 1 การเกิดปัญหาเบรกเสียงดังในสภาวะ Friction Sliding

$$d\tau_i = \left(\mu + \frac{\partial \mu}{\partial p} p \right) n_i dp + \frac{\partial \mu}{\partial v} p n_i dv + \frac{\mu p}{\dot{v}} (\delta_{ij} - n_i n_j) d\dot{v}_j \quad (2)$$

โดยที่

τ_i = ความเค้นในแนว Tangential

μ = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Coefficient)

p = ความดันเบรกบริเวณผิวสัมผัส (Contact Pressure)

n_i = ทิศทางการลื่นไถล (Normalized Slip Direction)

$\dot{v}$ = ความเร็วของการลื่นไถล (Equivalent Slip Rate/sliding Velocity)

$\dot{v}_j$ = ความสัมพันธ์การลื่นไถล (Relative Slip/sliding Velocity)

3. วิธีการทดสอบและวิเคราะห์ปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูง (High Frequency Brake Squeal Noise)

ปัญหาเบรกเสียงดังมีกลไกในการเกิดปัญหาจากอิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างจานเบรกและผ้าเบรกในขณะที่รถยนต์มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งจนก่อให้เกิดพลังงานสะสมในระบบจนนำไปสู่การสั่นสะเทือนที่รุนแรงอันเป็นปัญหาของเบรกเสียงดังออกสู่ภายนอก [3],[5],[16] เพื่อให้ทราบถึงลักษณะของการเกิดปัญหาการสั่นสะเทือนและเสียงของระบบเบรก งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบปัญหาดังกล่าวด้วยการทดสอบบนรถจริงควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SimXpert 2020 โดยวิธี CEA

3.1. การทดสอบบนรถจริง (Vehicle Testing)

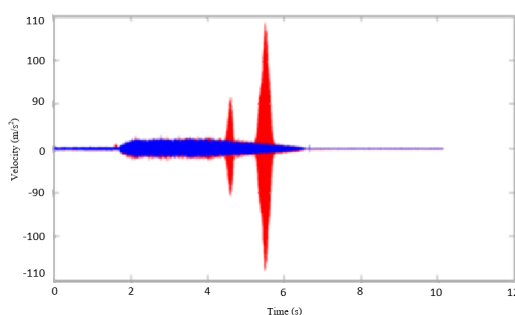
ในกระบวนการการทดสอบขั้นตอนนี้ได้มีการติดตั้งชุดทดสอบเข้ากับระบบเบรกของรถยนต์ 2 ล้อหน้าซ้ายและขวาดังรูปที่ 2 โดยประกอบไปด้วย

1. ตัวห้อยสัญญาณความเร่งการสั่นพร้อมฐานแม่เหล็ก (Accelerometer) Bruel & Kjaer type 4397 จำนวน 4 ตัว โดยทำการติดตั้งบริเวณด้านหลังของชุดคาลิเปอร์
2. ตัวห้อยสัญญาณเสียง (Microphone) Bruel & Kjaer type 4189 จำนวน 2 ตัว บริเวณข้างซุ้มล้อหน้าซ้ายและขวา
3. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณพลศาสตร์ (Analyzer) แบบ 4 ช่องสัญญาณ Bruel & Kjaer Proton+ จำนวน 1 เครื่อง
4. ตัววัดค่าความหน่วง (Deceleration) 2 ตัว



รูปที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดสอบบนรถจริง

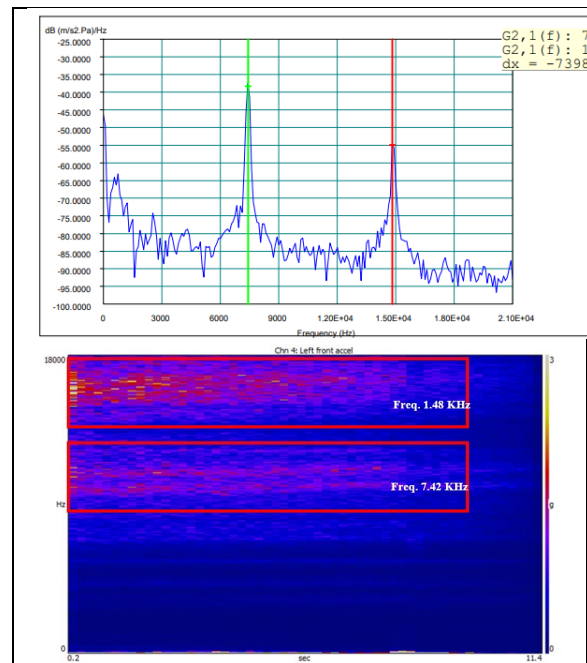
การทดสอบปัญหาเบรกสั่นสะเทือนและเสียงนี้จะทำการทดสอบที่ระดับความเร็วของรถยนต์ในช่วง 0–100 km/hr. เนื่องจากผู้ใช้งานมีการใช้รถในพื้นที่เขตในเมืองซึ่งมีการจราจรติดขัดและพบปัญหาเบรกเสียงดังที่ความเร็วต่ำในการทดสอบจะทำการเบรกจนรถหยุดสนิทเพื่อทำการวัดค่าสั่นสะเทือนและเสียงพร้อมกับทำการวัดค่าความหน่วงขณะเบรก (Deceleration) จากผลการทดสอบพบว่าปัญหาเบรกเสียงดังเกิดขึ้นที่ล้อหน้าซ้าย (เส้นสีแดง) ส่วนล้อหน้าขวา (เส้นสีน้ำเงิน) ไม่พบการเกิดการสั่นสะเทือนในรูปแบบของกราฟ Time domain และ สเปกโตรแกรมดังรูปที่ 3–4 ในสภาวะการเบรกที่ความเร็ว 30 km/h และค่าความหน่วงอยู่ที่ 0.5 g แรงดันเบรกอยู่ที่ 5 MPa อุณหภูมิของจานเบรกเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ปัญหาเบรกเสียงดังเกิดที่ค่าความถี่ 7.42 kHz และ 1.48 kHz



รูปที่ 3 ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนในทิศทาง Out-plane ของล้อหน้าซ้าย (เส้นสีแดง) และล้อหน้าขวา (เส้นสีน้ำเงิน)

รูปที่ 3 เป็นสัญญาณการสั่นสะเทือนของระบบเบรกล้อหน้าซ้าย (เส้นสีแดง) และขวา (เส้นสีน้ำเงิน) ด้วย Accelerometer ในรูปแบบ Time domain โดยจะพบว่า

สัญญาณการสั่นสะเทือนของระบบเบรกล้อหน้าซ้ายมีแอมพลิจูดที่รุนแรงกว่าระบบเบรกล้อหน้าขวาอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4 การเกิดเบรกเสียงดังในรูปแบบ Frequency domain และ Spectrogram

รูปที่ 4 แสดงการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังในรูปแบบของ Frequency domain และ Spectrogram ซึ่งการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังนี้เป็นความถี่ในรูปแบบ Double หรือที่เรียกว่าค่าความถี่แบบ Harmonic frequency ซึ่งในสภาวะเช่นนี้การแก้ไขปัญหาเบรกเสียงดังไม่ว่าแก้ที่ค่าความถี่ใดค่าความถี่หนึ่งก็จะลดลงหรือหายไปด้วยเช่นกัน

3.2. การวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรม FEA โดยเทคนิค CEA

3.2.1. การหาค่าคุณสมบัติวัสดุ

ในการหาค่าคุณสมบัติวัสดุของชิ้นส่วนระบบเบรกของงานวิจัยนี้อันประกอบไปด้วยค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) ค่าความหนาแน่น (Density) และค่าความหน่วง (Critical damping) ด้วยการทดสอบ Modal testing and analysis ในสภาวะที่ชิ้นงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขการสั่นอิสระ (Free vibration) ในรูปแบบการสั่นแบบ Under damped motion โดยนำผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และรูปร่างการสั่นสะเทือน (Mode shape) ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอ

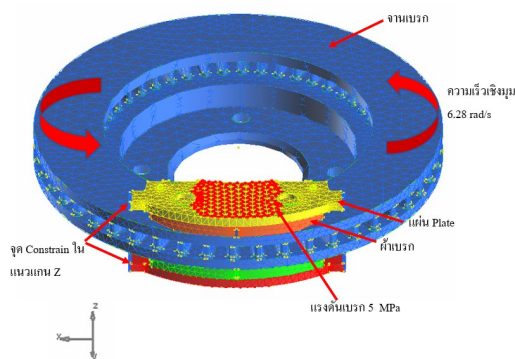
ลิเมนต์ โดยพิจารณาที่ค่าความถี่ธรรมชาติของโหมด 2 ND (2 Nodal diameter) ทั้งของจานเบรกและชุดผ้าเบรกโดยผลของความแตกต่างของการทดสอบและไฟไนต์เอลิเมนต์ และ Modal testing ไม่เกิน 2% ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติวัสดุในการวิเคราะห์ FEA

ชิ้นงาน	ค่า E (GPa)	ค่า ρ (kg/m ³)	ค่า ϵ	ค่า ζ
จานเบรก	114	7300	0.3	0.005
ผ้าเบรก	9.5	3000	0.3	
แผ่น plate	200	7300	0.3	

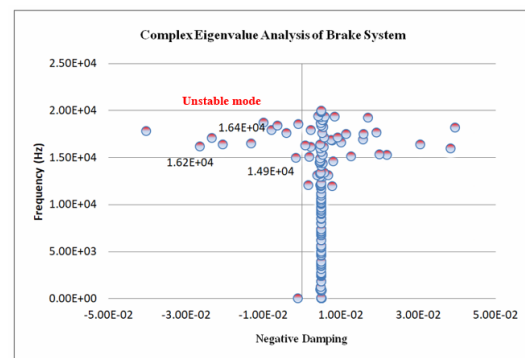
3.2.2. การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

แบบจำลอง 3 มิติของระบบเบรกอันประกอบไปด้วยจานเบรกแบบมีช่องระบายอากาศ แผ่นเพลต ชุดผ้าเบรก และแผ่นเสริมชั้นความหน่วง ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SimXpert 2020 โดยมีการแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานทั้งหมดเป็นแบบรูปทรงสามเหลี่ยมพิกวา (Quadratic element) จำนวนเอลิเมนต์ 940,950 เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ชุดผ้าเบรกมีการเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน Z เท่านั้น และมีพื้นที่ที่ความดันลูกสูบกระทำกับชุดผ้าเบรกเท่ากับ 34.64 ตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเบรกเสียดังอันเนื่องจากความไม่เสถียรภาพของระบบเทียบกับการทดสอบบนรถจริง

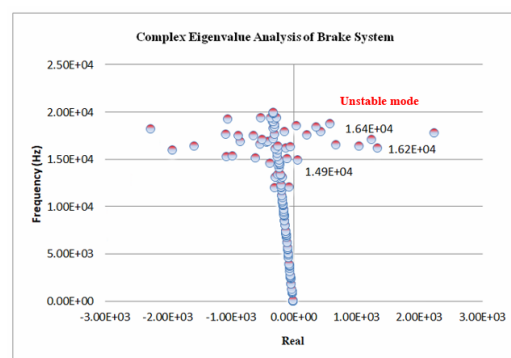


รูปที่ 5 แบบจำลอง 3 มิติของระบบเบรกด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SimXpert 2020

เมื่อทำการวิเคราะห์ปัญหาเบรกเสียดังด้วยเทคนิค CEA เทียบกับการทดสอบบนรถจริงพบว่าปัญหาเบรกเสียดังเกิดที่สภาวะเงื่อนไขความดันที่ลูกสูบของชุดคาลิเปอร์กระทำต่อชุดผ้าเบรกเท่ากับ 5 MPa ความเร็วที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นช่วง Steady state คิดเป็นความเร็วเชิงมุมเท่ากับ 6.28 rad/s โดยงานวิจัยนี้เน้นวิเคราะห์ปัญหา Brake squeal ที่มีค่า Negative damping และค่า Positive ที่มากกว่า -0.01 และ +70 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่าปัญหาเบรกเสียดังด้วยวิธี CEA มีค่าความถี่ของการเกิดปัญหาเบรกเสียดังมากกว่าผลการทดสอบจริงคือที่ความถี่ 1.49 kHz, 1.62 kHz, 1.64 kHz, 1.65 kHz, 1.71 kHz, 1.76 kHz, 1.78 kHz และ 1.79 kHz ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 อันเนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CEA เป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบ Steady stage แต่การทดสอบบนรถจริงอยู่ในรูปแบบของ Dynamic analysis และยังมีมีส่วนของชิ้นส่วนอื่นนอกเหนือจากระบบเบรกเข้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 6 แสดงความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกที่มีปัญหาด้วยค่า Negative damping โดยเทคนิค CEA



รูปที่ 7 แสดงความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกที่มีปัญหาด้วยค่า Positive real โดยเทคนิค CEA

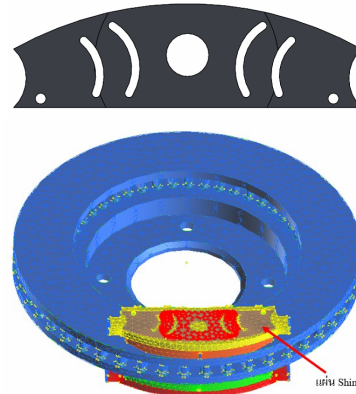
รูปที่ 6-7 พบว่าผลการวิเคราะห์ปัญหาเบรกเสียงดัง ด้วยเทคนิค CEA ล้วนเกิดที่ความถี่สูงตั้งแต่ 14.9–17.9 kHz ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบบนรถจริงที่เกิดปัญหาเบรกเสียงดังที่ความถี่ประมาณ 1.48 kHz

3.3. การศึกษาอิทธิพลของแผ่น Shim ต่อการเกิดปัญหา Brake squeal

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ปัญหา Brake squeal ข้างต้นพบว่าค่าความถี่ที่เกิดขึ้นนี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปได้โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างหรือเพิ่มความหน่วงให้แก่ระบบเบรก ด้วยข้อจำกัดของการออกแบบและปรับเปลี่ยน โครงสร้างของจานเบรกและผ้าเบรกที่ไม่สามารถแก้ไขและปรับเปลี่ยนได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการเพิ่มค่าความหน่วงโดยแผ่น Shim ซึ่งโดยทั่วไปรูปร่างของแผ่น Shim จะมีองค์ประกอบของวัสดุที่เป็นส่วนของ Metal, Adhesive และ Rubber โดยมีความหนาเฉลี่ยโดยรวมประมาณ 0.8–1.2 มิลลิเมตร ในส่วนของการออกแบบความกว้างและความยาวจะต้องไม่เกินพื้นที่ของชุดผ้าเบรก [16] งานวิจัยนี้จะทำการออกแบบแผ่น Shim เพียง 1 รูปแบบที่มีขนาดความกว้าง 38.7 มิลลิเมตร ความยาว 130.74 มิลลิเมตร และความหนา 1 มิลลิเมตร พื้นที่รวมของแผ่นเสริมเท่ากับ 7,898.18 ตารางมิลลิเมตร โดยมีการเจาะพื้นผิวในรูปแบบ slot ส่วนโค้งและเจาะรูวงกลมบริเวณตรงกลางของชิ้นงานดังรูปที่ 8 และมีการกำหนดให้แผ่น Shim เป็นเพียงวัสดุในส่วนของ Metal นั่นก็คือ 1023 Carbon Steel Sheet (SS) ดังตารางที่ 2 เท่านั้นเนื่องจากข้อจำกัดของประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์และโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

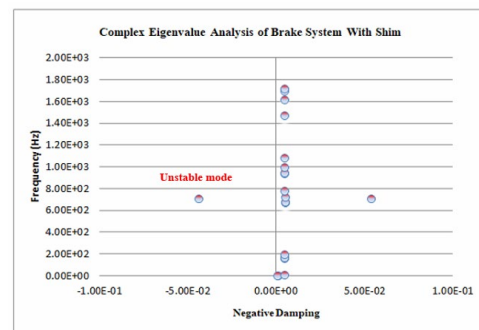
ตารางที่ 2 คุณสมบัติและคุณสมบัติวัสดุของแผ่น Shim

ชนิดของวัสดุ	ค่า E (GPa)	ค่า ρ (kg/m ³)	ค่า ν
1023 Carbon Steel Sheet (SS)	0.28	7800	0.3

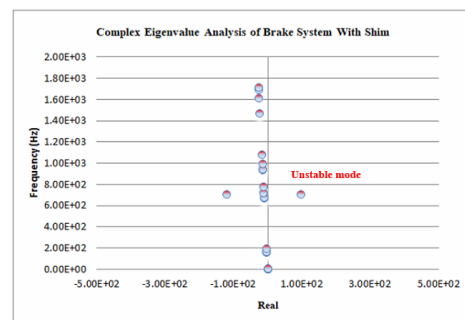


รูปที่ 8 ลักษณะแผ่น Shim และการติดตั้งบนชุดผ้าเบรก ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SimXpert 2020

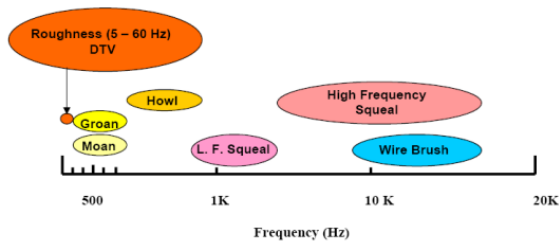
เมื่อทำการเพิ่มชั้นความหน่วงด้วยแผ่น Shim เข้ากับชุดผ้าเบรกผลการวิเคราะห์พบว่าปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูงอันเนื่องมาจากความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกได้หายไปแต่จะเกิดค่าความถี่ต่ำประมาณ 708 Hz ดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 แทนซึ่งค่าความถี่นี้จัดอยู่ในส่วนของปัญหาเบรกสั่นสะเทือนแทนดังรูปที่ 11



รูปที่ 9 ความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกที่มีการเพิ่มแผ่น Shim ด้วยค่า Negative damping โดยเทคนิค CEA



รูปที่ 10 ความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกที่มีการเพิ่มแผ่น Shim ด้วยค่า Positive real โดยเทคนิค CEA



รูปที่ 11 ย่านความถี่การเกิดปัญหาเบรกสั่นสะเทือนและเสียง [15].

รูปที่ 11 เป็นการแบ่งย่านความถี่ของการเกิดปัญหาเบรกสั่นสะเทือนและเสียง โดยจะมีการแบ่งออกเป็น 2 คุณลักษณะด้วยกันคือปัญหาเบรกสั่นสะเทือนจะเกิดที่ย่านความถี่ 0-1000 Hz และปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่ 1000-20000 Hz โดยปัญหาเบรกเสียงดังจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่ต่ำจะเกิดที่ความถี่ 1000-4000 Hz และปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูงจะเกิดที่ความถี่ 4000-20000 Hz ตามลำดับ

4. สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นพบว่า

1. ผลการทดสอบบนรถจริงเกิดปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูง คือ 7.42 kHz และ 1.48 kHz บริเวณล้อหน้าซ้าย ซึ่งค่าความถี่เบรกเสียงดังนี้เป็นความถี่ที่เป็นแบบ Harmonic ที่สภาวะการเบรกด้วยความเร็ว 30 km/h ค่าความหน่วงในการเบรก 0.5g แรงดันเบรกที่ 5 MPa และอุณหภูมิของจานเบรก 100 องศาเซลเซียส
2. เมื่อทำการวิเคราะห์ปัญหา Brake squeal ด้วยการจำลองระบบเบรก 3 มิติโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ SimXpert 2020 ด้วยวิธี CEA พบว่าวิธีการทางด้าน CEA สามารถนำมาจำลองการวิเคราะห์ปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูงอันเนื่องจากความไม่เสถียรภาพของระบบเบรกได้ผลที่มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง โดยเกิดปัญหาเบรกเสียงดังที่ความถี่ 1.48–1.49 kHz
3. ด้วยข้อจำกัดของการออกแบบและแก้ไขโครงสร้างของระบบเบรกในการหลีกเลี่ยงปัญหา Brake squeal งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์หือทธิพลของแผ่น Shim เพื่อเพิ่มค่าความหน่วงให้กับระบบในการ

ป้องกันการสั่นสะเทือนและเสียงอันมีค่าประสิทธิผลที่แรงเสียดทานเป็นตัวกระตุ้นแทน พบว่าการเพิ่มชั้นความหน่วงหรือแผ่น Shim ลงบนชุดผ้าเบรกสามารถลดและแก้ไขปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูง[10],[12],[14],[15] เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงไปของลักษณะกลศาสตร์การสั่นสะเทือนของชุดผ้าเบรกและจานเบรก

จากการศึกษาข้างต้นเป็นเพียงการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเบรกเสียงดังที่ย่านความถี่สูงของระบบเบรกรถยนต์ส่วนบุคคล 7 ที่นั่งรุ่นหนึ่งเท่านั้น ซึ่งการเพิ่มชั้นค่าความหน่วงหรือแผ่น Shim ในรูปแบบลักษณะนี้อาจไม่เพียงพอต่อการลดการสั่นสะเทือนและเสียงของโครงสร้างระบบเบรคนั้นๆลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการเกิดปัญหาเบรกเสียงดังนั้นมีกลไกทาง Mechanism ที่ซับซ้อนควบคู่กับโครงสร้างระบบเบรก พารามิเตอร์ต่างๆ และสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผู้ทำวิจัยจะดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมในลำดับขั้นตอนต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Khunthitong and C. Chantalakhana, "On the Study of Disc Brake Vane Configuration Effected to Brake Squeal Noise," in *The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Chiang Mai, Thailand, Dec. 13–16, 2016, AMM001.
- [2] X. Wang, S. John and H. Ren, "A Study of Squeal Noise in Vehicle Brake System," in *Proc. of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Denver, Colorado, USA, Nov. 11–17, 2011, doi: 10.1115/IMECE2011-62084.
- [3] A. Khunthitong "Study and Development of Disc Brake for Noise and Vibration Reduction," Ph.D. dissertation, ME Dept., KMUTNB Univ., Bangkok, Thailand, 2016.
- [4] S. Khunthitong and C. Chantalakhana, "On the Study of In-Plane and Out-Plane Rotor Vibration Modes Effected to Brake Squeal Noise," in *27th Conference*

- of the Mechanical Engineering Network of Thailand., Pattaya, Chonburi, Thailand, 2013, pp. 1–9.
- [5] A. Nobari, H. Ouyang and P. Bannister, “Statistics of complex eigenvalues in friction-induced vibration,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 338, pp. 169–183, 2015, doi: 10.1016/j.jsv.2014.10.017.
- [6] A. Khuntiptong and C. Chantalakhana, “On the Study of Disc Cheek Thickness as a Design Parameter for Reducing of Brake Squeal Noise,” in *TSME-ICOME*, Cha-am, Phetchaburi, Thailand, 2015, pp. 1–6.
- [7] F. Chen, C.A. Tan, and R.L. Ouaglia, “Disc Brake Squeal: Mechanical, Analysis, Evaluation and Reduction/Prevention.,” Warrendale, Pa.: SAE International, 2006, pp. 1–401.
- [8] N. M. Ghazaly, M. El-Sgarkawy and I. Ahmed, “A Review of Automotive Brake Squeal Mechanisms,” *Journal of Mechanical Design and Vibration*, vol. 1, no. 1, pp. 5–9, 2014, doi: 10.12691/jmdv-1-1-2.
- [9] V. Kumar, S. V. Chaitanya and S. B. Phadke, “Automotive Brake Disc Design to Suppress High Frequency Brake Squeal Noise,” *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 3, no. 1, 2014.
- [10] K. Suwataroj and S. Lakkam, “Brake Noise Reduction Using Brake Pad with Damping Layer Technique,” Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand, final rep., 2017.
- [11] K. Shang, X. Liu and E. Moureh-Ledig, “Squeal simulation and analysis of brake system with pressure and speed dependent friction model and exerting process of pressure,” *Journal of Vibroengineering*, vol. 19, no. 3, pp. 2090–2105, 2017, doi: 10.21595/jve.2016.17351.
- [12] A. Rakim ABU Bakar, M. Kameil Abdul Hamid and K. Bin Zakaria, “Reduction of Disc Brake Squeal Noise Using Constrained Layer Dampers,” *Jurnal Teknologi (Science & Engineering)*, vol. 79, no. 7-4, pp. 83–87, 2017, doi: 10.11113/jt.v79.12269.
- [13] G. Pan, Y. Li and L. Chen, “Impact Analysis and Optimization of Material Parameters of Insulator on Brake Squeal,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 15861–15867, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2894781.
- [14] D. Schmid, V. Sessner, N. Gräbner, U. Wagner and K. A. Weidenmann “Parameter Identification of Brake Pad Shims for Complex Eigenvalue Analysis,” *Proceeding in Applied Mathematics*, 2019.
- [15] J. Glisovic and D. M. Miloradovic, “Eliminating Brake Noise Problem,” *Mobility & Vehicle Mechanics*, vol. 36, no. 3, pp. 35–51, 2010.
- [16] Trelleborg Sealing Solutions Kalmar AB “Shims / Insulators.” rubore.com. <https://www.rubore.com/en/products-applications/shims-insulators> (accessed Mar. 10, 2022).

อิทธิพลของปัจจัยต่อการปล่อยฝุ่นละอองที่ไม่ได้มาจากไอเสียของรถจักรยานยนต์

Influence of Factors on Non-Exhaust PM Emissions from Motorcycle

วรวัฒน์ ทรงกิตติ¹, ศิริศักดิ์ พงษ์ยอดมณี¹, เฉลิมพล เปล่งสะอาด¹ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร
กรุงเทพมหานคร 10900

Worawat Songkitti¹, Sirasak Pong-a-mas¹, Chalermpon Plengsa-ard¹ and Ekathai Wirojsakunchai^{1,*}

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Lat Yao,
Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

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

Received: Oct 19, 2021; Revised: Jan 21, 2022; Accepted: Jan 27, 2022

บทคัดย่อ

ในหลายปีที่ผ่านมาทั่วโลกพบกับปัญหามลพิษทางอากาศโดยเฉพาะปัญหาเกี่ยวกับฝุ่น PM เป็นอย่างมากซึ่งมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะฝุ่น PM ที่มาจากการสันดาปของเครื่องยนต์ (Exhaust PM emissions) อย่างไรก็ตามยังมีฝุ่น PM บางส่วนที่ไม่ได้มาจากการสันดาปของเครื่องยนต์ แต่เกิดขึ้นจาก ยาง (Tyre wear) เบรก (Brake wear) และการตะกุก (Resuspension) ซึ่งถือเป็นกลุ่มฝุ่น PM ที่ไม่ได้มาจากไอเสีย (Non-exhaust PM emissions) โดยฝุ่น PM ทั้งสามประเภทนี้มีที่มาทั้งจากรถยนต์และรถจักรยานยนต์ โดยจากข้อมูลของกรมการขนส่งทางบกปีพ.ศ. 2562 พบว่าในประเทศไทยมีจำนวนการจดทะเบียนรถจักรยานยนต์อยู่สูงถึง 62% จากจำนวนรถที่จดทะเบียนทั้งหมดดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการวัด PM_{10} , $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ในกลุ่ม Non-Exhaust PM Emissions ที่เกิดจากรถจักรยานยนต์ โดยได้ติดตั้งอุปกรณ์วัด PM ไว้ที่ตำแหน่งล้อหน้าเพื่อวัดการฟุ้งกระจายของ PM ในขณะที่ทำการเบรก รถจักรยานยนต์ จากการทดสอบพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการฟุ้งกระจายของ PM ได้แก่ ลักษณะการขับขี่ พบว่าเมื่อมีการเบรกที่รุนแรงจะทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของ PM มากขึ้น สภาพอากาศที่แตกต่างกันส่งผลต่อการสะสมของ PM โดยเมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะส่งผลให้ปริมาณ PM จากการฟุ้งกระจายสูงขึ้น เมื่อมีการเบรกบนรถจักรยานยนต์ที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณการฟุ้งกระจายของ PM เพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้พื้นผิวสภาพถนนยังส่งผลต่อการฟุ้งกระจายของ PM เมื่อพื้นผิวถนนขรุขระจะส่งผลให้การฟุ้งกระจายของ PM เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองจากรถจักรยานยนต์, ฝุ่นละอองที่ไม่ได้มาจากไอเสีย, การวัดฝุ่นละอองแบบ Real-time

Abstract

Over past several years, many countries all around the world have encountered air pollution problems. PM (Particulate Matter) is one of the most problematic air pollutants that seriously harms human health and the environment. The major source of PM emissions is from automobiles due to the combustion process emitted via tailpipe. However, PM can also emit from non-exhaust sources, such as tyre wear, brake wear, and resuspension, which are referred to as non-exhaust PM emissions. These types of PM are not only emitted from automobiles but also from motorcycles. Based on statistics data from Department of Land Transport, it was shown that in 2019,

Thailand had motorcycles registered about 62% of total registered vehicles. This research study is aimed on measuring non-exhaust PM emissions including PM_1 , $PM_{2.5}$ and PM_{10} that emitted by motorcycles. An onboard PM measuring device is attached on the front wheel of the tested motorcycle to monitor PM diffusion while braking. Based on experimental results, it is found out that the main factor that affects the diffusion of non-exhaust PM emissions is the braking behavior. With harder braking, more PM diffusions are produced. Different weather conditions also affect the accumulation of PM. High relative air humidity results in higher PM diffusions. When the payload of a motorcycle increases, the amount of PM diffusion increases as well. Lastly, road conditions also affect the amount of emitted PM. When the road surface is rough, it clearly increases PM diffusion.

Keywords: Particulate Matter from motorcycle, Non-Exhaust PM Emissions, Real-time PM Measurement

1. บทนำ

ปัญหาฝุ่นละออง Particulate Matter (PM) เป็นหนึ่งในมลพิษทางอากาศที่ถือเป็นปัญหามลพิษรุนแรงในแง่ของอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไป PM มักถูกแบ่งออกเป็น PM_1 , $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ซึ่งใช้แทนในการเรียกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 μm , 2.5 μm และ 10 μm ตามลำดับ [1],[2] แหล่งที่มาหลักของ PM สามารถพบได้ในเขตเมือง โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีการจราจรแออัดหนาแน่น ปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิด PM นั้นก็คือการปล่อยไอเสียที่เกิดจากการสันดาปของเครื่องยนต์ ซึ่งการปล่อยฝุ่นละอองจากไอเสียส่วนใหญ่ประกอบด้วย PM และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด ที่สามารถนำไปสู่โรคระบบทางเดินหายใจ หรืออาจส่งผลให้เกิดโรคมะเร็งได้ [3],[4]

อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจากรถยนต์ทุกชนิดนั้นไม่ได้มาจากไอเสียของรถยนต์เพียงอย่างเดียว (Exhaust PM) แต่มาจากยาง (Tyre wear) ระบบเบรก (Brake wear) และการตะกุก (Resuspension of road dust) หรือที่รวมเรียกกันว่า Non-Exhaust PM Emission [5-8] โดยคุณลักษณะของ PM จะแตกต่างกันไปตามแหล่งที่มา ซึ่งสามารถแบ่งขนาดได้เป็น PM_1 , $PM_{2.5}$ และ PM_{10} [9],[10] อีกทั้งในปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะมีผู้ใช้รถจักรยานยนต์มากขึ้นในแต่ละปี โดยกรมการขนส่งทางบกได้ทำการเปิดเผยตัวเลขยอดจดทะเบียนรถใหม่ประจำปี 2562 โดยสรุปตัวเลขรวมทั้งปีทั่วประเทศได้ 3,038,943 คัน ซึ่งเป็นการจดทะเบียนรถจักรยานยนต์ใหม่มาก

ที่สุดรวมทั้งสิ้น 1,876,710 คัน หรือประมาณ 62% ของการจดทะเบียนรถใหม่ทั้งหมด [11] จากการตรวจสอบเอกสารที่กล่าวมาข้างต้น ยาง, ระบบเบรก และการตะกุกของรถจักรยานยนต์กับฝุ่นละอองถนนมีแนวโน้มที่จะเป็นแหล่งสำคัญในการปล่อย PM เนื่องจากปริมาณความหนาแน่นของรถจักรยานยนต์ในประเทศไทยที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ จากการตรวจสอบเอกสารเบื้องต้นในต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศในทวีปยุโรปพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อ Non-Exhaust PM Emission ได้แก่ ลักษณะของการเบรก [12], สภาพสิ่งแวดล้อม [13], น้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุก [14],[15] และสภาพพื้นผิวที่แตกต่างกัน [16] แต่เน้นการศึกษาเฉพาะรถยนต์นั่งขนาดไม่เกิน 7 ที่นั่งเท่านั้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการปล่อย PM_1 , $PM_{2.5}$ และ PM_{10} แบบ Non-Exhaust PM Emission ที่เกิดจากรถจักรยานยนต์ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันดังนี้ ลักษณะการเบรก (Braking behavior), สภาพแวดล้อม, น้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุก (Payloads) และสภาพพื้นที่ผิวถนนที่แตกต่างกัน โดยจะทำการวัดแบบ Real-Time ขณะรถจักรยานยนต์ขับเคลื่อนแล้วทำการเบรกเพื่อดูพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและการฟุ้งกระจายของ PM จากนั้นจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ เพื่อระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยฝุ่นละอองที่ไม่ได้มาจากไอเสียของรถจักรยานยนต์

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 รถจักรยานยนต์ที่ใช้ทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รถจักรยานยนต์ที่นิยมใช้ในประเทศไทยโดยมีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของรถจักรยานยนต์

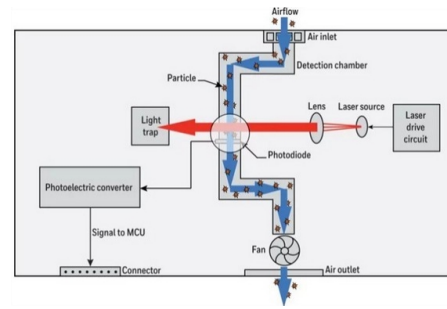
โครงสร้าง	
ชนิดของเฟรม	Underbone
ความสูงจากพื้นถึงเบาะ	790 มม.
น้ำหนัก (รวมน้ำมันเครื่องและน้ำมันเชื้อเพลิงเต็มถัง)	99 กก.
ระบบการสิ้นเสทือน หน้า/หลัง	เทเลสโคปิก/ยูนิตสวิง
ระบบเบรก หน้า/หลัง	ดิสเบรกกลูกสูบเดี่ยว/ดรัมเบรก
ยาง หน้า-หลัง	110/70-12 47L
เครื่องยนต์	
ปริมาตรกระบอกสูบ	125 ซีซี
อัตราส่วนกำลังอัด	11.0:1
กระบอกสูบ × ระยะชัก	52.4 × 57.9 มม.
ความจุน้ำมันเชื้อเพลิง	4.4 ลิตร

2.2 เครื่องมือวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PMS3003

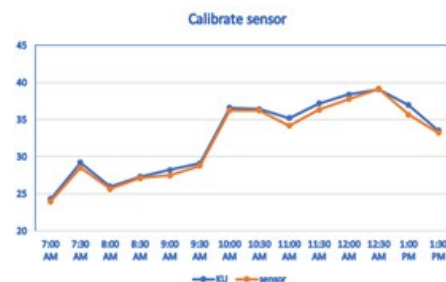
PMS3003 เป็นชุดเซ็นเซอร์ใช้สำหรับตรวจจับอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กให้ผลการวัดเป็นข้อมูลแบบ Real Time PMS3003 สามารถตรวจวัดอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กทั้งระดับ PM₁, PM_{2.5} และ PM₁₀ ได้ในชุดเดียวกัน โดยสามารถปรับโหมดการวัดให้สัมพันธ์สอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมต่างๆ เพื่อให้ได้ผลการวัดที่เที่ยงตรงแม่นยำมากขึ้นโดยอัตโนมัติ กล่าวคือ ถ้าผลการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมมีค่าสูง โหมดการวัดจะถูกเปลี่ยนเป็นแบบ Fast Mode เพื่อให้การตรวจวัดเป็นไปอย่างรวดเร็วทันกับการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าสภาวะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยโหมดการวัดจะเปลี่ยนเป็นแบบ Stable Mode เพื่อให้ได้ผลการวัดที่แม่นยำเที่ยงตรง

หลักการทำงานของ PMS 3003 ลักษณะตัวเครื่องจะเป็นกล่องขนาดเล็กภายในเครื่องจะมีอุปกรณ์ปล่อยแสงเลเซอร์และอุปกรณ์ตรวจจับค่าการสะท้อนแสงถูกวางไว้ให้ลำแสงของทั้งสองอุปกรณ์ตัดกันตรงรูปพอดี (Light Scattering) โดยหลักการการตรวจจับอนุภาคฝุ่นละอองนั้นจะทำได้ด้วยการใช้พัดลมดูดอากาศเข้าไปในตัวเซนเซอร์แล้วใช้เลเซอร์

ตรวจจับ เมื่อเลเซอร์ตรวจพบอนุภาคฝุ่นละออง แสงเลเซอร์ที่กระทบตัวอนุภาคจะหักเหอยู่ในรูปคลื่นแสงที่มีลักษณะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองดังรูปที่ 1 และทำการทดสอบเทียบเครื่องมือวัด (<https://airq.ku.ac.th/>) ได้ผลสอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 2



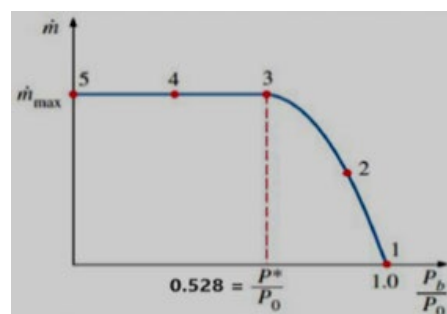
รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องมือวัด PMS3003



รูปที่ 2 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัด

2.3 ระบบดูดเก็บตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้คำนึงถึง 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ส่วนของปั๊มลมสูญญากาศและส่วนของท่อดูดอากาศ โดยส่วนของปั๊มลมสูญญากาศได้มีการกำหนดความดันที่ต้องการโดยใช้หลักการ Choked flow [17] ซึ่งจะได้ค่า Back pressure หรือความดันที่ส่วน Discharge ของ Throat ออกมาเท่ากับ 53.5 kPa ดังแสดงในรูปที่ 3 (ดัดแปลงมาจาก [18])

รูปที่ 3 ผลกระทบของ P_0 ต่อ $\dot{m}$

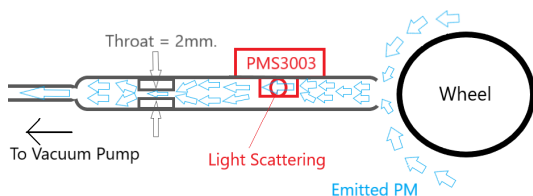
หากพิจารณา **รูปที่ 3** จะเห็นได้ว่าหากลดความดันที่ Throat จนกระทั่ง critical pressure ratio น้อยกว่า 0.528 แล้ว อัตราการไหลภายในท่อก็จะไม่เพิ่มมากไปกว่าที่จุดที่เป็น critical pressure ratio หรือเป็นไปตามทฤษฎี Choked flow condition ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (1) และ (2) ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ปั๊มสุญญากาศตัวที่มีค่า Pressure คือ -85 kPa และมีอัตราการไหลคือ 40 L/min

$$\frac{P_T}{P_0} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 0.528, @ \gamma = 1.4 \quad (1)$$

$$\dot{m}_{air} = \frac{C_D A_T P_0}{\sqrt{RT_0}} \cdot \gamma^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}} \quad (2)$$

เมื่อ C_D คือ Discharge Coefficient, A_T คือ Throat Area (Minimum flow area or Restriction area, mm²), P_0 คือ Upstream Pressure (Pa), T_0 คือ Upstream Temperature (Kelvin), P_T คือ Pressure Downstream of the Throat (or the restriction, Pa), γ คือ specific heat ratio, R คือ Gas Constant

ในส่วนของท่อดูดอากาศได้ออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้าท่อดูดอากาศประมาณ 11 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของ Throat ประมาณ 2 มิลลิเมตร โดยต้องขับรถจักรยานยนต์ที่ความเร็วประมาณ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเพื่อให้ความเร็วลมที่เข้ามายังหน้าท่อดูดอากาศมีความเร็วที่เหมาะสมตามทฤษฎี Isokinetic Sampling [19] ซึ่งแผนผังทำงานของระบบดูดเก็บตัวอย่างทั้งหมดแสดงดัง **รูปที่ 4** และติดตั้งเครื่องมือวัดไว้ที่ตำแหน่งล่อน้ำดัง **รูปที่ 5**



รูปที่ 4 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 5 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด

2.4 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบโดยการขับจักรยานยนต์ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยมีผู้ขับขี่น้ำหนัก 100 kg และมีคนนั่งซ้อนด้านหลังหนัก 52 kg โดยกำหนดตัวแปรในการทดลองดังต่อไปนี้

1. ทดสอบการเบรกจากความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จนรถจักรยานยนต์หยุดนิ่ง โดยทำการทดสอบเป็นสองลักษณะการเบรกลำตัวคือ ลักษณะแรกจะเบรกให้รถจักรยานยนต์หยุดภายใน 5 วินาทีสำหรับเบรกเบาและหยุดภายใน 2 วินาทีสำหรับเบรกหนัก

2. ทดสอบโดยสภาพอากาศที่แตกต่างกันโดยทดสอบในช่วงเช้าที่อุณหภูมิประมาณ 28°C และมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 87% เปรียบเทียบกับการทดสอบในช่วงบ่ายที่มีอุณหภูมิประมาณ 33°C และมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 64%

3. ทดสอบโดยทำการเพิ่มภาระโหลด (Payload) ของรถจักรยานยนต์ประมาณ 20% โดยจะเพิ่มจากน้ำหนักรถจักรยานยนต์จาก 152 กิโลกรัมเป็น 182 กิโลกรัม (ผู้ขับขี่หนัก 100 kg เท่าเดิม แต่เปลี่ยนผู้โดยสารจากน้ำหนัก 52 kg เป็น 82 kg)

4. ทดสอบพื้นผิวถนนที่แตกต่างกัน ได้แก่ พื้นผิวถนนที่เป็นยางมะตอยและพื้นผิวถนนที่เป็นเลนจักรยานที่มีลักษณะเป็นผิวที่ค่อนข้างขรุขระและปริมาณฝุ่นค่อนข้างมากกว่าถนนที่เป็นยางมะตอย

โดยตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวมาได้ถูกกำหนดไว้ใน การทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

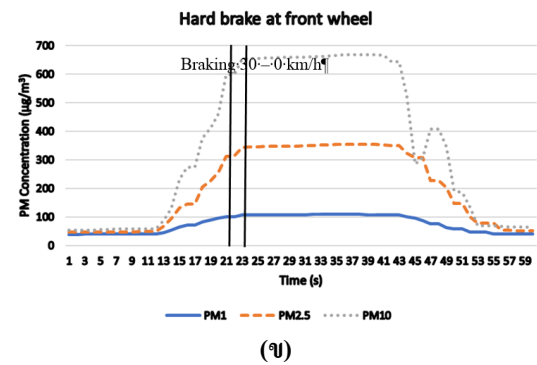
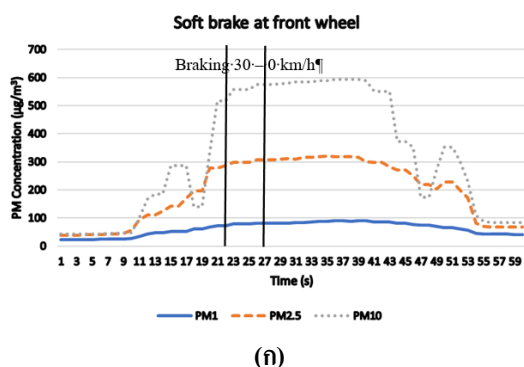
ตารางที่ 2 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปร	ลักษณะการทดสอบ
ลักษณะการเบรก	เบรกเบา
	เบรกหนัก
สภาพแวดล้อม	ช่วงเช้า
	ช่วงบ่าย
น้ำหนักของรถจักรยานยนต์ (Payload)	152 กิโลกรัม
	182 กิโลกรัม
พื้นผิวถนน	ผิวเรียบ
	ผิวขรุขระ

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

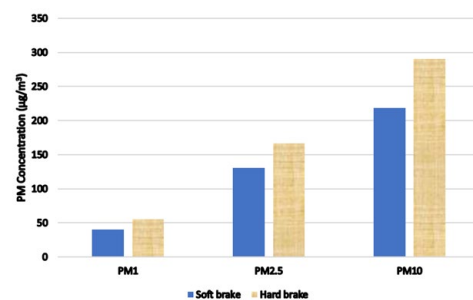
3.1 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาณ PM ที่วัดได้จากลักษณะของการเบรกที่แตกต่างกัน

การทดสอบนี้เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของการเบรกที่แตกต่างกัน เพื่อดูพฤติกรรมและปริมาณของฝุ่นอนุภาคโดยจะแบ่งการเบรกเป็น 2 รูปแบบคือการเบรกแบบเบา (Soft brake) และการเบรกแบบหนัก (Hard brake) โดยการเบรกแบบเบานั้นจะทำให้ความเร็วของรถจักรยานยนต์นั้นลดลงอย่างช้า ๆ โดยจะเริ่มหยุดรถที่วินาทีที่ 22 และให้รถหยุดในวินาทีที่ 27 (รูปที่ 6(ก)) ส่วนการเบรกแบบแรงนั้นจะเป็นการลดความเร็วของรถจักรยานยนต์อย่างกะทันหัน โดยจะเริ่มหยุดรถที่วินาทีที่ 20 และให้รถหยุดในวินาทีที่ 22 (รูปที่ 6(ข)) และนำมาเปรียบเทียบกันไปจนถึงวินาทีที่ 60 จากการทดลองจะได้พฤติกรรมกาเกิด PM ต่อการเบรกแบบเบาและแบบหนักดังรูปที่ 6



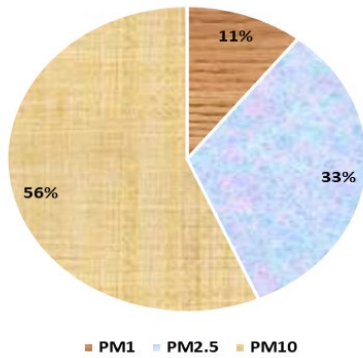
รูปที่ 6 พฤติกรรมกาเบรกที่ส่งผลต่อ PM: (ก) การเบรกแบบเบา (ข) การเบรกแบบหนัก

จากนั้นทำการหาพื้นที่ใต้กราฟของผลการทดลองและหาค่าเฉลี่ยออกมาเพื่อประเมินปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยสุทธิของฝุ่นอนุภาคที่มีการฟุ้งกระจายขึ้นมาจากรถจักรยานยนต์และได้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยสุทธิดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของ PM สุทธิจากการเบรกแบบเบาและแบบหนัก

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าในการเบรกแบบหนักนั้นมีการตะกุกฝุ่นขึ้นมาจากพื้นและรุนแรงกว่าการเบรกแบบเบาที่เป็นการค่อย ๆ ลดความเร็วลงจนกระทั่งรถหยุดนิ่งอยู่ประมาณ 30% โดยมีฝุ่นอนุภาค $PM_{2.5}$ และ PM_{10} เป็นหลักดังรูปที่ 8 ซึ่งสอดคล้องกับงานของ [12] จึงสรุปได้ว่าการเบรกหนักทำให้ฝุ่นจากพื้นถูกยางของรถจักรยานยนต์ถูกตะกุกขึ้นมาอย่างรุนแรงและฉับพลัน ส่งผลให้มีปริมาณความเข้มข้นของ PM โดยสุทธิออกมาได้มากกว่าการเบรกแบบเบาที่มีลักษณะการหยุดรถที่นุ่มนวลกว่า

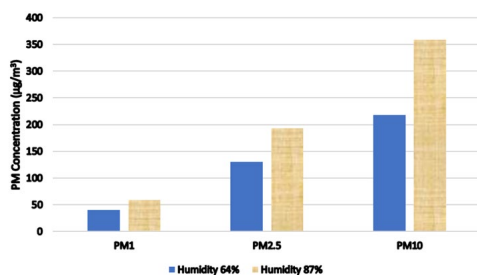


รูปที่ 8 อัตราส่วนของ PM_1 , $PM_{2.5}$ และ PM_{10} จากการเบรก

สำหรับการทดลองต่อ ๆ ไปนั้น ผู้วิจัยจะใช้การเบรกแบบเบาเป็นลักษณะการทดสอบหลักเนื่องจากการเบรกแบบเบา นั้นสอดคล้องกับการใช้รถจักรยานยนต์ในชีวิตประจำวันมากกว่าการเบรกแบบหนัก

3.2 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาณ PM ที่วัดได้เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

การทดสอบนี้เป็นการทดลองเพื่อดูปัจจัยเรื่องอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งวันว่าจะส่งผลต่อการฟุ้งกระจายของ PM หรือไม่ อย่างไร โดยจะแบ่งช่วงเวลาการทดลองเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงเช้าและช่วงบ่าย ซึ่งได้ผลการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของ PM สุทธิจากสภาพอากาศที่แตกต่างกัน

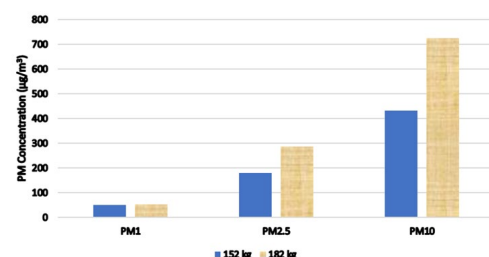
จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 9 พบว่าถ้าความชื้นในอากาศสูงจะส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของ PM โดยสุทธิที่วัดได้ โดยมีค่าสูงกว่าสภาพอากาศที่มีความชื้นต่ำกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ในสภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์สูง ในการทดสอบพบว่าปริมาณความเข้มข้นของ PM โดยสุทธิที่ฟุ้งกระจาย

ขณะขับที่สูงกว่าสภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่าและมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า โดยคาดว่าอาจเป็นผลของละอองน้ำในอากาศ เนื่องด้วยสาเหตุที่สามารถสันนิษฐานออกมาเป็น 2 กรณีดังนี้

1. ตัวเซนเซอร์นั้นได้วัดอนุภาคน้ำขนาดเล็กที่อยู่ในอากาศเข้ามาด้วย จึงส่งผลให้เมื่อทำการวัดในสภาวะที่อากาศมีความชื้นสูงทำให้เครื่องมือวัดสามารถวัดปริมาณฝุ่นอนุภาคออกมาได้ในปริมาณที่สูง
2. อนุภาคของน้ำที่มีอยู่ในอากาศมากในสภาวะที่อากาศมีความชื้นสูง ได้จับตัวกับฝุ่นอนุภาคและส่งผลให้ฝุ่นอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าที่ควรจะเป็น จึงทำให้ค่าปริมาณโดยสุทธิของฝุ่นละอองที่วัดออกมาได้ในสภาวะที่มีความชื้นสูงจะมีค่าสูงกว่าสภาวะที่มีความชื้นเป็นปกติอย่างเห็นได้ชัดเจน

3.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ PM จากการปรับเปลี่ยนน้ำหนักที่บรรทุกบนรถจักรยานยนต์

การทดสอบนี้เป็นการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนน้ำหนักบรรทุก (Payload) ระหว่างผู้โดยสารที่มีน้ำหนัก 52 กิโลกรัม และ 82 กิโลกรัม ทำให้รถจักรยานยนต์มี Payload เมื่อรวมผู้ขับขี่และผู้โดยสาร อยู่ที่ 152 และ 182 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างระหว่างผู้โดยสารทั้งสองคนจึงมีค่าอยู่ที่ 30 กิโลกรัม เพื่อสังเกตถึงความเปลี่ยนแปลงของปริมาณของ PM ที่ออกมาจากการขับขี่ โดยได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10



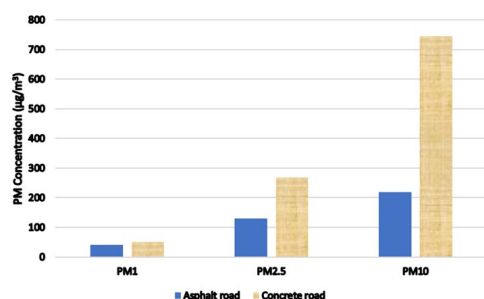
รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของ PM สุทธิจากน้ำหนักการบรรทุกที่แตกต่างกัน

ปริมาณความเข้มข้นของ PM_1 ที่ออกมาจากรถจักรยานยนต์โดยสุทธินั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่หาก

พิจารณาไปที่ $PM_{2.5}$ และ PM_{10} จะแปรผันโดยตรงกับการเพิ่มน้ำหนักบนรถจักรยานยนต์อย่างชัดเจน โดยสามารถสรุปได้ว่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมีผลโดยตรงกับปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่ถูกตะกอยขึ้นมาจากรถจักรยานยนต์ กล่าวคือเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองจะมีค่าสูงขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [14],[15]

3.4 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาณ PM ที่วัดได้ในสภาพพื้นผิวของถนนที่ต่างกัน

การทดสอบนี้เป็นการทดลองบนพื้นผิวถนนที่มีสภาพแตกต่างกัน 2 แบบ ได้แก่ ถนนยางมะตอยที่มีลักษณะเรียบและมีช่องว่างเล็กน้อยระหว่างตัวยางมะตอย กับ ถนนปูนที่มีลักษณะขรุขระ มีช่องว่างที่ใหญ่กว่า มีเศษกรวดและทรายเยอะ จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเบรกรถจักรยานยนต์บนพื้นผิวถนนแบบปูน ปริมาณฝุ่นอนุภาคของทั้ง $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าพื้นผิวถนนยางมะตอยอย่างเห็นได้ชัดเจน ในขณะที่ PM_1 มีค่าค่อนข้างคงที่ดังแสดงในรูปที่ 11 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวถนนแบบปูนมีช่องว่างค่อนข้างกว้างและมากจึงมีการสะสมของเศษกรวดและทรายที่มีอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่า 2.5 ไมครอนอยู่ค่อนข้างมากเช่นกัน เมื่อรถจักรยานยนต์วิ่งผ่านจะส่งผลให้มีฝุ่นฟุ้งกระจายขึ้นมามากขึ้นเมื่อเทียบกับพื้นผิวถนนยางมะตอย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการขับเคลื่อนพื้นผิวถนนที่มีลักษณะพื้นผิวขรุขระจะมีปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่ถูกตะกอยขึ้นมามากกว่าการขับเคลื่อนพื้นผิวถนนที่มีลักษณะเรียบอย่างชัดเจน



รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของ PM สุทธิจากพื้นผิวถนนที่ต่างกัน

4. สรุป

งานวิจัยเรื่องอิทธิพลของปัจจัยต่อการปล่อยฝุ่นละอองที่ไม่ได้มาจากไอเสียของรถจักรยานยนต์สามารถสรุปได้ดังนี้

I. ฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายจากการเบรกของรถจักรยานยนต์ประมาณครึ่งหนึ่งเป็น PM_{10} ส่วน $PM_{2.5}$ มีประมาณ 30% PM_1 คิดเป็นประมาณ 10% ของปริมาณ PM ที่วัดได้ทั้งหมด

II. เมื่อมีการเบรกที่รุนแรงจะทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของ PM มากขึ้น

III. สภาพอากาศที่แตกต่างกันส่งผลต่อการสะสมและฟุ้งกระจายของ PM ในอากาศ โดยเมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะส่งผลให้ปริมาณ PM ที่วัดได้ขณะเบรกมีค่าสูงขึ้น

IV. เมื่อมีการเบรกรถจักรยานยนต์ที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณการฟุ้งกระจายของ PM ที่วัดได้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

V. สภาพถนนส่งผลต่อการฟุ้งกระจายของ PM โดยเมื่อพื้นผิวถนนขรุขระจะส่งผลให้การฟุ้งกระจายของ PM เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ นนทชัย พิเชิธรสวัสดิ, พชรพล นกอยู่ และ พีรวัส มหิทธิหาญ สำหรับการเก็บข้อมูลผลการทดลอง ผู้เขียนขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนทางการเงิน ผ่านทุนวิจัยรหัสโครงการวิจัยเลขที่ 62/09/ME/D.Eng

เอกสารอ้างอิง

- [1] European Environmental Agency, "Air Quality in Europe-2014 Report," EEA, Copenhagen, Denmark, 5/2014, Aug. 3, 2015. [Online] Available: <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2014>.
- [2] U. Gehring, R. Beelen, M. Eeftens, et al, "Particulate matter composition and respiratory health: the

- PIAMA Birth Cohort Study,” *Epidemiology*, vol. 26, no. 3, 2015, doi: 10.1097/EDE.0000000000000264.
- [3] R. O. Salonen, A. I. Hälinen, A. S. Pennanen et al, “Chemical and in vitro toxicologic characterization of wintertime and springtime urban-air particles with an aerodynamic diameter below 10 mm in Helsinki,” *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*, vol. 30, no. 2, pp. 80–90.
- [4] B. Brunekreef, B. Forsberg, “Epidemiological evidence of coarse airborne particles on health,” *European Respiratory Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 309–318, doi: 10.1183/09031936.05.00001805.
- [5] P. G. Boulter, “A Review of Emission Factors and Models for Road Vehicle Nonexhaust Particulate Matter,” TRL Limited, Berkshire, United Kingdom, PPR065, 2005.
- [6] A. Thorpe, R. M. Harrison, “Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review,” *Science of the Total Environment*, vol. 400, no. 1–3, pp. 270–282, 2008, doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.06.007.
- [7] M. Mathissen, V. Scheer, R. Vogt, T. Benter, “Investigation on the potential generation of ultrafine particles from the tire-road interface,” *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 34, pp. 6172–6179, 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.08.032.
- [8] V. R. J. H. Timmers and P. A. J. Archten, “Non-exhaust PM Emissions from Electric Vehicles,” *Atmospheric Environments*, vol. 134, pp. 10–17, 2016, doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.03.017.
- [9] R. M. Harrison, A. M. Jones, J. Gietl, J. Yin, D. C. Green, “Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to non-exhaust traffic particles derived from atmospheric measurements,” *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 12, pp. 6523–6529, 2012, doi: 10.1021/es300894r.
- [10] J. H. J. Hulskotte, G. D. Roskam, H. A. C. Denier van der Gon, “Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors,” *Atmospheric Environment*, vol. 99, pp. 436–445, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.007.
- [11] Transport Statistics, Transport Statistics Sub-Division, Aug. 5, 2020, [Online]. Available: <https://web.dlt.go.th/statistics/>
- [12] H. Hagino, M. Oyama and S. Sasaki, “Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles,” *Atmospheric Environment*, vol. 131, pp. 269–278, 2016, doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.02.014
- [13] H. German, T. -A. Berry, W. Shannon and P. David, “Temperature and Humidity Effects on Particulate Matter Concentrations in a Sub-Tropical Climate during Winter,” in *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*, 2017, pp. 41–49 doi:10.7763/IPCBE.2017.V102.10.
- [14] A. Simons, “Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, no. 9, pp. 1–5, 2013, doi: 10.1007/s11367-013-0642-9.
- [15] J. Gillies, V. Etyemezian, H. Kuhns, D. Nikolic and D. A. Gillette, “Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions,” *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 13, pp. 2341–2347, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.05.064.
- [16] Determinants of rear-of-wheel and tire-road wear particle emissions by light-duty vehicles using on-road and test track experiments
- [17] *Choked flow*, Nertrium, 2015 [Online]. Available: <https://neutrrium.net/fluid-flow/choked-flow/>

-
- [18] R. Trentini, E. Guilherme, C. Alexandre, S. S. Antonio, "Modeling and parameter identification of a pneumatic pressure valve using least squares and particle swarm optimization methods," in *22nd International Congress of Mechanical Engineering*, SP, Brazil, Nov. 3–7, 2013.
- [19] Don't Be Fazed By Multiphase Sampling, S. Andrew , 2012 [Online]. Available: <https://www.chemicalprocessing.com/articles/2012/don-t-be-fazed-by-multiphase-sampling/>

การพัฒนาตัวแบบต้นทุนในการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะบนพื้นฐาน ด้วยเทคโนโลยีบล็อกเชน

The Developing Cost Model for Electric Public Transport Vehicles Charging Based on Blockchain Technology

กัณต์ธมน สุขกระจ่าง*

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา เขตบึงช้าง เมือง สงขลา 90000

Kantamon Sukkrajang

Faculty of Industrial Technology Songkhla Rajabhat University, Khoa-Roob-Chang ,Muang,

Songkhla, 90000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: kantamon.su@skru.ac.th

Received: Aug 26, 2021; Revised: Jan 27, 2022; Accepted: Jan 31, 2022

บทคัดย่อ

ในอนาคตการเพิ่มขึ้นของยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจในการเลือกสถานีอัดประจุไฟฟ้า เนื่องจากสถานีอัดประจุยังมีไม่เพียงพอกับความต้องการต่อจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้าเป็นยานพาหนะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมประกอบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตอีกด้วย ผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญของการพัฒนาตัวแบบต้นทุนเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีบล็อกเชนในการตัดสินใจเลือกสถานีอัดประจุไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขของต้นทุนด้านราคา ระยะทาง เวลาในการเดินทาง และเวลาในการรอคอยของคิว ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดต้นทุน ดังนั้นผู้ขับขี่ควรลดต้นทุนที่ไม่จำเป็น เพิ่มความเร็วในการตัดสินใจ ตลอดจนมีความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของข้อมูล เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยสำคัญที่สุดในการตัดสินใจคือปัจจัยด้านเวลารอคอยในคิว ถือว่าเป็นต้นทุนที่เสียเปล่าแต่จำเป็นต้องเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามผู้ขับขี่ยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ ควรให้ความสำคัญกับทุกปัจจัย เพื่อต้นทุนรวมต่ำสุดของการเข้ารับบริการ

คำสำคัญ: ตัวแบบต้นทุน, การอัดประจุ, ยานยนต์ไฟฟ้า, เทคโนโลยีบล็อกเชน, แถวคอย, การจำลองสถานการณ์

Abstract

In the future, the rise of electric public transport vehicles influences on the decision to choose the charging station because the charging station is still insufficient to the demand for the number of electric public transport vehicles. Because the electric vehicles are friendly to the environment and the population rate has continued to increase so electric vehicles are essential for life as well. The researcher, therefore, sees the importance of developing a cost model to be applied to blockchain technology in decision making to choose a charging station under the conditions of the cost of price, distance, travel time, and waiting time of queues. These factors are important that cause cost. Therefore, the drivers should reduce unnecessary costs, speed up decision making and data is reliable

and secure for complying with the current fast-paced situation. The study found that the most important deciding factor is the waiting time of the line that considered as the waste of cost that needed to happen. However, motorists should pay attention to every factor for the lowest total cost of service.

Key words: Cost models, Charging, Electric Vehicles, Blockchain Technology, Queuing, Simulation

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกมีความต้องการพลังงานสีเขียว เพื่อลดสถานะแวดล้อมที่เป็นพิษทางอากาศ ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่สามารถก้าวสู่เส้นทางสีเขียว ที่สามารถพัฒนารูปแบบของกระบวนการอัดประจุให้สามารถเข้าถึงความน่าเชื่อถือได้ ในขณะที่เดียวกันจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะก็เริ่มเพิ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆ แต่ก็ยังมีอุปสรรคในเรื่องของการอัดประจุเมื่อเทียบกับรถยนต์เครื่องสันดาปซึ่งถือเป็นโครงสร้างในการชาร์จที่มีความสำคัญมาก ในการนำไปสู่ความท้าทายสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

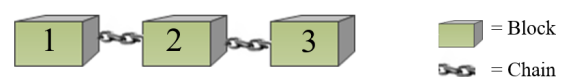
การเพิ่มขึ้นของยานยนต์ไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อตลาดสินใจในการเลือกสถานีอัดประจุ [1] เพื่อให้ได้ต้นทุนรวมต่ำที่สุดและสนองความต้องการของผู้บริโภคได้สูงสุด ซึ่งได้มีการศึกษาแพลตฟอร์มสำหรับการอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้าในรูปแบบพลังงานสมาร์ตกริด โดยนำเทคโนโลยีบล็อกเชนมาประยุกต์ใช้เพื่อลดค่าใช้จ่ายและสามารถค้นหาสถานีอัดประจุได้อย่างถูกต้อง และมีความน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังมีการนำเทคโนโลยีบล็อกเชนมาประยุกต์ใช้ในการเดินทางของรถแท็กซี่ [2] ในการรับ ส่งผู้โดยสาร

บทความนี้จะนำเสนอตัวแบบต้นทุนเพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกสถานีอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้เกิดต้นทุนรวมต่ำสุดภายใต้สถานการณ์ที่กำหนดขึ้น เช่น ปัจจัยด้านระยะทาง ราคา เวลาในการเดินทาง และเวลาในการรอคอยคิว ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้เกิดต้นทุนทั้งสิ้น ผู้วิจัยจึงได้นำเทคโนโลยีบล็อกเชนเข้ามาเป็นเครื่องมือเพื่อช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีความน่าเชื่อถือ ปลอดภัย และสามารถตรวจสอบได้ เนื่องจากใช้ระบบ Peer-to-Peer (P2P) ในการตรวจสอบข้อมูล [3] ส่งผลต่อความมีประสิทธิภาพของข้อมูลต่อไปในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. เทคโนโลยีบล็อกเชน (Blockchain Technology)

เทคโนโลยีบล็อกเชน (Blockchain Technology) คือระบบฐานข้อมูลแบบกระจายชนิดใหม่ ซึ่งจัดเก็บและบำรุงรักษารายการลงในบล็อก แต่ละบล็อกมีการแนบปีเวลาและเชื่อมต่อกับบล็อกก่อนหน้า [4] การทำงานของบล็อกเชนจะเป็นเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลแบบกระจาย (Distributed) [5] โดยเป็นรูปแบบการบันทึกข้อมูลที่รับประกันความปลอดภัย ข้อมูลที่ถูกบันทึกไปก่อนหน้านี้ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลง หรือแก้ไขได้ ซึ่งทุกผู้ใช้งานจะให้เห็นข้อมูลชุดเดียวกันทั้งหมด โดยใช้หลักการ Cryptography และความสามารถของ Distributed Computing เพื่อสร้างกลไกความน่าเชื่อถือ [6] และไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้ [7] บล็อกเชนได้มีการประยุกต์ใช้ในหลายๆ เรื่อง เช่น การเงิน ตลาดหุ้น การลงคะแนนเสียง และสัญญาอัจฉริยะ ตลอดจนการผลิตและการกระจายพลังงาน [3],[8] บล็อกเชนมีลักษณะการทำงานแบบ P2P ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานแบบกระจายอำนาจและเป็นการตัดสินใจโดยไม่มีหน่วยงานกลางใดๆ [9] ไม่มีการควบคุมของฝ่ายใด โดยปฏิบัติตามนโยบายที่ตกลงกันได้ (Consensus) ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ที่บล็อก แต่ละบล็อกจะเชื่อมโยงเข้าด้วยกันโดยมีโซ่ (chain) เป็นตัวเชื่อมแต่ละบล็อก เพื่อสร้างเป็นบล็อกเชน [10] ดังรูปที่ 1

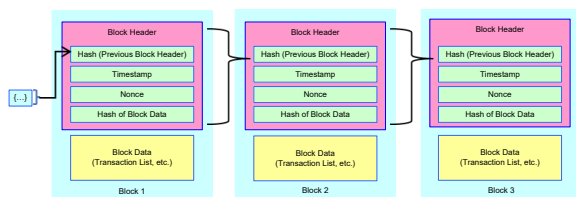


รูปที่ 1 ลักษณะของ Blockchain Technology

จากที่กล่าวมาข้างต้น บล็อกเชนจะจัดเก็บข้อมูลแบบกระจายศูนย์ (Distributed Ledger) โดยทุกข้อมูลที่มีการบันทึกในบล็อกจะมีการเชื่อมโยงกันทั้งระบบ และหากมี

การบันทึกธุรกรรมใหม่เกิดขึ้น จะมีการประกาศให้ทุกๆ โหนดหรือทุกเพียร์รับรู้ข้อมูลนั้น ซึ่งทุกเครือข่ายมีความเท่าเทียมกันในการรับรู้ข้อมูล ไม่มีโหนดใดหรือเพียร์ใดเป็นตัวกลางในการจัดการข้อมูล ซึ่งยากต่อการฉ้อโกง เรียกการทำงานแบบนี้ว่า Peer-to-Peer [4]

บล็อกเชน มีองค์ประกอบที่สำคัญ ประกอบด้วย ชุดบรรจุข้อมูล (Block) หลักการจดจำทุกๆ ธุรกรรม (Chain) การกำหนดข้อตกลงร่วมกัน (Consensus) และการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Validation) โดยที่ข้อมูลในแต่ละ Block จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Block data และ Block Header [6] ในการเชื่อมโยงกันของแต่ละบล็อกจะมีการเชื่อมโยงโดย Hash ของ Block ก่อนหน้า ดังนั้น ในการสร้างบล็อก หากบล็อกที่เผยแพร่ก่อนหน้านี้มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้บล็อกที่ต่อกันทั้งหมดเปลี่ยนแปลงไปด้วย สามารถตรวจจับได้ว่าการฉ้อโกง และจะมีการปฏิเสธบล็อกที่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ห่วงโซ่ของบล็อก [11]

2.2. ระบบแถวคอย

ปัญหาในระบบแถวคอยที่พบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น การรอรถโดยสาร รถไฟฟ้า โรงพยาบาล หรือรถรอคิวเติมน้ำมัน เป็นต้น และในส่วนของอุตสาหกรรมจะมีการรอคอยเกิดขึ้นในอุตสาหกรรม เช่น การรอวัตถุดิบหรือส่วนประกอบในการผลิต เป็นต้น [12]

ทฤษฎีแถวคอย (Waiting Line Theory หรือ Queuing Theory) ถูกพัฒนาขึ้นโดยวิศวกรโทรศัพท์ชาวเดนมาร์กชื่อ A.K. Erlang ซึ่งได้ศึกษาปัญหาการรอคอยของระบบโทรศัพท์ ต่อมาทฤษฎีแถวคอยได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อศึกษาคุณลักษณะของแบบจำลองของระบบแถวคอยต่างๆ แถวคอยอาจเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการเข้าสู่ระบบมากกว่าอัตราการให้บริการ แต่แถวคอยก็อาจเกิดขึ้นได้ หากอัตราการเข้าสู่ระบบน้อยกว่าอัตราการให้บริการ ทั้งนี้เพราะมี

ความไม่แน่นอนของการเข้าสู่ระบบและการให้บริการ ดังนั้นการศึกษาทฤษฎีแถวคอยจึงช่วยให้สามารถคาดการณ์ลักษณะของแถวคอยได้ เช่น เวลาคอยโดยเฉลี่ยของลูกค้า จำนวนลูกค้าโดยเฉลี่ยในแถวคอย และสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจเกี่ยวกับระบบแถวคอยได้ เช่น ระบบควรมีผู้ให้บริการกี่คนจึงจะดีที่สุด โดยมีจำนวนผู้ให้บริการไม่มากจนเกิดการว่างงาน หรือไม่น้อยจนผู้เข้ารับบริการต้องรอเป็นเวลานาน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ทฤษฎีแถวคอยสามารถช่วยออกแบบระบบการให้บริการต่างๆ ให้ดีขึ้น และประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย [12]

บทความนี้ศึกษากรณีที่มีทรัพยากรให้บริการระบบไม่สามารถให้บริการได้ทันทีที่มีลูกค้าเข้ารับบริการ ซึ่งจะส่งผลให้มีการเกิดแถวคอย (Queue) ขึ้น กระบวนการแถวคอยโดยทั่วไปจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ คือ การมาถึงของวัตถุที่สนใจ กลุ่มประชากรผู้รับบริการ และส่วนการให้บริการ [12] ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีความสำคัญในระบบแถวคอยตามกรณีไป ผู้วิจัยประยุกต์ใช้โปรแกรม Arena Simulation เพื่อช่วยในจำลองสถานการณ์จริงในการวิเคราะห์แถวคอย ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การวิเคราะห์ระบบแถวคอย การเข้าใช้บริการจุดชำระค่าบริการกระแสไฟฟ้าภาครัฐ [13] การตรวจสอบตู้คอนเทนเนอร์ [14] การตรวจสอบความปลอดภัยของสนามบิน [15] เป็นต้น

2.3. ยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle หรือ EV) คือ ยานยนต์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเดียวย โดยไม่มีเครื่องยนต์มาช่วยผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้านั้นมีต้นทุนสูงกว่าการขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมัน เนื่องจากมีการเก็บไฟฟ้าสำรองไว้ในแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีราคาแพงของยานยนต์ไฟฟ้า

สำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าหรือ EV แบตเตอรี่ส่วนใหญ่ก็เป็นแบตเตอรี่ชนิดเดียวกันกับแบตเตอรี่ที่ชาร์จขนาดเล็ก (เช่น ถ่านชาร์จ) เพียงแต่จะออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็กมาต่ออนุกรมรวมกันเพื่อที่จะเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น [16]

ในอนาคตอันใกล้รถยนต์ไฟฟ้ารวมถึงรถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด จะครองตลาดรถยนต์ทั่วโลก ในปี 2563 ยอดขายรถยนต์ใหม่ครึ่งหนึ่งจะเป็นรถ EV หรือรถ HEV แต่เนื่องจากเทคโนโลยีแบตเตอรี่ยังคงมีราคาแพง และคาดว่าจะอีกไม่นาน จะมีสถานีชาร์จที่มีอยู่ทั่วประเทศ จากการสำรวจของศูนย์วิจัยกสิกรไทย พบว่า ยอดขายรถยนต์กลุ่มรถยนต์ไฟฟ้า (ประกอบด้วยรถยนต์ไฮบริดหรือ HEV และรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าล้วนจากแบตเตอรี่ หรือ BEV) มีสัดส่วนยอดขายถึง 55% ของปริมาณยอดขายรถยนต์รวม[17] ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 แบบดังรูปที่ 3 [16] คือ

1. ระบบ Normal Charge คือ การชาร์จแบตเตอรี่ด้วยไฟกระแสสลับ AC โดยปกติระบบ Normal Charge จะชาร์จแบตเตอรี่ EV ขนาด 24 กิโลวัตต์ชั่วโมง และมีขนาดออนบอร์ดชาร์จเจอร์ที่ 3 กิโลวัตต์ ได้เต็ม 100% ในระยะเวลา 8 ชั่วโมงซึ่งระบบนี้นิยมติดตั้งเพื่อการชาร์จไฟแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเฉพาะบ้านพักอาศัย

2. ระบบ Quick Charge คือ การชาร์จโดยใช้อุปกรณ์พิเศษที่เรียกว่า EV Charger ซึ่งส่วนใหญ่จะติดตั้งให้บริการตามสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า โดยอุปกรณ์นี้จะแปลงไฟกระแสสลับ AC เป็นไฟฟ้ากระแสตรง DC จากนั้นประจุไฟ DC ที่แปลงได้เข้าแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งระยะเวลาในการประจุชาร์จไฟ จะเร็วมากมีกำลังชาร์จอยู่ที่ 50 กิโลวัตต์ สามารถชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าขนาด 24 กิโลวัตต์ชั่วโมงเต็ม 100% โดยใช้ระยะเวลาไม่เกินครึ่งชั่วโมงเท่านั้น

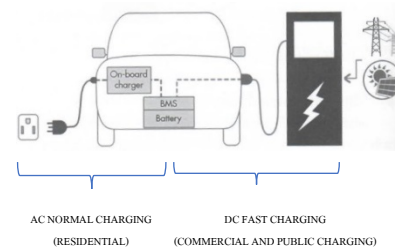
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1.ตัวแบบต้นทุนในการอัดประจุ

จากการศึกษาบทความเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้าบนพื้นฐานของ Blockchain [1] พบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญในการตัดสินใจเลือกสถานีอัดประจุ คือ ราคา ระยะทาง และเวลาการรอกอยในคิว และเวลาการอัดประจุ (Service Time)

นอกจากปัจจัยดังกล่าวแล้ว ยังมีปัจจัยอีกมากมาย เช่น เวลาการรอกอยที่สถานีอัดประจุ ตารางการอัดประจุ [18]

สถานะการคงอยู่ของแบตเตอรี่ ความคาดหวังในการตัดสินใจ การจราจรแออัด สถานการณ์ระหว่างทาง [19] โดยปัจจัยดังกล่าวผู้วิจัยจะนำมาพัฒนาเพื่อเป็นแนวทางในงานวิจัยต่อไป



รูปที่ 3 ระบบชาร์จไฟแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบ Normal Charge และ Quick Charge

ดังนั้น ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญของระยะเวลาที่รอกอยในคิวก่อนการเข้าอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดต้นทุนอีกปัจจัยหนึ่ง [18] จึงได้เสนอแนวคิดเพื่อพัฒนาตัวแบบของต้นทุนรวมที่จะเกิดขึ้นในการอัดประจุเพิ่มเติมจากบทความเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้าบนพื้นฐานของ Blockchain [1] โดยเพิ่มปัจจัยด้านระยะเวลาในการรอกอยก่อนเข้ารับบริการ (C_{wq}) ดังนี้

คำจำกัดความ [1]

TC	=	ต้นทุนรวม (บาท)
C_c	=	ต้นทุนของการอัดประจุ (บาท)
C_t	=	ต้นทุนของระยะทาง (บาท)
C_w	=	ต้นทุนเวลาการอัดประจุ (บาท)
C_f	=	ต้นทุนของการเข้าคิวชาร์จ (บาท)
C_{wq}	=	ต้นทุนการรอกอยในคิว (บาท)
BC	=	ความจุแบตเตอรี่ (กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง)
%SOC	=	สถานะคงเหลือของประจุก่อนมาถึงสถานี (เปอร์เซ็นต์)
N	=	จำนวนสถานีอัดประจุ (สถานี)
n	=	จำนวนหัวอัดประจุ (หัว)
A	=	การใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง)
D_n	=	ระยะทางระหว่างสถานีอัดประจุกับตำแหน่งของยานยนต์ไฟฟ้า (กิโลเมตร)

- P_n = ราคาประจุไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)
 P_t = ราคาการเสียเวลาในการเดินทาง (บาทต่อชั่วโมง)
 คำจำกัดความ [1]
 P_w = ราคาของการเสียเวลาของการรอคอยระหว่างการอัดประจุ (บาทต่อชั่วโมง)
 P_{wq} = ราคาของการรอคอยในคิว (บาทต่อชั่วโมง)
 V = อัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

$$TC = C_c + C_t + C_w + C_f + C_{wq} \quad (1)$$

$$C_c = [(100 - \%SOC) * BC + A * D_n] * P_n \quad (2)$$

$$C_t = \left(\frac{D_n}{V} * P_t\right) \quad (3)$$

$$C_w = \left(\frac{(100 - \%SOC) * BC + A * D_n}{R}\right) * P_w \quad (4)$$

$$C_{wq} = \frac{L_q}{\lambda} * P_{wq} \quad (5)$$

จากสมการที่ (1) แสดงต้นทุนรวมของยานยนต์ไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจากความต้องการในการอัดประจุ จนกระทั่งได้ประจุไฟฟ้าตามความต้องการ และจากสมการที่ (5) แสดงต้นทุนด้านเวลาของรถยนต์ไฟฟ้าที่อยู่ในระบบแถวคอย และรอรับบริการอัดประจุไฟฟ้า โดยจะหาความสัมพันธ์ระหว่าง W , W_q , L และ L_q และกำหนดให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองแถวคอย ดังนี้

สัญลักษณ์ ความหมาย

- λ อัตราการมาถึงโดยเฉลี่ย (จำนวน/หน่วยเวลา)
 μ อัตราการให้บริการโดยเฉลี่ย (จำนวน/หน่วยเวลา)
 L จำนวนลูกค้าที่คาดว่าจะมีในระบบ
 L_q จำนวนความยาวของแถวคอยที่คาดว่าจะมี
 W เวลาที่คาดว่าจะลูกค้าแต่ละคนต้องคอยอยู่ในระบบรวมเวลาที่รับบริการ
 W_q เวลาที่คาดว่าจะลูกค้าแต่ละคนต้องคอยอยู่ในแถว
 R จำนวนรอบที่เหมาะสมในการทำซ้ำ
 R_0 จำนวนรอบเบื้องต้นในการทำซ้ำ
 H_0 ค่าคลาดเคลื่อน (Half Width) จากจำนวนรอบการทำซ้ำเบื้องต้น
 h ค่าคลาดเคลื่อน (Half Width) ที่ยอมรับ

การศึกษานี้ผู้วิจัยคำนวณจำนวนรอบในการทำซ้ำของแบบจำลองที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อน (Half width) อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งการสร้างแบบจำลองในครั้งนี้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของเวลารอคอยในแถวคอยเฉลี่ย ไม่เกินร้อยละ 5 และใช้เป็นตัวแทนจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยจำนวนรอบที่เหมาะสม [20] โดยใช้โปรแกรม Arena เพื่อช่วยในจำลองสถานการณ์ และได้วิเคราะห์การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งการแจกแจงของการเข้าสู่ระบบของลูกค้าจะเป็นแบบปัวส์ซอง [12] แสดงสมการได้ดังนี้

1. จำนวนลูกค้าที่รอในระบบ

$$L = \frac{\lambda}{(\mu - \lambda)} \quad (6)$$

2. จำนวนลูกค้าเฉลี่ยที่รอในแถวคอย

$$L = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (7)$$

3. เวลาที่ลูกค้าแต่ละรายอยู่ในระบบ

$$W = \frac{L}{\lambda} \quad (8)$$

4. เวลาที่ลูกค้าแต่ละรายอยู่ในแถวคอย

$$w_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (9)$$

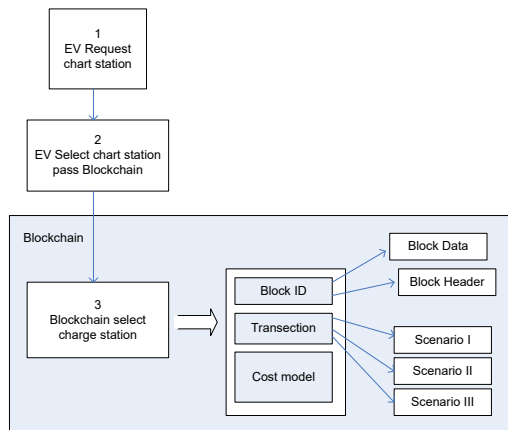
5. จำนวนรอบที่เหมาะสม

$$R = R_0 \frac{h_0^2}{h^2} \quad (10)$$

3.2.การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนในการตัดสินใจในการเลือกสถานีอัดประจุ

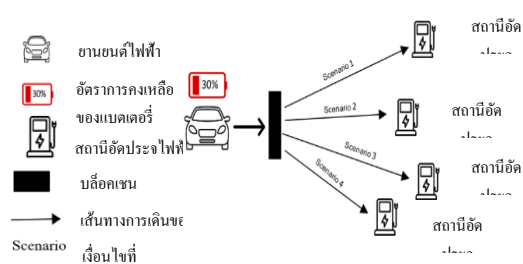
ส่วนนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงตัดสินใจในการเลือกสถานีอัดประจุที่อยู่บนพื้นฐานการตัดสินใจของบล็อกเชน โดยบล็อกเชนจะพิจารณาเลือกสถานีอัดประจุนยนต์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขด้านราคา ระยะทาง การคงเหลือของแบตเตอรี่ก่อนเข้าอัดประจุ การรอคอยอัดประจุ [1] และ

การรอคอยในคิวเพื่ออัดประจุ ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ทำให้เกิดต้นทุนทั้งสิ้น ดังนั้นเพื่อสร้างความพึงพอใจของผู้ขับขี่ยานยนต์ไฟฟ้า ผู้วิจัยจึงพัฒนาตัวแบบที่ใช้ในการตัดสินใจในการเข้าอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้าให้มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด เพื่อสร้างความคุ้มค่าให้กับผู้ขับขี่ภายใต้สถานการณ์ของการตัดสินใจที่อยู่บนพื้นฐานการทำงานของบล็อกเชนแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างการทำงานของบล็อกเชนภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

จากรูปที่ 4 แสดงโครงสร้างการทำงานของบล็อกเชนภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด จากรูปอธิบายได้ว่ายานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะมีความต้องการในการอัดประจุ และทำการร้องขอเข้ารับการอัดประจุที่สถานี โดยบล็อกเชนจะพิจารณาและตัดสินใจเลือกสถานีอัดประจุ ภายใต้เงื่อนไขที่ผู้วิจัยได้



รูปที่ 5 เส้นทางของสถานีอัดประจุไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไข

จากรูปที่ 5 ยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ มีความต้องการอัดประจุไฟฟ้า ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้ามีอัตราการคงเหลือของแบตเตอรี่ 30% โดยบล็อกเชนจะทำการตัดสินใจเลือก

สถานีอัดประจุภายใต้เงื่อนไขด้านราคา ระยะทาง เวลาการรอคอยในคิว และเวลาการอัดประจุ (Service Time)

4. สถานการณ์จำลอง

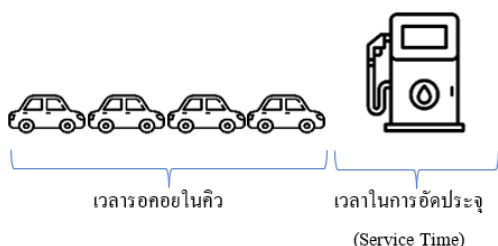
การตัดสินใจเลือกสถานีอัดประจุของยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ มีปัจจัยที่มีส่วนช่วยลดต้นทุนในการอัดประจุ เช่น ด้านราคา ระยะทาง เวลาในการเดินทาง และการรอคอยในคิวก่อนได้รับการอัดประจุ และเวลาการอัดประจุซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุน (แสดงดังรูปที่ 6) ดังนั้น ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญจึงประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนเข้ามาช่วยในการตัดสินใจเลือกสถานีอัดประจุ เพื่อก่อให้เกิดความพึงพอใจสูงสุดในการเข้ารับบริการของผู้ขับขี่ ดังนั้น ผู้วิจัยได้จำลองสถานการณ์ขึ้น เพื่อเป็นแนวทางการคาดการณ์ในการตัดสินใจหากเกิดสถานการณ์จริงในอนาคตต่อไปได้ดังนี้

1. Tesla คือ ยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ มีความจุของแบตเตอรี่ 90 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และสามารถวิ่งได้ 473 กิโลเมตร
2. อัตราความเร็วในการวิ่ง 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
3. ต้นทุนในการเดินทางและต้นทุนเวลาการอัดประจุ 20.83 บาทต่อชั่วโมง [1]
4. ยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ มีปริมาณพลังงานคงเหลือ 30 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง
5. ต้นทุนของการเช่าหัวชาร์จ (แบบ wall connector) มีราคา 4 บาทต่อคัน [21]
6. การเข้ารับบริการเป็นแบบแบบปั๊มของ มีช่วงเวลาดำเนินการมาถึง (การมาถึงของยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10 นาที และมีการให้บริการอีกไฟแนนเชียล (เวลาในการอัดประจุ) มีเฉลี่ยเท่ากับ 30 นาที
7. ผู้วิจัยได้สมมติสถานการณ์ไว้ 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 สถานีอัดประจุมีจำนวน 3 หัวอัดประจุ มี 4 สถานี (สถานีที่ 5-8)

กรณีที่ 2 สถานีอัดประจุมีจำนวน 6 หัวอัดประจุ มี 4 สถานี (สถานีที่ 1-4)

8. จากการสมมติสถานการณ์ทั้ง 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 สถานีอัดประจุมีจำนวน 3 หัวอัดประจุ ทำซ้ำทั้งหมด 1,098 รอบ ได้เวลาเฉลี่ยในแถวคอยเท่ากับ 34.64 นาที มีต้นทุนในการรอคอยเท่ากับ 721.67 บาท (ใช้ในการคำนวณสถานีที่ 5-8) และกรณีที่ 2 สถานีอัดประจุมีจำนวน 6 หัวอัดประจุ ทำซ้ำทั้งหมด 5,225 รอบ ได้เวลาเฉลี่ยในแถวคอยเท่ากับ 0.097 นาที มีต้นทุนในการรอคอยเท่ากับ 2.02 บาท (ใช้ในการคำนวณสถานีที่ 1-4) และทั้ง 2 กรณีมีจำนวนการทำซ้ำเบื้องต้นของแบบจำลอง 10 รอบ
9. กำหนดในช่วงเวลาในการทำงานของแบบจำลอง ในช่วงเวลา 6.00-22.00 น.



รูปที่ 6 เวลาการรอคอยในคิว และเวลาการอัดประจุ

5. สรุปผล

จากตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า

1. สถานีอัดประจุไฟฟ้าที่ 1 สถานีอัดประจุไฟฟ้าที่ 2 มีปัจจัยด้านราคาเท่ากัน แต่ระยะทางต่างกัน ยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะตัดสินใจเลือกระยะทางที่สั้นที่สุด เนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่า (การตัดสินใจอยู่ภายใต้เงื่อนไขของบล็อกเชน)
2. สถานีอัดประจุไฟฟ้าที่ 1 สถานีอัดประจุไฟฟ้าที่ 4 มีปัจจัยด้านระยะทางเท่ากัน แต่มีราคาต่างกัน ยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะตัดสินใจเลือกราคาที่ถูกที่สุด เนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่า (การตัดสินใจอยู่ภายใต้เงื่อนไขของบล็อกเชน)
3. สถานีอัดประจุไฟฟ้าที่ 2 สถานีอัดประจุไฟฟ้าที่ 3 มีปัจจัยด้านระยะทางและราคาต่างกัน ยานยนต์ไฟฟ้าขนส่ง

สาธารณะตัดสินใจเลือกต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด (การตัดสินใจอยู่ภายใต้เงื่อนไขของบล็อกเชน)

4. สถานีอัดประจุไฟฟ้าที่ 1 สถานีอัดประจุไฟฟ้าที่ 5 มีปัจจัยด้านราคาและระยะทางเท่ากัน แต่การรับบริการแบบปั๊มของต่างกัน คือ มีการเข้ารับบริการเท่ากับ 10 นาทีต่อคัน จำนวน 6 หัวอัดประจุ และมีการเข้ารับบริการเท่ากับ 10 นาทีต่อคัน จำนวน 3 หัวอัดประจุ ยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะตัดสินใจเลือกการเข้ารับบริการเท่ากับ 10 นาทีต่อคัน จำนวน 6 หัวอัดประจุ เนื่องจากมีต้นทุนรวมต่ำสุด (การตัดสินใจอยู่ภายใต้เงื่อนไขของบล็อกเชน)

6. การอภิปรายผล

จากการศึกษาเรื่องการพัฒนาตัวแบบต้นทุนในการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าขนส่งสาธารณะบนพื้นฐานเทคโนโลยีบล็อกเชน ผู้วิจัยได้พัฒนาตัวแบบในส่วนของระยะเวลาในการรอคิวเพื่อเข้ารับการอัดประจุนอกเหนือจากปัจจัยด้านราคา ระยะทาง เวลาในการอัดประจุ [1] โดยผู้วิจัยประยุกต์ใช้บล็อกเชนในการตัดสินใจเลือกสถานีอัดประจุ ซึ่งจะพิจารณาจากต้นทุนรวม ในการตัดสินใจของบล็อกเชนจะมีระบบ Smart Contract ทำธุรกรรมโดยอัตโนมัติ เพื่อบันทึกข้อตกลงของสัญญา (เงื่อนไขด้านราคา ระยะทาง และเวลาการรอคอยในคิว และเวลาการอัดประจุ (Service Time) ที่สามารถดำเนินการได้ด้วยตัวเอง ไม่จำเป็นต้องมีคนกลาง [22] ทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ ตรวจสอบได้จากการศึกษาพบว่า บล็อกเชนให้ความสำคัญกับต้นทุนรวมมากที่สุด โดยไม่ได้เจาะจงความสำคัญของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง (รายละเอียดดังข้อ 5.5)

อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยยังคงสนใจและตั้งใจที่จะทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อต้นทุนในการเข้ารับบริการของยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะต่อไป เช่น การมีร้านอาหารในพื้นที่อัดประจุ มีที่พักหรือสวนหย่อม มีการส่งเสริมการขายในรูปแบบต่างๆ เป็นต้น เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพิ่มความสะดวกสบาย และสร้างความพึงพอใจให้กับผู้ขับขี่ยานยนต์ไฟฟ้าต่อไป

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ต้นทุนรวมจากตัวแบบภายใต้ปัจจัยต่างๆ

สถานีอัดประจุ	ปัจจัย								
	ราคาต่อหน่วยประจุไฟฟ้า (บาท)	ระยะทาง (กิโลเมตร)	จำนวนหัวอัดประจุ (หัว)	ต้นทุนในการอัดประจุ (บาท)	ต้นทุนของระยะทาง (บาท)	ต้นทุนเวลาในการอัดประจุ (บาท)	ต้นทุนของการเข้าหัวชาร์จ (บาท)	ต้นทุนการรอคอยในคิว (บาท)	ต้นทุนรวม (บาท)
สถานีที่ 1	10	16	6	660.44	88.89	19.66	4	2.02	775.01
สถานีที่ 2	10	12	6	652.83	50.00	19.43	4	2.02	728.28
สถานีที่ 3	7	20	6	467.64	138.89	19.88	4	2.02	632.43
สถานีที่ 4	7	16	6	462.31	88.89	19.66	4	2.02	576.88
สถานีที่ 5	10	16	3	660.44	88.89	19.66	4	721.67	1,494.66
สถานีที่ 6	10	12	3	652.83	50.00	19.43	4	721.67	1,447.93
สถานีที่ 7	7	20	3	467.64	138.89	19.88	4	721.67	1,352.08
สถานีที่ 8	7	16	3	462.31	88.89	19.66	4	721.67	1,296.52

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Sukkrajang, R. Duangsoithong and K. Chalermaynont, "Trade Distance and Price Model for Electric Vehicle Charging using Blockchain-based Technology," in *2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Mai, Thailand, May 19–22, 2021, pp. 964–967, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454741.
- [2] Z. Jin, R. Wu, X. Chen, and G. Li, "Charging guiding strategy for electric taxis based on consortium blockchain," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 144144–144153, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2945081.
- [3] S. Nakamoto, "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," *Decentralized Business Review*, pp. 21260, 2008.
- [4] L. Boongasame, "Introduction to Blockchain," in *Blockchain, 1st ed.* Bangkok, Thailand: Paper Print, 2020, ch. 1, pp. 1.
- [5] A. Leemakdej, "Bitcoin and the birth of Blockchain 1.0," in *Blockchain Disruptive Business*, Bangkok, Thailand: GREATidea co., 2020, ch. 1, pp. 15.
- [6] Digital Government Development Agency (Public Organization), "dictionary" in *Blockchain for Government Services*, 2nd ed. Bangkok, Thailand: DGA, 2021, pp. 13.
- [7] A. Kosba, A. Miller, E. Shi, Z. Wen and C. Papamanthou, "Hawk: The blockchain model of cryptography and privacy-preserving smart contracts," in *2016 IEEE symposium on security and privacy (SP)*, San Jose, CA, USA, May 22–26, 2016, pp. 839–858, doi: 10.1109/SP.2016.55.
- [8] G. Zyskind and O. Nathan, "Decentralizing privacy: Using blockchain to protect personal data," in *2015 IEEE Security and Privacy Workshops*, San Jose, CA, USA, May 21–22, 2015, pp. 180–184, doi: 10.1109/SPW.2015.27.
- [9] B. Ramamurthy, "Blockchain basics" in *Blockchain in action*, Shelter Island, NY, USA: Manning Publications co., 2020, ch. 1, pp. 5–7.
- [10] E. Elrom, "Blockchain Basics" in *The Blockchain Developer*, Berkeley, CA, USA: Springer, 2019, ch. 1, pp. 9.

- [11] D. Yaga, P. Mell, N. Roby and K. Scarfone, "Blockchain technology overview," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, Montgomery, Rep. NIST IR 8202, 2019, doi: 10.6028/NIST.IR.8202.
- [12] P. Ongkunaruk and R. Pisuchpen, "Let's get to know the account showing the basic process," in *Operations research*, Bangkok, Thailand: Se-Ed Book Center Co., Ltd., 2013, ch. 9, sec. 9.2, pp. 233–243.
- [13] T. Rattnakool, K. Sukkrajang, P. Tucktern and P. Jantavee, "Queuing Analysis on The Payment Point for Electricity of Public Sector A Case Study: Chana District," in *The 8th Hatyai National and International Conference*, Songkhla, Thailand, 2017, pp. 934–947.
- [14] M. Jizba, R. L. Cheu, T. Horak and H. Binova, "Analysis of screening checkpoint operations for transatlantic container transportation," *Journal of Transportation Security*, vol. 8, no. 3, pp. 79–97, 2015, doi: 10.1007/s12198-015-0159-5.
- [15] S. L. Dorton and D. Liu, "Analysis of Airport Security Screening Checkpoints using Discrete Event Simulation," in *Proc. IIE Annual Conference*, Orlando, FL, USA, 2012, p. 1.
- [16] N. mahisanon, *battery use is worth using, durable*, 1st ed. Nonthaburi, Thailand: Core Function, 2019, pp. 116–117.
- [17] Electric vehicle market 2021 will grow, need to increase charging points to cover more (analysis), *marketeeronline.com*, Jan 26, 2022. [Online]. Available: <https://marketeeronline.com/archives/212395>.
- [18] M. U. Javed and N. Javaid, "Scheduling charging of electric vehicles in a secured manner using blockchain technology," in *2019 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*, Islamabad, Pakistan, Dec. 16–18, 2019, pp. 2334–3141, doi: 10.1109/FIT47737.2019.00072.
- [19] M. Pustišek, A. Kos, and U. Sedlar, "Blockchain based autonomous selection of electric vehicle charging station," in *2016 international conference on identification, information and knowledge in the Internet of Things (IIKI)*, Beijing, China, Oct 20–21, 2016, pp. 217–222, doi: 10.1109/IIKI.2016.60.
- [20] Rungrat Pisachaphen, "Queuing System Problem" in *the Handbook of Simulation Modeling with ARENA*, Bangkok, Thailand: Se-Ed Book Center Co., Ltd. 2010, ch. 3, pp. 67–70.
- [21] Recargo, Inc. "PlugShare" [pluginincars.com](https://www.pluginincars.com/ev-charging-guide-for-businesses.html). <https://www.pluginincars.com/ev-charging-guide-for-businesses.html> (accessed Aug. 26, 2021).
- [22] Y. Wang, Z. Su, Q. Xu and N. Zhang, "Contract based energy blockchain for secure electric vehicles charging in smart community," in *2018 IEEE 16th Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 16th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 4th Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/DataCom/Cybercides)*, Athens, Greece, 2018, pp. 323–327, doi: 10.1109/DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTec.2018.00062.

การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทสำหรับการพยากรณ์การตรวจสอบ ตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์วงจรรวม

The Application of Employing the Discriminant Analysis Technique to Forecast the Inspection Marking on the Integrated Circuit Product

กนกอร บุญมา^{1,*} และ สกนช์ คล่องบุญจิต¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Kanokon Boonma^{1,*} and Sakon klongboonjit¹

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

Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: 62601102@kmitl.ac.th

Received: Oct 05, 2021; Revised: Jan 31, 2022; Accepted: Feb 04, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการตรวจสอบคุณภาพและบรรจุภัณฑ์อุปกรณ์วงจรรวมโรงงานผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์วงจรรวมมีขนาดเล็ก แต่มีกำลังการผลิตที่สูงมากทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบได้ง่ายและลูกค้าได้รับผลิตภัณฑ์คุณภาพต่ำ ผู้วิจัยจึงพัฒนากระบวนการตรวจสอบที่เหมาะสมและถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรในกระบวนการตรวจสอบข้อบกพร่องตัวอักษรเครื่องหมายของผลิตภัณฑ์วงจรรวม (Integrated Circuit) เพื่อเกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบน้อยที่สุด โดยนำเทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทเชิงเส้น (Linear Discriminant Analysis) มาประยุกต์ใช้สำหรับแก้ปัญหาการตรวจสอบผิดพลาดของผลิตภัณฑ์ สำหรับเครื่องจักรตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีการประมวลผลด้วยภาพพบว่าแหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่งของเครื่องนี้คือตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ โดยที่ x_1 คือ Coaxial Ring Light, x_2 คือ High Ring Light และ x_3 คือ Low Ring Light และ 1 ตัวแปรตอบสนอง Y คือ ผลการตรวจสอบค่าความคมชัดของตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีหน่วยเป็น gray scale ผลวิจัยที่ได้จากการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกประเภทเชิงเส้น คือ สมการจำแนกประเภทในการพยากรณ์การตรวจสอบตัวอักษรเครื่องหมาย เมื่อนำสมการจำแนกประเภทที่ได้ไปประยุกต์ใช้ พบว่าสมการจำแนกประเภทนี้มีประสิทธิภาพการพยากรณ์สูงถึง 92.6% หลังจากการนำไปใช้จริงในการตั้งค่าระดับที่เหมาะสมภายในเครื่องจักร โดยตั้งค่า Coaxial Ring Light เท่ากับ 22, ค่า High Ring Light เท่ากับ 20 และค่า Low Ring Light เท่ากับ 20 พบว่าสามารถตรวจสอบผลของข้อมูลผลิตภัณฑ์ถูกต้องสูงถึง 96.7% และสามารถเพิ่มอัตราผลผลิตที่ถูกต้องรับเฉลี่ย (Yield) เป็น 99.6% รวมถึงสามารถช่วยลดผลิตภัณฑ์ที่ควรปฏิเสธผสมรวมในผลิตภัณฑ์ที่ถูกต้องรับเหลือเพียง 0.6%

คำสำคัญ: วงจรรวม, การประมวลผลภาพ, การวิเคราะห์จำแนกประเภท

Abstract

This research aims to study the process of inspecting product quality on Integrated Circuit and Packaging of Electronics factory. Since the size of integrated circuit is quite small with high quantity production, this makes it easy to have some mistakes

during inspection process and launch low quality product to customers. According to these reasons, the researcher decided to develop the accurate and reliable inspection process to improve the efficiency of Vision Inspection and Packing Machine to minimize the reject rate of the mistaken inspection of Integrated circuit markings. The method of Linear Discriminant Analysis is applied to analyze the mistakes in inspection. At this Inspection and Packing Machine with image process, it is found that three light sources of this machine are the main potential predictor variables with 1) x_1 : Coaxial Ring Light, 2) x_2 : High Ring Light, and 3) x_3 : Low Ring Light and the one response variable of Y is the marking quality of integrated circuits in gray scale. Finally, the discriminant analysis equation is calculated to forecast the marking quality integrated circuits in Gray Scale. After this equation is applied, the calculation result shows that this equation yields the high efficiency of 92.6% after the actual implementation by setting the appropriate level of three potential predictor variables on Vision Inspection and Packing Machine: Coaxial Ring Light at 22, High Ring Light at 20 and Low Ring Light at 20 respectively with accuracy level of 96.7%, product quality yield increasing at level of 99.6% and the under reject products reducing at level of 0.6%.

Keywords: Integrated Circuit (IC), Image Processing, Discriminant Analysis

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการพัฒนาทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กันอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายให้กับมนุษย์ในด้านต่างๆ อีกทั้งยังได้แทรกอยู่ในหลายกลุ่มธุรกิจ อาทิเช่น โทรศัพท์มือถือ บัตรเครดิต รถยนต์ หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์ให้แสงสว่างอย่างหลอดไฟ ก็ได้มีการนำวงจรรวมไปประยุกต์ใช้งานมากขึ้น ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) มีการเจริญเติบโตอย่างมาก [1] จึงทำให้ผู้ผลิตต้องเผชิญกับภาวะการแข่งขันที่สูง ทั้งด้านกำลังการผลิตที่มีการปรับตัวเพิ่มสูงขึ้น การส่งมอบสินค้าที่รวดเร็วและการลดต้นทุนการผลิต หรือการลดของเสียระหว่างการผลิตได้ [2] ดังนั้นการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญสำหรับผู้ผลิต ซึ่งนอกจากจะช่วยให้สินค้ามีคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าแล้วยังช่วยลดต้นทุนค่าเสียโอกาสและลดการส่งมอบล่าช้าเนื่องจากต้องผลิตใหม่จากสินค้าที่ไม่ได้คุณภาพ [3]

สำหรับกระบวนการตรวจสอบผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์อุปกรณ์วงจรรวมในโรงงานผลิตวงจรรวมที่โรงงานการศึกษา จะมีการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยภาพอัตโนมัติ (Vision System) โดยนำเทคนิคการตรวจสอบและการประมวลผลด้วยภาพ (Image Processing) เข้ามาช่วยในการตรวจสอบความคมชัดตัว

อักษรบนผลิตภัณฑ์แบบอัตโนมัติ ซึ่งอาจเกิดจุดบกพร่องจากการทำงานของเครื่องจักรในระหว่างการผลิต [4] ของผลิตภัณฑ์วงจรรวมก่อนทำการบรรจุลงหีบห่อ ได้แก่ เครื่องตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ (Vision Inspection and Packing Machine) โดยโรงงานกรณีศึกษาประสบปัญหาในส่วนของการขาดแนวทางหรือมาตรฐานในการปรับตั้งค่าความเข้มแสงหรือความสว่างของแสงที่ตกกระทบบนผลิตภัณฑ์วงจรรวมของเครื่องจักรตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีการประมวลผลด้วยภาพ เพื่อลดการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ผิดพลาดคือการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลิตภัณฑ์เสีย หรือตรวจสอบผลิตภัณฑ์เสียเป็นผลิตภัณฑ์ดี ซึ่งจะทำได้ทั้งผลิตภัณฑ์ดีที่ผ่านทุกกระบวนการขั้นตอนการผลิตตั้งแต่ต้นน้ำจนถึงปลายน้ำ ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ของเครื่องจักรให้ถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) และจะต้องมีวิธีการทดสอบที่น่าเชื่อถือ (Reliable Test Methodology) และมีประสิทธิภาพสูง [5] เพื่อลดความเสี่ยงที่ลูกค้าจะได้รับผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการผลิต หรือแม้กระทั่งในอุตสาหกรรมยานยนต์มีการประยุกต์ใช้งานระบบการตรวจสอบด้วยภาพกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำสูง ทำให้การทำงานสะดวกรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ ได้แก่ ในการตรวจสอบคุณภาพถุงลมนิรภัยโดยใช้โปรแกรม MATLAB ควบคู่กับโครงข่ายประสาทเทียม [6] การคัดแยกความเข้มสี

ของผลิตภัณฑ์ โดยผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบที่ได้จากการประมวลผลภาพ [7] การตรวจสอบผลิตภัณฑ์อัตโนมัติผ่านระบบการประมวลผลภาพในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ [8] และการพัฒนาเครื่องตรวจสอบเชิงมองเห็นแบบอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [9]

ดังนั้นการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญอย่างมาก แต่การแก้ไขปัญหาการตรวจสอบผิดพลาดที่เกิดขึ้นของโรงงานกรณีศึกษาข้างต้นแนวทางและมาตรฐานในการปรับตั้งเครื่องจักรที่ชัดเจน ซึ่งวิธีที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวนั้นมีหลากหลายวิธี โดยหนึ่งในวิธีการแก้ไขและปรับปรุงปัญหานี้ให้ดียิ่งขึ้นคือวิธีการวิเคราะห์จำแนกประเภทแบบเชิงเส้น (Linear Discriminant Analysis) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้สำหรับพยากรณ์ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อปัญหา และการจำแนกประเภทของกลุ่มข้อมูลในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทมาประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ ได้แก่ การแก้ปัญหาคัดเลือกของเสียในกระบวนการชุมนุมเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน [10] การวิเคราะห์จำแนกหมวดหมู่ทางภูมิศาสตร์ของหญ้าฝรั่น (Saffron) [11] การศึกษาการจำแนกมะเร็งเต้านมมะเร็งท่อน้ำไข่ [12] และการพยากรณ์การจราจรในเมือง [13]

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์สำคัญเพื่อสร้างสมการพยากรณ์สำหรับการตรวจสอบและคัดแยกคุณภาพความคมชัดของอักษรเครื่องหมายบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ SO8-12 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่สำคัญของโรงงานในกรณีศึกษาด้วยการนำเทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทแบบเชิงเส้น (Linear discriminant analysis) มาประยุกต์ใช้ โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้มาซึ่งสมการการจำแนกประเภทที่มีประสิทธิภาพความแม่นยำในการพยากรณ์อย่างน้อย 80% ขึ้นไป เพื่อจะนำไปใช้ประโยชน์ในการตั้งค่าเครื่องจักรตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

2. วิธีการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย เพื่อหาสาเหตุปัญหาการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ผิดพลาด ที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ SO8-12 ในโรงงานกรณีศึกษา พร้อมทั้งหาแนวทางการป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้น

ด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์จำแนกประเภทเชิงเส้น โดยขั้นตอนในการดำเนินงานสำหรับงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

2.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาหาปัญหาและปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดการตรวจสอบผิดพลาดจากเครื่องจักร รวมถึงศึกษาหาแนวทางการแก้ปัญหาการตรวจสอบผิดพลาดของเครื่องจักรบนผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโรงงานผลิตวงจรรวมในกรณีศึกษา พร้อมทั้งกำหนดเกณฑ์การตรวจสอบสำหรับแยกผลิตภัณฑ์หลังจากผ่านกระบวนการตรวจสอบด้วยระบบประมวลผลด้วยภาพของเครื่องจักร เพื่อทำการแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามหลักสถิติวิเคราะห์ [14] คือ กลุ่มที่ 1 คือกลุ่มที่มีผลการตรวจสอบผ่านเกณฑ์สามารถนำผลิตภัณฑ์นั้นไปดำเนินการต่อกระบวนการถัดไปได้ และกลุ่มที่ 2 คือกลุ่มที่มีผลการตรวจสอบไม่ผ่านเกณฑ์ไม่สามารถนำไปดำเนินการต่อในกระบวนการถัดไป โดยกำหนดเกณฑ์ในการตรวจสอบของเสียที่ได้นั้นเป็นเกณฑ์ที่ได้การยอมรับจากโรงงานผลิตอุปกรณ์วงจรรวมกรณีศึกษา

2.2 การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์จำแนกประเภท

การวิเคราะห์จำแนกประเภทเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์หรือการหาสาเหตุ โดยที่มีตัวแปรตาม (ตัวแปรตอบสนอง) 1 ตัว และมีตัวแปรอิสระ (ตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้) อย่างน้อย 1 ตัว เทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทนั้นเพื่อหาสาเหตุที่ทำให้กลุ่มมีความแตกต่างกันและพยากรณ์กลุ่มใหม่ที่ไม่ทราบกลุ่มว่าควรอยู่ในกลุ่มใด [14] เริ่มต้นด้วยการเก็บข้อมูลตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ (x) คือแหล่งกำเนิดแสง ที่มีหน่วยเป็น % ที่มีผลต่อการตรวจสอบตัวอักษรเครื่องหมายผิดพลาดทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นของเสีย และตัวแปรตอบสนอง (Y) คือผลการตรวจสอบค่าความคมชัดของตัวอักษรเครื่องหมาย โดยมีหน่วยเป็น gray scale โดยจะทำการแบ่งข้อมูลทั้งตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ และตัวแปรตอบสนองออกเป็น 2 ชุด ข้อมูลชุดแรกแบ่งชุดข้อมูลออกมาแบบสุ่มจำนวน 70% ของข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมด เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์สำหรับสร้างสมการจำแนกประเภท (Discriminant equation) เพื่อประโยชน์ใน

การตั้งค่าเครื่องจักรตรวจสอบและบรรจุผลิตภัณฑ์และ
พยากรณ์ผลการตรวจสอบ ส่วนข้อมูลชุดที่สองจะเป็นข้อมูล
ที่เหลืออยู่อีก 30% เพื่อนำมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพความ
แม่นยำของสมการจำแนกประเภทที่พัฒนาขึ้นมา [14]

2.3 การตรวจสอบข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์จำแนกประเภท

เป็นการดำเนินการนำข้อมูลชุดแรกจำนวน 70% ของ
ข้อมูลทั้งหมด มาทำการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐาน 4
ประการตามข้อกำหนดการใช้งานเทคนิคการวิเคราะห์
จำแนกประเภท [15] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐาน 4 ประการตามข้อ
กำหนดการใช้งานเทคนิคการวิเคราะห์การจำแนกประเภท

คุณสมบัติที่ตรวจสอบ	วิธีการตรวจสอบข้อมูล
การตรวจสอบตัวแปรอิสระต้อง มีการแจกแจงปกติ	Anderson-Darling
การตรวจสอบความแปรปรวน ร่วมของตัวแปรอิสระ	Box's M test
การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิง เส้นตรงระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม	Pearson Product Moment Correlation
การตรวจสอบตัวแปรอิสระไม่มี ความสัมพันธ์ร่วมเชิงพหุเชิงเส้น	Pearson Product Moment Correlation

เริ่มขั้นตอนการสร้างเมตริกซ์ค่าเฉลี่ยของตัวแปร
ทำนายที่มีความเป็นไปได้ของทั้ง 2 กลุ่ม (ผ่าน/ไม่ผ่าน
เกณฑ์) และทำการสร้างเมตริกซ์ความแตกต่างระหว่างจุด
กึ่งกลางกลุ่มจากเมตริกซ์ค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายที่มี
ความเป็นไปได้ทั้ง 2 กลุ่ม แล้วทำการสร้างสมการจำแนก
ประเภท จากนั้นนำสมการจำแนกประเภทที่ได้มาหา
ค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ เพื่อตรวจว่า
ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามทั้ง 2 กลุ่มเท่ากันหรือไม่ ด้วยวิธี
Hotelling T^2 โดยตามข้อกำหนดของการวิเคราะห์การ
จำแนกประเภทค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองต้องไม่
เท่ากัน และคำนวณค่าแยกแยะคือ Y_C เพื่อใช้ในการ
แยกแยะข้อมูลทั้ง 2 กลุ่ม

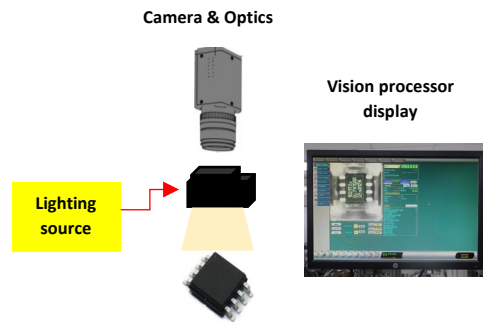
2.4 การทดสอบประสิทธิภาพของสมการจำแนกประเภท

นำข้อมูลในชุดที่สองจำนวน 30% ของข้อมูลทั้งหมดที่
แบ่งไว้มาทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของสมการ
จำแนกประเภทที่ได้ ด้วยการนำข้อมูลตัวแปรทำนายที่มี
ความเป็นไปได้แทนค่าในสมการจำแนกประเภทเพื่อทำ
การคำนวณค่าพยากรณ์ $\hat{Y}$ โดยมีเกณฑ์กำหนด กรณีที่
 $\hat{Y} \leq Y_C$ หมายความว่าผลิตภัณฑ์จะอยู่ในกลุ่มช่วงการ
ตรวจสอบความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายไม่ผ่านเกณฑ์
จึงไม่สามารถนำผลิตภัณฑ์ส่งไปยังลูกค้าได้ และกรณีที่
 $\hat{Y} > Y_C$ นั่นคือผลิตภัณฑ์จะอยู่ในช่วงของการตรวจสอบ
ความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายผ่านเกณฑ์ และสามารถ
นำผลิตภัณฑ์ส่งไปยังลูกค้าได้ (เป้าหมายในการตรวจสอบ
ประสิทธิภาพของสมการจำแนกประเภทคือมีความถูกต้อง
แม่นยำสูงกว่า 80% ขึ้นไป)

3. ผลการทดลอง

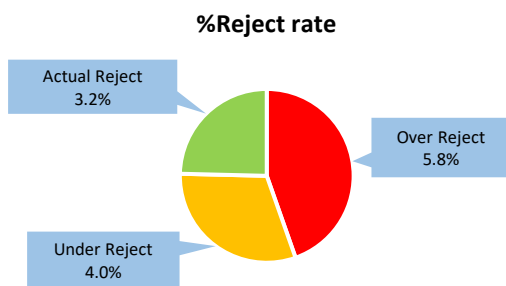
3.1 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการศึกษาในกระบวนการตรวจสอบและบรรจุ
ภัณฑ์ของ โรงงานกรณีศึกษาพบว่าเกิดปัญหา การ
ตรวจสอบผิดพลาดของความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมาย
บนผลิตภัณฑ์ SO8-12 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทบรรจุรวม
ด้วยการใช้แหล่งกำเนิดแสงของระบบการประมวลผลด้วย
ภาพ (Image Processing) ภายในเครื่องจักรตรวจสอบ
หลักการทำงานของระบบการประมวลผล จะใช้
แหล่งกำเนิดแสงที่ปรับระดับความสว่างได้ในระบบการ
ตรวจจับภาพ จากนั้นภาพที่ถ่ายได้จะถูกนำมาประมวลผล
ด้วยอัลกอริทึมที่ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพด้วย
หลักการตรวจสอบความคล้าย (Pattern Matching) ของ
ตัวอักษรเครื่องหมาย ด้วยเกณฑ์กำหนดคุณภาพผลิตภัณฑ์
ของ โรงงานกรณีศึกษา ระบบตรวจสอบจะส่งสัญญาณเพื่อ
บ่งบอกได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่กำลังตรวจสอบนั้นเป็นผลิตภัณฑ์
ที่มีคุณภาพหรือผลิตภัณฑ์ไม่มีคุณภาพ การทำงานของ
ระบบการประมวลผลด้วยภาพแสดงได้ดังรูปที่ 1 ดังนั้น
ระดับความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงจึงมีผลต่อระบบ
ประมวลผลด้วยภาพในเครื่องจักรตรวจสอบอย่างมาก



รูปที่ 1 การทำงานบนระบบประมวลผลด้วยภาพของเครื่องจักรในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์

จากข้อมูลในโรงงานกรณีศึกษาในช่วงเดือน มิถุนายน-ธันวาคม พ.ศ. 2563 พบว่าอัตราผลผลิตที่ถูกยอมรับเฉลี่ยอยู่ที่ 91.0% ซึ่งพบว่ามีอัตราผลิตภัณฑ์ที่ถูกปฏิเสธเฉลี่ย (Reject Rate) อยู่ที่ 9.0% โดยมีผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธจริง (Actual Reject) อยู่ที่ 3.2% และมีผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกยอมรับผสมไปในผลิตภัณฑ์ที่ถูกปฏิเสธด้วยถึง 5.8% (เรียกความผิดพลาดลักษณะนี้ว่าเป็นแบบ Over Reject) โดยในกลุ่มผลิตภัณฑ์อัตราผลผลิตที่ถูกยอมรับ พบว่ามีผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธผสมรวมในผลผลิตที่ถูกยอมรับถึง 4.0% (เรียกความผิดพลาดลักษณะนี้ว่าเป็นแบบ Under Reject) ดังนั้นจำนวนเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบแสดงไว้ดังในรูปที่ 2



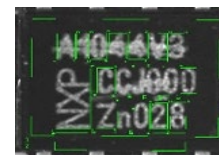
รูปที่ 2 เปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบ

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกยอมรับแต่กลับถูกปฏิเสธ (Over Reject) จำนวน 5.8% พบว่าเป็นการตรวจสอบผิดพลาดแบบที่เกี่ยวข้องกับตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์ (Marking) ตัวอย่างในรูปที่ 3



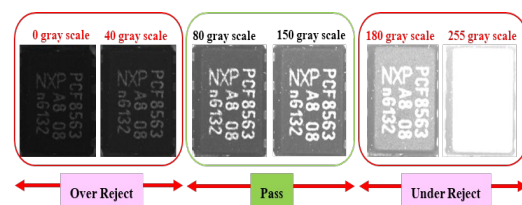
รูปที่ 3 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกยอมรับแต่กลับถูกปฏิเสธแบบ Marking

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธแต่กลับถูกยอมรับ (Under reject) ทำให้มีผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐานส่งไปถึงลูกค้าถึง 4.0% พบว่า เป็นการตรวจสอบผิดพลาดแบบที่เกี่ยวข้องกับตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์ (Marking) แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธแต่กลับถูกยอมรับแบบ Marking

เมื่อทำการวิเคราะห์จากข้อมูลเบื้องต้นทำให้ทราบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านตามเกณฑ์คุณภาพของลูกค้า โดยปกติต้องอ่านค่าความคมชัดของตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์ได้ที่ระดับ 80–150 gray scale ถ้าอ่านค่าความคมชัดน้อยกว่า 80 gray scale ถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกยอมรับแต่กลับถูกปฏิเสธ (Over Reject) และถ้าอ่านค่าความคมชัดได้มากกว่า 150 gray scale ถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธแต่กลับถูกยอมรับ (Under Reject) ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพของลูกค้าดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างภาพความคมชัดในการตรวจสอบคุณภาพที่เกี่ยวข้องกับตัวอักษรเครื่องหมาย (Marking) แบบต่างๆ: ผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกยอมรับแต่กลับถูกปฏิเสธ (Over Reject), ผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธแต่กลับถูกยอมรับ (Under Reject) และผลิตภัณฑ์ผ่านแบบปกติ (Pass) ด้วยการประมวลผลด้วยภาพ

โดยตัวแปรที่มีผลต่อการตรวจสอบของระบบการประมวลผลด้วยภาพภายในเครื่องจักรตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ คือ 1) แหล่งกำเนิดแสง Coaxial Ring Light 2) แหล่งกำเนิดแสง High Ring Light และ 3) แหล่งกำเนิดแสง Low Ring Light โดยแหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่งนี้จะถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรสำคัญในขั้นตอนการสร้างสมการการจำแนกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทต่อไป

3.2 การวิเคราะห์จำแนกประเภท

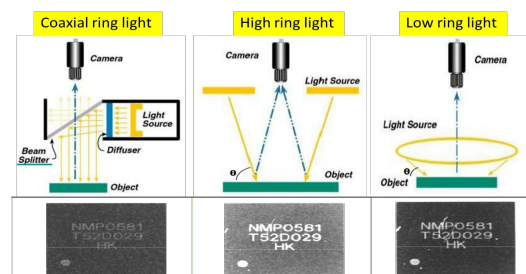
ดังที่กล่าวมาแล้วในการวิเคราะห์เบื้องต้น ตัวแปรที่มีผลต่อการตรวจสอบความคมชัดของตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์ผิดพลาด คือ แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความสว่างในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ด้วยระบบการประมวลผลด้วยภาพจากเครื่องจักรตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ โดยมีอยู่ 3 แหล่งกำเนิดแสง โดยรายละเอียดและระดับความสว่างที่ปรับได้ของแต่ละแหล่งกำเนิดแสงมีดังนี้

1) แหล่งกำเนิดแสง Coaxial Ring Light (X_1) เป็นการฉายแสงช่วยให้เห็นพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ได้ดี ซึ่งสามารถปรับการเปล่งแสงได้ตั้งแต่ระดับ 16 ถึง 26

2) แหล่งกำเนิดแสง High Ring Light (X_2) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มของแสงมากทำให้เห็นเงาและพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ได้ชัดเจนขึ้น สามารถปรับการเปล่งแสงได้ตั้งแต่ระดับ 10 ถึง 20

3) แหล่งกำเนิดแสง Low Ring Light (X_3) เป็นแหล่งกำเนิดแสงมุ่มต่ำช่วยเพิ่มความคมชัดของคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถปรับการเปล่งแสงได้ตั้งแต่ระดับ 12 ถึง 20 โดยทั้ง 3 ตัวแปรนี้จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรทำ

นายที่มีความเป็นไปได้ (X) และค่าความคมชัดของเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์คือตัวแปรตอบสนอง (Y) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้และตัวแปรตอบสนองสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้และตัวแปรตอบสนองในการตรวจสอบผิดพลาดตัวอักษรเครื่องหมายจรรยา

ในขั้นตอนการเก็บข้อมูล การตรวจสอบตัวอักษรเครื่องหมายของผลิตภัณฑ์จรรยา ได้ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 180 ชุดข้อมูล ซึ่งข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุดข้อมูล คือชุดที่ 1 ข้อมูลสำหรับการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกประเภทจำนวน 126 ชุดข้อมูล นั่นคือ 70% ของข้อมูลที่เก็บทั้งหมด ประกอบด้วย 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ที่มีความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายผ่านเกณฑ์จำนวน 66 ข้อมูล และกลุ่มที่ 2 ที่มีความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายไม่ผ่านเกณฑ์จำนวน 60 ข้อมูล และชุดที่ 2 จำนวน 54 ชุดข้อมูล หรือ 30% ของข้อมูลที่เก็บทั้งหมด เพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของสมการจำแนกประเภทที่ได้ โดยข้อมูลบางส่วนที่ทำการเก็บและศึกษาได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้และตัวแปรตอบสนองบางส่วนที่ทำการศึกษา

ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการตรวจสอบผิดพลาด			ค่าการตรวจสอบตัวอักษร เครื่องหมาย	เกณฑ์การตัดสินใจของโรงงาน กรณีศึกษา	
Coaxial Ring X_1	High Ring X_2	Low Ring X_3		กรณีศึกษา	
			Y (Gray scale)	ผ่านเกณฑ์	ไม่ผ่านเกณฑ์
24	16	14	58		✓
26	18	18	82	✓	
24	18	12	90	✓	

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้และตัวแปรตอบสนองบางส่วนที่ทำการศึกษา(ต่อ)

ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการตรวจสอบผิดพลาด			ค่าการตรวจสอบตัวอักษร เครื่องหมาย	เกณฑ์การตัดสินใจของโรงงาน กรณีศึกษา	
Coaxial Ring X_1	High Ring X_2	Low Ring X_3		ผ่านเกณฑ์	ไม่ผ่านเกณฑ์
18	20	20	85	✓	
16	16	16	50		✓
18	10	16	58		✓
26	20	18	83	✓	
16	18	16	81	✓	
20	18	18	89	✓	
22	10	20	84	✓	

จากนั้นนำข้อมูลมาทำการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานข้อมูล ตามข้อกำหนดเบื้องต้น 4 ข้อ ก่อนนำเทคนิคการวิเคราะห์จำแนกประเภทมาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งการตรวจสอบมีดังนี้

1) ตรวจสอบการแจกแจงปกติของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ โดยนำข้อมูลของทั้ง 3 ตัวแปร ของทั้ง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ผ่านเกณฑ์และกลุ่มที่ไม่ผ่านเกณฑ์ มาทำการตรวจสอบการแจกแจงปกติของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ด้วยสถิติแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่ง (Anderson-Darling) ผลที่ได้จากการตรวจสอบ พบว่าตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ทั้ง 2 กลุ่ม มีค่า P-value ของปัจจัย Coaxial Ring Light, High Ring Light และ Low Ring Light ที่ระดับนัยสำคัญมากกว่า 0.05 ทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีการแจกแจงแบบปกติแสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 การตรวจสอบการแจกแจงปกติของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้กลุ่มที่ 1 คือการตรวจสอบความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายผ่านเกณฑ์ (ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05)

Factor	N	Mean	Standard deviation	Average Deviation	P-value
Coaxial	66	21.400	3.118	0.575	0.130
High	66	14.970	3.419	0.502	0.200
Low	66	16.230	2.747	0.611	0.108

ตารางที่ 4 การตรวจสอบการแจกแจงปกติของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้กลุ่มที่ 2 คือการตรวจสอบความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายไม่ผ่านเกณฑ์ (ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05)

Factor	N	Mean	Standard deviation	Average Deviation	P-value
Coaxial	60	20.040	2.928	0.604	0.112
High	60	14.530	3.291	0.560	0.142
Low	60	15.480	2.862	0.615	0.105

2) ตรวจสอบความแปรปรวนร่วมของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ทั้ง 2 กลุ่มข้อมูล ด้วยสถิติวิธี Box's M Test ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5

โดยการทดสอบความแปรปรวนร่วมของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้มีการตั้งสมมติฐานตามสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$H_0: \Sigma_1 = \Sigma_2; \text{ ความแปรปรวนของ 2 กลุ่มเท่ากัน } (1)$$

$$H_1: \Sigma_1 \neq \Sigma_2; \text{ ความแปรปรวนของ 2 กลุ่มไม่เท่ากัน } (2)$$

ซึ่งพิจารณาจากค่าความมีนัยสำคัญ (Sig.) ของ F แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าค่า Sig. เท่ากับ 0.927 แสดงว่าไม่มีนัยสำคัญ จึงยอมรับ H_0 นั้นหมายความว่าข้อมูลตัวแปร

ทำนายที่มีความเป็นไปได้ทั้ง 2 กลุ่มมีความแปรปรวนเท่ากัน

ตารางที่ 5 ข้อมูลการตรวจสอบความแปรปรวนร่วมของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้

Test Results		
Box's M		1.974
F	Approx.	.320
	df1	6
	df2	108666.169
	Sig.	.927

3) ตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้และตัวแปรตอบสนองด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันดังสมการที่ (3)

$$r_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2] [n \sum_{i=1}^n (y_i)^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \quad (3)$$

โดย r แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน

n แทนจำนวนข้อมูล

x_i แทนตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้กลุ่มที่ i

y_i แทนตัวแปรตอบสนองกลุ่มที่ i

จากตารางวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง พบว่าค่า r_{x_1y} , r_{x_2y} และ r_{x_3y} มีค่าเท่ากับ 0.336, 0.069 และ 0.701 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าแหล่งกำเนิดแสง Low Ring Light และ Coaxial Ring Light มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรตอบสนอง เนื่องจากค่า r_{x_1y} และ r_{x_3y} ไม่มีค่าใกล้ 0 อย่างไรก็ดี ค่า $r_{x_2y} = 0.069$ ของค่าแหล่งกำเนิดแสง High Ring Light กับตัวแปรตอบสนอง อาจจะทำให้สามารถตัดผลกระทบของ High Ring Light ออกไปได้ แต่ในการวิจัยนี้ยังคงวิเคราะห์ผลของ High Ring Light ร่วมเข้าไปด้วยเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมผลกระทบของแหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่งไว้

4) ตรวจสอบความสัมพันธ์ร่วมเชิงพหุเชิงเส้นของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันเช่นกันดังสมการที่ (4)

$$r_{xi \ xj} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i x_j - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_j}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2] [n \sum_{i=1}^n (x_j)^2 - (\sum_{i=1}^n x_j)^2]}} \quad (4)$$

โดย x_i แทนตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้กลุ่มที่ i ได้แก่ x_1, x_2, x_3

x_j แทนตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้กลุ่มที่ j ได้แก่ x_1, x_2, x_3

จากตารางวิเคราะห์ตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ ไม่มีความสัมพันธ์ร่วมเชิงพหุเชิงเส้นกัน พบว่าได้ค่า $r_{x_1x_2}$, $r_{x_1x_3}$ และ $r_{x_2x_3}$ เท่ากับ -0.062 , -0.014 และ -0.007 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้มีความอิสระต่อกันสูง เนื่องจาก r เข้าใกล้ 0

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานข้อมูลทั้ง 4 ข้อ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลชุดที่ 1 ทั้ง 2 กลุ่มย่อย ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และข้อมูลมีค่าความแปรปรวนเท่ากัน ข้อมูลชุดที่ 1 ตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้และตัวแปรตอบสนองมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น และตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ทุกตัวเป็นอิสระต่อกัน ทำให้สามารถนำเทคนิคการจำแนกประเภทมาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างสมการจำแนกประเภทได้

3.3 สร้างสมการจำแนกประเภท

สำหรับขั้นตอนการสร้างสมการวิเคราะห์จำแนกประเภท เริ่มจากนำข้อมูลชุดที่ 1 ทั้ง 126 ข้อมูล มาสร้างเมทริกซ์ค่าเฉลี่ยตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ทั้ง 3 ตัวแปร โดยแยกการคำนวณเป็น 2 กลุ่มคือ $\bar{x}_{Pass}$ สำหรับกลุ่มที่ผ่านเกณฑ์ และ $\bar{x}_{Fail}$ สำหรับกลุ่มที่ไม่ผ่านเกณฑ์ การตรวจสอบความคมชัดของตัวอักษรเครื่องหมายแสดงได้ตามสมการที่ (5) ดังนี้

$$\bar{x}_{Pass} = \begin{bmatrix} 21.424 \\ 15.455 \\ 18.242 \end{bmatrix} \quad \bar{x}_{Fail} = \begin{bmatrix} 20.200 \\ 14.667 \\ 13.733 \end{bmatrix} \quad (5)$$

สร้างเมทริกซ์ความแตกต่างระหว่างจุดกึ่งกลางกลุ่มเพื่อหาค่า d ดังสมการที่ (6) โดยนำเมทริกซ์ค่าเฉลี่ยตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ $\bar{x}_{Pass}$ และ $\bar{x}_{Fail}$ มาลบกัน

$$d = \begin{bmatrix} 21.424 - 20.200 \\ 15.455 - 14.667 \\ 18.242 - 13.733 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.224 \\ 0.789 \\ 4.509 \end{bmatrix} \quad (6)$$

และสามารถคำนวณเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมรวมทั้งหมดของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ทั้ง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายผ่านเกณฑ์และกลุ่มที่มีความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายไม่ผ่านเกณฑ์ ได้ตามสมการที่ (7) ดังนี้

$$S_p = \begin{bmatrix} 12.567 & -0.755 & -0.145 \\ -0.755 & 11.946 & -0.072 \\ -0.145 & -0.072 & 8.274 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ต่อจากนั้นทำการสร้างเมทริกซ์ตัวคูณ b สำหรับสร้างสมการพยากรณ์การตรวจสอบผิดพลาดตามสมการที่ (8) และ (9) ดังนี้

$$S_p^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0799 & 0.0051 & 0.0015 \\ 0.0051 & 0.084 & 0.0008 \\ 0.0014 & 0.0008 & 0.1213 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$b = S_p^{-1}d$$

$$= \begin{bmatrix} 0.0799 & 0.0051 & 0.0015 \\ 0.0051 & 0.084 & 0.0008 \\ 0.0014 & 0.0008 & 0.1213 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.224 \\ 0.789 \\ 4.509 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} 0.108 \\ 0.076 \\ 0.549 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการสร้างสมการจำแนกด้วยการนำค่าในเมทริกซ์ b มาใช้เป็นสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้แต่ละตัว ตามลำดับ ทำให้สามารถสร้างสมการการจำแนกได้ดังสมการที่ (10) ดังนี้

$$\hat{Y} = 0.108x_1 + 0.076x_2 + 0.549x_3 \quad (10)$$

โดย x_1 คือ ระดับแหล่งกำเนิดแสง Coaxial Ring Light
 x_2 คือ ระดับแหล่งกำเนิดแสง High Ring Light
 x_3 คือ ระดับแหล่งกำเนิดแสง Low Ring Light

จากนั้นให้ทำการคำนวณหาค่าการแยกแยะ Y_C ดังสมการที่ (11)

$$Y_C = \frac{n_1\bar{Y}_1 + n_2\bar{Y}_2}{n_1 + n_2} \quad (11)$$

โดย Y_C คือ ค่าการแยกแยะ
 n_1 คือ 66 (จำนวนข้อมูลที่ผ่านมาเกณฑ์)

n_2 คือ 60 (จำนวนข้อมูลที่ไม่ผ่านเกณฑ์)

$\bar{Y}_1$ คือ 13.158 (ค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลที่ผ่านมาเกณฑ์)

คำนวณด้วยการแทนค่า $\bar{x}_{Pass}$ ลงในสมการที่ (10)

$\bar{Y}_2$ คือ 10.849 (ค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลที่ไม่ผ่านเกณฑ์)

คำนวณด้วยการแทนค่า $\bar{x}_{Fail}$ ลงในสมการที่ (10)

ในที่สุดจะได้ค่าการแยกแยะ Y_C เท่ากับ 12.250 นั่นคือ ถ้าค่า $\hat{Y} \leq Y_C = 12.250$ หมายถึง พยากรณ์ได้ว่าค่าการตรวจสอบความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์วงจรรวมมีค่าน้อยกว่า 80 gray scale ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นั้นถูกปฏิเสธ และ ถ้าค่า $\hat{Y} > Y_C = 12.250$ หมายถึง พยากรณ์ได้ว่าค่าการตรวจสอบความคมชัดตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์วงจรรวมมีค่ามากกว่า 80 gray scale หรืออยู่ระหว่าง 80–150 gray scale ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นั้นถูกยอมรับ

เพื่อให้สามารถใช้ค่า $Y_C = 12.250$ มาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการแยกแยะได้ จึงจำเป็นต้องทำการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระทั้ง 2 กลุ่มคือ ค่าเฉลี่ยกลุ่มข้อมูลที่ผ่านมาเกณฑ์ และค่าเฉลี่ยกลุ่มข้อมูลที่ไม่ผ่านเกณฑ์ก่อนว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ด้วยวิธี Hotelling T^2 ซึ่งจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานตามสมการที่ (12) และ (13) ดังนี้

$$H_0: [\mu_1] = [\mu_2] \quad (10)$$

$$H_1: [\mu_1] \neq [\mu_2] \quad (13)$$

โดย $[\mu_1]$ คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้กลุ่มที่ผ่านมาเกณฑ์

$[\mu_2]$ คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้กลุ่มที่ไม่ผ่านเกณฑ์

เมื่อทำการคำนวณค่าสถิติทดสอบ F ตามขั้นตอนดังแสดงในสมการที่ (14)–(16) ดังนี้

$$D^2 = \bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 = 13.158 - 10.849 = 2.670 \quad (14)$$

$$T^2 = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} D^2 = \frac{(66)(60)}{66+60} (2.670) = 83.900 \quad (15)$$

$$F = \frac{(n_1 + n_2 - p - 1)}{p(n_1 + n_2 - 2)} T^2$$

$$= \frac{(66+60-3-1)}{3(66+60-2)} (83.900)$$

$$= 27.52 \quad (16)$$

โดย p คือจำนวนตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้

n_1 คือ 66 (จำนวนข้อมูลที่ผ่านเกณฑ์)

n_2 คือ 60 (จำนวนข้อมูลที่ไม่ผ่านเกณฑ์)

เมื่อทำการเปิดตารางสถิติ F ที่ $\alpha = 0.05$ และ $v_1 = 3$, $v_2 = 122$ จะได้ผลคือ $f_{0.05,3,122} = 2.605$ นั่นคือค่า F สูงกว่า ค่า $f_{0.05,3,122}$ หรือ ไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะยอมรับ H_0 หมายความว่าค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้ของทั้ง 2 กลุ่มแตกต่างกัน นั่นทำให้สามารถใช้ค่า $Y_C = 12.250$ มาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการแยกแยะได้

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการจำแนกประเภท

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของสมการที่ (10) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการพยากรณ์ เมื่อทำการตั้งค่าระดับความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง (ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้) จะส่งผลให้ระบบการประมวลผลด้วยภาพตัดสินใจให้ผลิตภัณฑ์ที่กำลังถูกตรวจสอบถูกยอมรับ หรือถูกปฏิเสธ ในการทดสอบจะนำเข้าข้อมูลกลุ่มที่ 2 จำนวน 54 ข้อมูล หรือ 30% ข้อมูลที่เก็บทั้งหมด เข้าสู่สมการที่ (10) โดยตัวอย่างการคำนวณแสดงดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 ตั้งค่าระดับแสงทั้ง 3 แหล่ง ดังนี้ $x_1 = 22$, $x_2 = 16$, $x_3 = 16$ และ $Y = 90$ gray scale หรือ ระบบประมวลผลด้วยภาพต้องตัดสินใจให้ผลิตภัณฑ์ถูกยอมรับ (ตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์มีความคมชัด) จากสมการที่ (10) จะได้ผลการคำนวณค่า $\hat{Y}$ ดังสมการที่ (17)

$$\hat{Y} = 0.108(22) + 0.076(16) + 0.549(16) \quad (17)$$

$$\hat{Y} = 12.28$$

นั่นคือ $\hat{Y} = 12.280$ ซึ่งสูงกว่า $Y_C = 12.250$ หรือสมการที่ (10) พยากรณ์ว่าผลิตภัณฑ์นี้น่าจะถูกยอมรับ หรือ $Y = 80-150$ gray scale หรือ ระบบประมวลผลด้วยภาพต้องตัดสินใจให้ผลิตภัณฑ์ถูกยอมรับ (ตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์มีความคมชัด) ซึ่งกรณีนี้ สมการที่ (10) พยากรณ์ถูกต้อง

ตัวอย่างที่ 2 ตั้งค่าระดับแสงทั้ง 3 แหล่ง ดังนี้ $x_1 = 20$,

$x_2 = 20$, $x_3 = 16$ และ $Y = 58$ gray scale หรือ ระบบประมวลผลด้วยภาพต้องตัดสินใจให้ผลิตภัณฑ์ถูกปฏิเสธ (ตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์ไม่มีความคมชัด) จากสมการที่ (10) จะได้ผลการคำนวณค่า $\hat{Y}$ ดังสมการที่ (18)

$$\hat{Y} = 0.108(20) + 0.076(20) + 0.549(16)$$

$$\hat{Y} = 12.35$$

นั่นคือ $\hat{Y} = 12.350$ ซึ่งสูงกว่า $Y_C = 12.250$ หรือ สมการที่ 3 พยากรณ์ว่าผลิตภัณฑ์นี้น่าจะถูกยอมรับ หรือ $Y = 80-150$ gray scale หรือ ระบบประมวลผลด้วยภาพต้องตัดสินใจให้ผลิตภัณฑ์ถูกยอมรับ (ตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์มีความคมชัด) ซึ่งกรณีนี้ สมการที่ (10) พยากรณ์ผิดพลาด

เมื่อนำสมการที่ (10) มีการพยากรณ์ข้อมูลชุดที่ 2 จำนวน 54 ข้อมูล จะได้ผลดังในตารางที่ 6 นั่นคือ สมการที่ (10) สามารถพยากรณ์ผลในข้อมูลกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ถูกยอมรับทั้งหมด 25 ชิ้นงาน (Pass) ถูกต้องถึง 23 ชิ้นงาน (92%) ดังนั้นในผลิตภัณฑ์ที่ถูกยอมรับมีผลิตภัณฑ์ที่ควรปฏิเสธผสมไป 8% และสามารถพยากรณ์ผลในข้อมูลกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ถูกปฏิเสธทั้งหมด 29 ชิ้นงาน (Fail) ถูกต้องถึง 27 ชิ้นงาน (93.1%) สรุปว่าจากจำนวนข้อมูลทั้งหมด 54 ข้อมูล สมการที่ (10) สามารถพยากรณ์ผลการตรวจสอบถูกต้องถึง 50 ชิ้นงาน (92.6%) นั่นหมายความว่า สมการที่ (10) มีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการพยากรณ์ถึง 92.6% แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตารางตรวจสอบความถูกต้องของการพยากรณ์การตรวจสอบผิดพลาดตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์วงจรรวม

	ประเภท	ค่าพยากรณ์		ผลรวม
		ผ่านเกณฑ์	ไม่ผ่านเกณฑ์	
ผลการตรวจสอบที่ได้	ผ่านเกณฑ์	23	2	25
	ไม่ผ่านเกณฑ์	2	27	29
%	ผ่านเกณฑ์	92	8	100
	ไม่ผ่านเกณฑ์	6.9	93.1	100

เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาให้ความสำคัญในการส่งมอบผลิตภัณฑ์ที่ถูกต้องตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า นั่นคืออัตราผลผลิตที่ควรถูกปฏิเสธแต่กลับถูกยอมรับ (Under Reject) ดังนั้นจึงนำสมการจำแนกประเภทที่ได้ไปใช้ประโยชน์จริงในการทดลองปรับตั้งค่าแหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง โดยตั้งค่า Coaxial Ring Light เท่ากับ 22, ค่า High Ring Light เท่ากับ 20 และค่า Low Ring Light เท่ากับ 20 ที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการจำแนกประเภทโดยมีแนวโน้มให้ $P > Y_C = 12.250$ มากที่สุด เพื่อสร้างความมั่นใจว่าผลิตภัณฑ์ที่ถูกยอมรับมีผลิตภัณฑ์ที่ควรปฏิเสธผสมไปไม่เกิน 8% ตามตารางที่ 6 และทำการเก็บข้อมูลจำนวน 30 ชุดข้อมูล แสดงผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางการพยากรณ์การตรวจสอบประสิทธิภาพที่ได้จากการดำเนินงานจริง

		ค่าพยากรณ์	
		ประเภท	ผ่านเกณฑ์
ผลการตรวจสอบที่ได้	ผ่านเกณฑ์	20	1
	ไม่ผ่านเกณฑ์	0	9
%	ผ่านเกณฑ์	66.7	3.3
	ไม่ผ่านเกณฑ์	0	30

จากตารางที่ 7 พบว่าประสิทธิภาพของสมการจำแนกประเภทในการนำมาพยากรณ์การตรวจสอบตัวอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์ทั้งจรรวมที่ได้ไปปรับใช้จริงในการตั้งค่าเครื่องจักร โดยมีผลว่าสามารถพยากรณ์ผลในข้อมูลกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ถูกยอมรับทั้งหมด 21 ชิ้นงาน ถูกต้องถึง 20 ชิ้นงาน (95.2%) และสามารถพยากรณ์ผลในข้อมูลกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ถูกปฏิเสธทั้งหมด 9 ชิ้นงาน ถูกต้องทั้งหมด 9 ชิ้นงาน (100%) นั่นคือ จากจำนวนข้อมูลทั้งหมด 30 ข้อมูล สามารถพยากรณ์ผลการตรวจสอบถูกต้องถึง 29 ชิ้นงาน (96.7%) สามารถสรุปได้ว่าจากการทดลองปรับใช้จริงมีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการพยากรณ์ถึง 96.7% โดยมีผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธแต่กลับถูกยอมรับหลุดออกไป 3.3% ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ควรปฏิเสธผสมไปไม่

เกิน 8% จริงตรงตามการทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการจำแนกประเภท โดยสอดคล้องกับข้อกำหนดในการส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่ควรปฏิเสธผสมกับผลิตภัณฑ์ที่ถูกยอมรับไม่เกิน 10%

ผลจากการปรับใช้จริงและทำการเก็บข้อมูลในช่วงเดือน มีนาคม-สิงหาคม พ.ศ. 2564 พบว่าอัตราผลผลิตที่ถูกยอมรับเฉลี่ย (Yield) อยู่ที่ 99.6% ซึ่งพบว่าอัตราผลผลิตที่ถูกปฏิเสธเฉลี่ย (Reject rate) อยู่ที่ 0.4% ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธจริง (Actual reject) 0.4% โดยมีผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธผสมรวมในผลผลิตที่ถูกยอมรับ 0.6% (เรียกความผิดพลาดลักษณะนี้เป็นแบบ Under reject) ดังนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องจักรตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์จรรวมดีขึ้น โดยสามารถลดข้อผิดพลาดของกระบวนการตรวจสอบได้ 85%

4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลการศึกษา พบว่าสมการจำแนกประเภทเชิงเส้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดปัญหาการตรวจสอบผิดพลาดของเครื่องจักรในกระบวนการตรวจสอบความคมชัดของอักษรเครื่องหมายบนผลิตภัณฑ์จรรวมด้วยระบบประมวลผลด้วยภาพในเครื่องตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ โดยมีตัวแปรทำนายที่มีความเป็นไปได้อยู่ 3 ตัวแปรคือ แหล่งกำเนิดแสงภายในเครื่องตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ นั่นก็คือ 1) Coaxial Ring Light ที่มีการปรับตั้งการเปล่งแสงที่ 16 ถึง 26, 2) High Ring Light มีการปรับตั้งการเปล่งแสงที่ 10 ถึง 20 และ 3) Low Ring Light มีการปรับตั้งการเปล่งแสงอยู่ที่ 12 ถึง 20 ที่ส่งผลถึงการตรวจสอบเพื่อตัดสินใจว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธผลิตภัณฑ์ที่กำลังถูกตรวจสอบอยู่ ณ สภาพปัจจุบัน ปรากฏว่าเครื่องจักรตรวจสอบผลิตภัณฑ์ผิดพลาด จึงส่งผลให้ปฏิเสธผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพคือออกไปและยอมรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีคุณภาพออกไปสู่ลูกค้า เพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ เทคนิคการจำแนกประเภทจึงถูกนำมาใช้วิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลการทำงานของเครื่องจักรตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ในสภาพการทำงานปัจจุบัน หลังจากการประยุกต์ใช้วิเคราะห์จำแนกประเภททำให้สามารถสร้าง

สมการการจำแนกประเภทสำหรับการพยากรณ์ผลการทำงานของเครื่องตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ ได้ตามสมการที่ (10) ดังนี้ $\hat{Y} = 0.108x_1 + 0.076x_2 + 0.549x_3$ และเมื่อทำการตรวจสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของสมการ พบว่าการพยากรณ์ผลในข้อมูลกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ถูกยอมรับเท่ากับ 92% และพยากรณ์ผลในข้อมูลกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ถูกปฏิเสธทั้งหมดเท่ากับ 93.1% นั่นคือ สามารถพยากรณ์ผลการตรวจสอบสูงถึง 92.6%

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงานกรณีศึกษาในการปรับตั้งค่าระดับที่เหมาะสมให้แก่แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง โดยตั้งค่า Coaxial Ring Light เท่ากับ 22, ค่า High Ring Light เท่ากับ 20 และค่า Low Ring Light เท่ากับ 20 ภายในเครื่องตรวจสอบและบรรจุภัณฑ์ พบว่าสามารถตรวจสอบผลในข้อมูลกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ถูกยอมรับถูกต้องเท่ากับ 95.2% และสามารถตรวจสอบผลในข้อมูลกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ถูกปฏิเสธเท่ากับ 100% ดังนั้นจากข้อมูลทั้งหมดสามารถตรวจสอบผลิตภัณฑ์ถูกต้องได้สูงถึง 96.7% และมีโอกาสที่ผลิตภัณฑ์ที่ควรปฏิเสธผสมกับผลิตภัณฑ์ที่ถูกยอมรับ 3.3% ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดในการส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าที่ไม่เกิน 10% และสามารถเพิ่มอัตราผลผลิตที่ถูกยอมรับเฉลี่ย (Yield) จาก 91% เป็น 99.6% และสามารถช่วยลดผลิตภัณฑ์ที่ควรถูกปฏิเสธผสมรวมในผลผลิตที่ถูกยอมรับ (Under Reject) จาก 4% เป็น 0.6% แสดงให้เห็นว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์วงจรรวมของโรงงานในกรณีศึกษาได้ถึง 85%

5. ข้อเสนอแนะ

โรงงานกรณีศึกษาควรนำการวิเคราะห์จำแนกประเภทมาใช้ในการวิเคราะห์ปรับตั้งค่าของเครื่องจักรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ เพื่อลดการส่งมอบผลิตภัณฑ์ที่ผิดพลาดไปสู่ลูกค้า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบขอบคุณโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์กรณีศึกษา ที่อนุเคราะห์ข้อมูลในการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] “Electrical and Electronics Institute, “Integrated circuits, May. 31, 2020. Accessed: Apr. 28, 2021 [Online]. Available: <http://eiu.thaieei.com/box/Products/9/IC%2031-05-2560.pdf>
- [2] P. Pholphirul, “Roles of Thai Small and Medium Enterprises Under Creative Economy,” *NIDA Economic Review Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 207–249, 2013.
- [3] C. Laofor and V. Peansupa, “Defect Detection and Quantification System to Support Subjective Visual Quality Inspection Via a Digital Image Processing: A Tiling Work Case Study,” *Automation in Construction*, vol. 24, pp. 160–174, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2012.02.012.
- [4] J. Hesselbach, H. W. Hoffmeister and T. Loohß, “Process-Integrated Quality Assurance in Wood Machining Centers with The Help of Image Processing,” *Production Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 97–101, 2007, doi:10.1007/s11740-007-0032-x.
- [5] Q. Luo and Y. Heb, “A Cost-Effective and Automatic Surface Defect Inspection System for Hot-Rolled Flat Steel,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 38, no. 1, pp. 16–30, 2016, doi: .org/10.1016/j.rcim.2015.09.008.
- [6] S. Xianjiang, Z. Yue, S. Peng, S. Han, L. Xiaohui and W. Andong, “Automotive Airbag Assembly Quality Visual Inspection Method Studies Based on MATLAB,” in *Proc. 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology*, Changchun, China, Dec. 29-31, 2012, pp. 1225–1228, doi: 10.1109/ICCSNT.2012.6526145.
- [7] W. Boonsuk, “Applying for Classifying System of Rubber Quality Using Technique of Color Average,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 25, no. 2, 2015.

- [8] A. Pannawan and S. Sudsawat, "Automated part inspection by image processing system in vehicle part manufacturing," *The Journal of Applied Science*, vol. 16, no. 1, pp. 45–59, 2017, doi: 10.14416/j.appsci.2017.06.001.
- [9] J. Varagul, "Development of Automatic Visual Inspection Machine for HDD Manufacturing Process," M.S. Thesis, Dept. Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2010.
- [10] V. Saeheir, "Forecasting of Steel Plate in Hot-Dip Galvanized Process by Discriminant Analysis: A Case Study of Hot-Dip Galvanized Factory," M.S. Thesis, Dept. Industrial Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2019.
- [11] A. A. D'Archivio and M. A. Maggi, "Geographical Identification of Saffron (*Crocus Sativus* L.) by Linear Discriminant Analysis Applied to The UV-Visible Spectra of Aqueous Extracts," *Food Chemistry*, vol. 219, pp. 408–413, 2017, doi: org/10.1016/j.foodchem.2016.09.169.
- [12] M. Toğaçar, B. Ergen and Z. Cömert, "Application of Breast Cancer Diagnosis Based on a Combination of Convolutional Neural Networks, Ridge Regression and Linear Discriminant Analysis Using Invasive Breast Cancer Images Processed with Autoencoders," *Medical Hypotheses*, vol. 135, 2020, doi: org/10.1016/j.mehy.2019.109503
- [13] Z. Jing, G. Wang, S. Zhang and C. Qiu, "Building Tianjin Driving Cycle Based on Linear Discriminant Analysis," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 53, pp.78–87, 2017, doi: org/10.1016/j.trd.2017.04.005
- [14] K. Wanichbuncha, "Discriminant Analysis," in *Multivariate analysis*, Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press, 2008, ch. 10, sec. 10.1–10.11, pp. 375–405.
- [15] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin and R. E. Anderson, "Multiple Discriminant Analysis," in *Multivariate data analysis: A Global Perspective*, 7th ed. NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2010, ch. 7, sec. 4, pp. 471–547.

การศึกษาและออกแบบสำหรับกระบวนการผลิตของกระถางต้นไม้ของเล่นโดยใช้เทคนิค ทางด้าน CAD/CAM/CAE

The study and Design for Manufacturing Process of toy plant pot using CAD/CAM/CAE Technique

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล^{1,*} และวรกรฤช คอนคำเพ็ง²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาพิษณุโลก บ้านกร่าง
เมือง พิษณุโลก 65000

² สาขาวิชาเครื่องจักรกลเกษตร, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
พิษณุโลก บ้านกร่าง เมือง พิษณุโลก 65000

Werayoot Lahamornchaiyakul^{1,*} and Worakrit Doncomephang²

¹ Department of Mechanical of Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna
Phitsanulok, Ban krang, Mueang, Phitsanulok, 65000, Thailand

² Department of Agricultural Machinery Faculty of Agricultural Science and Technology, Rajamangala University of
Technology Lanna, Ban krang, Mueang, Phitsanulok, 65000, Thailand

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

Received: Oct 30, 2021; Revised: Dec 12, 2021; Accepted: Feb 04, 2022

บทคัดย่อ

กระถางต้นไม้ของเล่นถูกนำมาใช้สำหรับจัดห้องเรียนและสวนสนุก ทุกวันนี้ชิ้นส่วนกระถางต้นไม้ของเล่นส่วนใหญ่ทำจากวัสดุพลาสติกโดยผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกส่วนใหญ่ผลิตโดยกระบวนการของ CAM โปรแกรม InventorCAM คือคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing; CAM) ที่พัฒนาและใช้งานในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยานยนต์ โปรแกรม InventorCAM ได้รับการเชื่อมโยงเพื่อทำงานร่วมกับโปรแกรม Inventor โดยโปรแกรม InventorCAM จะมีใช้สำหรับการผลิตเท่านั้น ในงานนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบโมเดลพลาสติกของกระถางต้นไม้ของเล่นและฐานแม่พิมพ์ ซึ่งประกอบด้วย sprue runner sub runner และ gate หลังจากนั้นจะใช้ชิ้นงานพลาสติกจำลองเพื่อจำลองการฉีดและการวางตำแหน่งการฉีดขึ้นรูป นอกจากนี้ยังออกแบบชิ้นส่วนมาตรฐานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ด้วยโมดูลการออกแบบแม่พิมพ์ในโปรแกรม Inventor เวอร์ชัน 2014 ดังนั้นการศึกษานี้จึงสามารถศึกษาแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกกับการใช้โปรแกรม InventorCAM อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองและการปรับปรุงประสิทธิภาพการฉีดพลาสติกที่สูงขึ้นจะเหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาการผลิตกระถางต้นไม้ของเล่นที่ดีขึ้นสำหรับธุรกิจ SME

คำสำคัญ: แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก, แบบจำลองเชิงตัวเลข, คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต

Abstract

Toy plant pots are used to organize children's classrooms and theme park. Today, most of the toy plant pot parts are made of plastic material by injection molded. Most of the plastic injection molded parts are produced by CAM.

InventorCAM is Computer Aided Manufacturing (CAM), developed and used in manufacturing and design processes in the automotive industry. InventorCAM has been supporting and plugins for Inventor Professional Program. InventorCAM is available only in the manufacturing collection. In this work, researcher is designed plastic model of toy plant pot and injection mold base, consisting of sprue, runner, sub runner and gate. After that, plastic parts are used to simulate the injection molding process to simulate the positioning of gate injection. In addition, researcher also design of standard part for plastic injection molded and the both in the core and cavity of mold plastic injection using module mold design of Inventor Professional version 2014. Therefore, this study can be used to study plastic injection mold together with the use of InventorCAM program appropriately. Nevertheless, the results obtained from simulations and the improvement of higher performance for plastic injection would be optimum for development of better toy plant pot production for SME business.

Keywords: Plastic Injection Mold, Numerical Simulation, Computer Aided Manufacturing

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ตลาดในกลุ่มอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในประเทศไทย เป็นกลุ่มอุตสาหกรรมที่ใหญ่มาก เนื่องจากการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก จะถูกนำไปใช้เกือบทุกกลุ่มของอุตสาหกรรม เช่น กลุ่มอุตสาหกรรม ยานยนต์ เครื่องใช้ในครัวเรือน ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า และชิ้นส่วนของเล่น ตลอดจนกระถางต้นไม้ เป็นต้น ด้วยขีดความสามารถทางการแข่งขันในเชิงธุรกิจ การนำเข้าเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อใช้ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ถือเป็นข้อได้เปรียบของยุคปัจจุบันในกลุ่มบริษัทต่าง ๆ และกำลังเป็นที่นิยมอย่างมากในการนำโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์เข้ามาช่วยในการออกแบบและผลิต โมดูลการออกแบบแม่พิมพ์ใน Autodesk Inventor Professional 2014 เป็นอีกหนึ่งในเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ใช้เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในปัจจุบัน โมดูลของการออกแบบแม่พิมพ์มีฟังก์ชันที่หลากหลาย เช่น Mold Fill Analysis, Core/Cavity Cold Well Cooling Channel และ Mold Process Setting เป็นต้น โมดูลการออกแบบแม่พิมพ์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ และแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในประเทศไทย ในการบวนการออกแบบเมื่อได้แบบจำลอง Core และ Cavity สำหรับการขึ้นรูปแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำ InventorCAM ไปใช้ในการกระบวนการผลิตเพื่อทำการจำลองเส้นทางการเดินของใบมีดกัด (ทูล) โดยปัจจุบันเทคโนโลยี InventorCAM ได้ถูกนำไปใช้กับระบบงาน 2 มิติและ 3 มิติ ซึ่ง

โมดูลฟังก์ชันการทำงานที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ใน InventorCAM ได้แก่ งาน Machining 2D และ 3D, งาน Pocket Recognition งาน HM Roughing และงานแบบ Sim ของการกัดแบบ 5 แกน เป็นต้น InventorCAM ได้รับการพัฒนาและใช้งานภายใต้หลักการคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) [1],[2] หลักการของแคม (CAM) สามารถกำหนดได้ว่าเป็นการใช้ระบบคอมพิวเตอร์หรือซอฟต์แวร์เพื่อการวางแผนหรือจัดการ ตลอดจนสามารถช่วยควบคุมการทำงานของการผลิต [1] ในปัจจุบันแคมเป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมเครื่องจักรซีเอ็นซี หรือเรียกว่าคอมพิวเตอร์ช่วยในการควบคุมเชิงตัวเลข (Computer Numerical Control; CNC) ซึ่งเป็นระบบเครื่องจักรสำหรับการผลิตที่มีความแม่นยำในการผลิตที่สูงมาก และเครื่องจักรซีเอ็นซีสามารถนำมาใช้ได้มากกว่าการทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก [3] ในเครื่องจักรซีเอ็นซี ตัวเลขและสัญลักษณ์จะถูกโปรแกรมสร้างขึ้นตามคำสั่งที่ออกแบบมาสำหรับงานเฉพาะ เช่น งานจำพวก 2.5D งานแบบ 3 แกน งานแบบ 4 แกน และงานแบบ 5 แกน เป็นต้น ตัวอย่างทูลและเครื่องกัดซีเอ็นซี 3 แกนที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2 เป็นเครื่องมือผลิตที่ใช้กันทั่วไปในการศึกษาและวิจัยงานแม่พิมพ์ ในสถานศึกษาและอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้จัดเตรียมโปรแกรมและได้ลงมือปฏิบัติ โดยจะศึกษาเกี่ยวกับขั้นตอนการใช้โปรแกรมสำหรับออกแบบแม่พิมพ์ การฉีดขึ้นรูปงานพลาสติก ตลอดจนการสร้างเส้นทางการเดินของใบมีดกัด รวมไปถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาด้านการออกแบบที่น่าสนใจต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในปัจจุบัน



รูปที่ 1 เครื่องจักรซีเอ็นซีแบบ 3 แกนในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2 ตัวอย่างทูลของเครื่องจักรซีเอ็นซีแบบ 3 แกน

เครื่องจักรซีเอ็นซีจะทำงานภายใต้ชุดของคำสั่งจีโค้ด (G-code) ซึ่งรูปแบบการเขียนคำสั่งจีโค้ดนั้นค่อนข้างที่จะยากมากเพราะต้องใช้ความรู้ด้านเครื่องจักรและเวลาในการเรียนรู้อย่างลึกซึ้ง [1],[3] ดังนั้นทุกวันนี้ จึงนิยมใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์สำหรับสร้างจีโค้ดในการควบคุมเส้นทางการเดินของชุดเครื่องไปมีดกัดขึ้นรูป เพื่อให้ชิ้นส่วนที่ผลิตออกมามีความแม่นยำและลดความผิดพลาด จากการเชื่อมโยงทางเทคนิคของระบบการออกแบบระหว่างการออกแบบแม่พิมพ์และการจำลองกระบวนการผลิตโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป InventorCAM ในปัจจุบันโปรแกรม InventorCAM อยู่ในตำแหน่งผู้นำในงานด้านนี้ การวิจัยนี้เป็นรูปแบบงานศึกษาใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกกระถางต้นไม้ของเล่นสำหรับธุรกิจ SME และการใช้โปรแกรม InventorCAM ตลอดจนการกำหนดขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกควบคู่ไปกับการกัดขึ้นรูปชิ้นส่วนแม่พิมพ์และตัวอย่างการสร้างรหัสจีโค้ดในการผลิต

ชิ้นงานของงาน Core และ Cavity ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกกระถางต้นไม้ของเล่น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับโปรแกรม SolidCAM iMachining และขั้นตอนโดยละเอียดของกระบวนการตัดเฉือนของเฟืองเกียร์จากวัสดุในสต็อก (เนื้อเหล็กจำลอง) โดยมีการอธิบายทีละขั้นตอนโดยใช้เทคโนโลยีโปรแกรม SolidCAM 2014 แบบงาน 2D iMachining [1] และได้มีการศึกษาและการจำลองเกี่ยวกับการประเมินกลยุทธ์การกัดขึ้นรูปชิ้นงานแม่พิมพ์ โดยโมดูลเทคโนโลยีที่มีอยู่ในระบบแคม และถูกนำไปใช้เมื่อผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน เช่น การกัดขึ้นรูปชิ้นส่วนงานแม่พิมพ์ Core และ Cavity [4] ตลอดจนได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลและความสามารถในการกัดขึ้นรูปงานแบบต่าง ๆ ที่มีต่อความแม่นยำของชิ้นงาน Circle pocket ปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งในการกัดขึ้นรูปซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพพื้นผิวงานคือรูปแบบการกัด การออกแบบตัวอย่างถูกสร้างขึ้นในระบบแคดของโปรแกรม SOLIDWORKS เส้นทางการเดินไปมีดกัด (Toolpath) ถูกสร้างขึ้นในระบบแคมของโปรแกรม SolidCAM และผลที่ได้จากการจำลองจะถูกเปรียบเทียบและประเมินผลสำหรับตรวจสอบการผลิตระหว่างโปรแกรมและการทดสอบจริง [5] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักรซีเอ็นซี โดยพวกเขาจะทำการศึกษาและสำรวจวิธีการเขียนโปรแกรมต่าง ๆ ในเครื่องจักรซีเอ็นซี และทำการสร้างความแตกต่างของโปรแกรมและทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของจีโค้ด [6]

นอกจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิธีการเดินของชุดไปมีดกัดแบบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ผู้วิจัยยังพบรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการจำลองกระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก โดยเขาได้ทำการศึกษารูปแบบการฉีดด้วยการออกแบบตัว Runner และตำแหน่งในการวาง gate [7]

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบชิ้นส่วนมาตรฐานของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับกระถางต้นไม้ของเล่น

2.2 เพื่อจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

2.3 เพื่อจำลองเส้นทางการเดินใบมีดในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการแบ่งรูปแบบการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกจะนำเสนอเกี่ยวกับเทคนิคการสร้าง Core และ Cavity ที่เหมาะสมด้วยแคด (Computer Aided Design; CAD) ส่วนที่สองจะทำการวิเคราะห์การฉีดขึ้นรูปพลาสติกเพื่อจำลองการไหลของเนื้อพลาสติกด้วย ซีเออี (Computer Aided Engineering; CAE) และส่วนที่สามจะทำการศึกษารูปแบบของการกัดขึ้นรูปชิ้นงานของ Core และ Cavity เพื่อจำลอง Tool path และทิศทางการเดินของใบมีดด้วยแคม (Computer Aided Manufacturing; CAM) ซึ่งรูปแบบของการศึกษาและทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 การแบ่งประเภทของพลาสติก

ปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่มีบทบาทและหน้าที่สำคัญต่อการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ วัสดุพลาสติกคือสารสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่มาก โดยปกติโครงสร้างของพลาสติกจะประกอบไปด้วยธาตุที่สำคัญคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน คลอรีน เป็นต้น และพลาสติกยังมีชื่อเรียกทางเคมีว่า “โพลีเมอร์” [8],[9] ปัจจุบันการแบ่งประเภทของงานพลาสติกสำหรับการฉีดขึ้นรูป สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- 1.) เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)
- 2.) เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)
- 3.) อีลาสโตเมอร์ (Elastomer)

3.1.2 ทฤษฎีพื้นฐานทางกลศาสตร์

- 1.) ทฤษฎีความเครียด (Strain)

เมื่อทำการพิจารณาชิ้นงานที่มีการรับแรงจากภายนอกกระทำ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางที่แรงมากระทำ เช่น เมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงดึง

ก็จะยืดออก (Elongation) และเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงอัดก็จะหดเข้า (Contraction) [8],[9]

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (1)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียด

L_0 คือ ความยาวเดิม หรือความยาวพักตัวของวัสดุ

L คือ ความยาวใหม่ ภายหลังจากที่ได้รับแรงภายนอกมากระทำ

2.) ทฤษฎีความเค้น (Stress)

การพิจารณาแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีผลต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่รับแรง แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดค่าทางทฤษฎี จึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่รับแรง ด้วยแรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน [8] การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

เมื่อ σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa) หรือ N/m^2

P = แรงภายนอกมากระทำ มีหน่วยเป็น (N)

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ (m^2)

3.) รูปแบบของค่าความเค้น

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน

ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง

ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของพื้นที่ภาคตัดขวาง [8]

3.1.3 ทฤษฎีสำหรับงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก

1.) ประเภทและรูปแบบการฉีด

กระบวนการวิเคราะห์งานฉีดขึ้นรูปพลาสติกประกอบไปด้วยรูปแบบการแสดงผลแบบต่าง ๆ ดังนี้

การแสดงผลแบบ Fill Time

รูปแบบการวิเคราะห์ผลแบบ Fill Time คือการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Mold Analysis ทำให้ทราบถึงเวลาและทิศทางการไหลของพลาสติกของแต่ละช่วงเวลา ที่เข้าไปในชิ้นงานซึ่งดูจากสัดส่วนการไหล โดยแสดงเป็นสีที่ไหลเข้าไปใน Cavity

การแสดงผลแบบ Shink Marks

รูปแบบการวิเคราะห์ผลลัพท์แบบ Shink Marks คือ การวิเคราะห์รอยยุบตัวของเนื้อพลาสติกในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

การแสดงผลลัพท์แบบ Cooling Time เป็นการแสดงผลลัพท์ของการวิเคราะห์การระบายความร้อนของเนื้อพลาสติกในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

การแสดงผลลัพท์แบบ Weld Line

เป็นการแสดงผลลัพท์ของการวิเคราะห์การเกิดรอยประสานของเนื้อพลาสติกในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

การแสดงผลลัพท์แบบ Air Trap

เป็นการแสดงผลลัพท์ของอากาศหรือแก๊สที่ไม่สามารถระบายหรือระบายออกจากโพรงแม่พิมพ์ได้ทันเวลา

2.) รูปแบบของรู Gate

รูปแบบของรูเข้าของเนื้อพลาสติกเหลว หรือที่เรียกว่า Gate จะมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น Sprue Pin และแบบ Pin point แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เสนอรูปแบบรูเข้าเป็นแบบเข็ม Pin point ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้ในการออกแบบ โดยรูเข้าแบบเข็ม Pin point นี้จะมีทฤษฎีสำหรับการคำนวณดังนี้ [8],[9]

$$\gamma = \frac{4Q}{\pi r^3} \quad (3)$$

$$r^3 = \frac{4Q}{\pi \gamma} \quad (4)$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{4Q}{\pi \gamma}} \quad (5)$$

โดยที่ r คือรัศมีของทางเข้า และ Q คือปริมาตรของชิ้นงานที่ต้องการ

3.1.4 ทฤษฎีพื้นฐานทางไฟฟ้าในต์เอลิเมนต์สำหรับการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

ระเบียบวิธีการจำลองผลเชิงตัวเลขในกระบวนการฉีดขึ้นรูปขึ้นรูปพลาสติก ได้ถูกจำลองและแก้ปัญหาด้วยระบบของสมการอนุพันธ์มวล สมการอนุพันธ์โมเมนตัมเชิงเส้น และสมการอนุพันธ์พลังงาน ซึ่งแสดงได้จากสมการที่ (6)–(8) [10]

$$\frac{d}{dt}\rho + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{d}{dt}v = \rho g - \nabla P + \eta \nabla^2 \quad (7)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial}{\partial t}T + v \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial}{\partial t}P + \vec{v} \cdot \nabla P \right) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \eta \gamma^2 \quad (8)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของของไหลในการวิเคราะห์, t คือ เวลา, v คือ ค่าความเร็วของเวกเตอร์, g คือ ค่าคงที่ของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, P คือ ค่าความดันในระบบการวิเคราะห์, η คือ ค่าความหนืดของของไหลที่ทำการวิเคราะห์, C_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อน, T คือ ค่าอุณหภูมิ, β ค่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน, k คือ การนำความร้อน, γ คือ อัตราแรงเฉือน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเราได้ทำการอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับเงื่อนไขการไหลตัวของพอลิเมอร์ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในระบบการวิเคราะห์ pvT ซึ่งรวมถึงความสัมพันธ์ที่เป็นส่วนประกอบของพอลิเมอร์ซึ่งมักจะอธิบายด้วยสมการ Tait และความหนืดที่ขึ้นกับความเร็วแบบจำลองมักอธิบายด้วย Cross-WLF [10],[11]

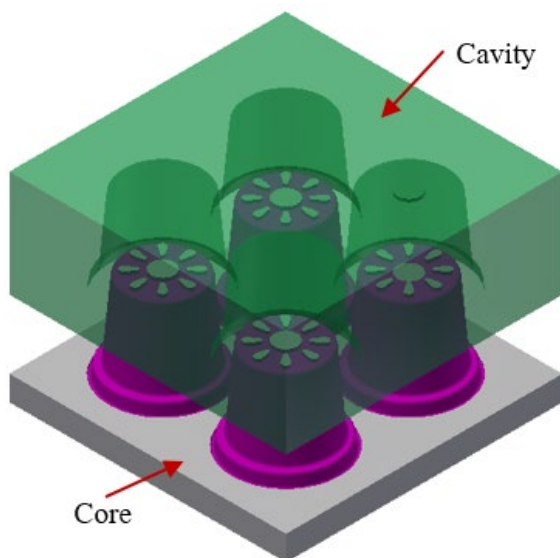
3.2 เทคนิคการสร้าง Core และ Cavity ที่เหมาะสม

ในการออกแบบรูปแบบของ Mold ในส่วนของ Core และ Cavity ใน โมดูลออกแบบแม่พิมพ์ Mold design ของโปรแกรม Autodesk Inventor Professional 2014 เราสามารถออกแบบและสร้างได้ 2 รูปแบบคือ แบบแรกเราสามารถที่จะทำการสร้างชิ้นงานพลาสติกจำนวน 4 ชิ้นงานพร้อมกัน ก่อนที่จะนำเข้าสู่โหมคของโมดูลออกแบบแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3



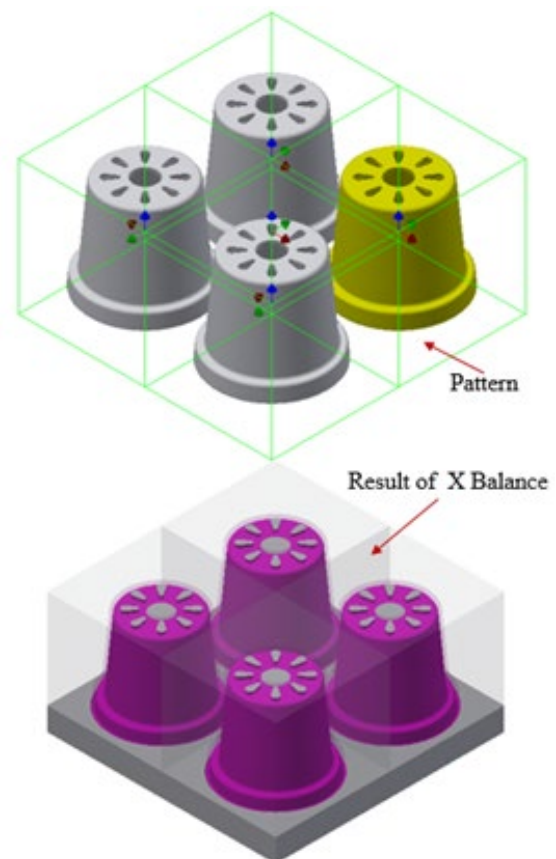
รูปที่ 3 ชิ้นงานพลาสติกจำนวน 4 ชิ้นงานจากการออกแบบ

เมื่อได้ชิ้นงานพลาสติกที่ต้องการดังรูปที่ 3 หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานพลาสติกเข้าสู่โหมดโมดูลออกแบบแม่พิมพ์ เพื่อทำการสร้าง Core และ Cavity ในส่วนนี้ผู้วิจัยจะทำการกำหนด Create patching surface เพื่อทำการปิดรูต่าง ๆ บนชิ้นงานพลาสติกด้วยคำสั่งอัตโนมัติ หลังจากนั้นจึงทำการกำหนด Work piece เพื่อกำหนดก้อนเหล็กจำลองก่อนทำการแบ่ง Core และ Cavity เมื่อได้ Work piece ตามที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการแบ่ง Core และ Cavity ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการแบ่งชิ้นงานที่จะชิ้นงาน และกำหนดขอบเขตจนครบทั้งหมด 4 ชิ้นงาน และได้ผลลัพธ์การสร้าง Core และ Cavity ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การสร้าง Core และ Cavity สำหรับรูปแบบที่หนึ่ง

ส่วนแบบที่สอง ผู้วิจัยทำการสร้างชิ้นงานพลาสติกจำนวน 1 ชิ้นงาน และนำเข้าสู่โหมดของโมดูล Mold design เพื่อทำการสร้าง Core และ Cavity เช่นเดียวกับแบบวิธีที่หนึ่ง แต่เปลี่ยนมาใช้เทคนิคในการสร้าง Pattern ให้ชิ้นงานพลาสติก โดยทำการกำหนด Pattern type เป็นแบบ X Balance และกำหนดค่า X Direction เท่ากับ 2 โดยมีค่า Distance เท่ากับ 79.814 มิลลิเมตร และ Y Direction เท่ากับ 2 โดยมีค่า Distance เท่ากับ 79.814 มิลลิเมตร และได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5



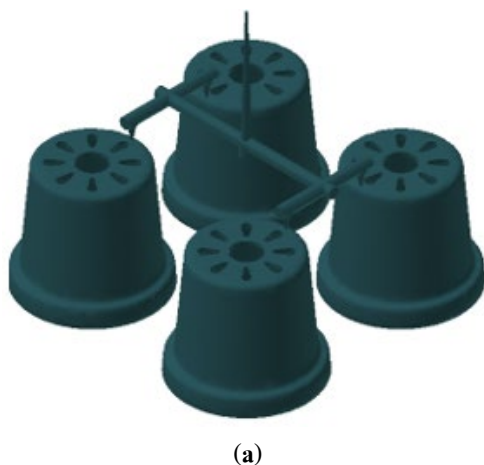
รูปที่ 5 การสร้าง Core และ Cavity สำหรับรูปแบบที่สอง

ข้อสรุปจากการศึกษาการสร้าง Core และ Cavity ทั้งสองรูปแบบพบว่า มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ในส่วนของรูปแบบแรก เป็นเทคนิคเฉพาะและให้ความสะดวกในเรื่องการของการสร้าง Core และ Cavity แต่มีข้อเสียในส่วนของการกำหนดจุดการฉีด (Gate location) ที่ไม่สามารถใช้งานแบบอัตโนมัติไม่ได้ เนื่องจากการวางตำแหน่งของการฉีดจะมีทิศทางกลับกันคนละด้านในกรณีที่ใช้คำสั่งอัตโนมัติ ส่วนแบบที่สอง เป็นเทคนิคมาตรฐาน

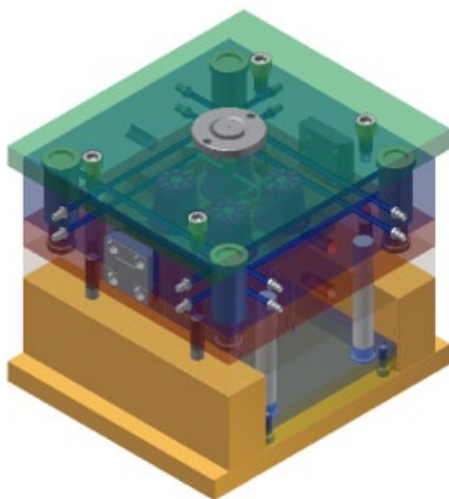
ที่นิยมใช้งานกันทั่วไป ส่วนของการกำหนดจุดการฉีด (Gate location) สามารถใช้งานแบบอัตโนมัติได้

3.3 ขั้นตอนก่อนการวิเคราะห์การฉีดขึ้นรูปพลาสติก

หลังจากได้ชิ้นงานของชุด Core และ Cavity แล้ว ขั้นตอนต่อไป คือขั้นตอนที่ผู้วิจัยจะทำการเตรียมข้อมูล เริ่มต้นสำหรับใช้ทำการจำลองรูปแบบการฉีดขึ้นรูปใน ส่วนของ Mold Fill Analysis ดังนั้นในส่วนนี้ผู้วิจัยจะทำการสร้างองค์ประกอบการฉีด เช่น เส้นทางกรว้างของเนื้อพลาสติก (Runner), ตำแหน่งการฉีด (Gate) และ Cool well เป็นต้น ซึ่งแสดงผลที่ได้ดังรูปที่ 6(a) หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการสร้าง Mold base ซึ่งประกอบไปด้วย โครงสร้างของแม่พิมพ์พลาสติก ชุด Sprue bushing, Location ring และ Ejector และจะได้ผลลัพธ์ของ องค์ประกอบแม่พิมพ์ดังรูปที่ 6(b)



(a)



(b)

รูปที่ 6 ตัวอย่างการสร้างองค์ประกอบของ Mold base

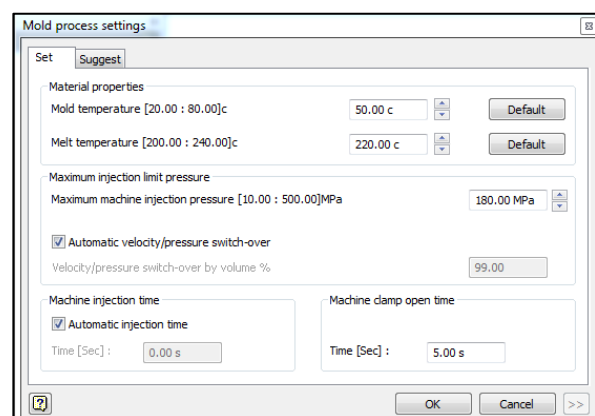
หลังจากที่ได้ดำเนินการออกแบบระบบการทำงานของ แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจนได้องค์ประกอบการฉีดครบตาม ต้องการในงานวิจัยแล้ว ขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยได้ดำเนินการ ทำการจำลองกระบวนการฉีดด้วยโมดูลโปรแกรม Mold Fill Analysis โดยจะทำการศึกษารูปแบบของตำแหน่งการ วาง Gate จำนวน 3 รูปแบบ คือรูปแบบ Pin Pin point และ Sprue โดยทำการกำหนดรูปแบบคุณสมบัติเชิงกลของการ ฉีดที่เหมือนกันดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการตั้งค่า Mold process

การจัดเตรียมข้อมูลเริ่มต้นของกระบวนการฉีดผู้วิจัยจะ ทำการอ้างอิงข้อมูลจากเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งจะประกอบ ไปด้วยข้อมูลที่สำคัญดังนี้คือ

- 1.) ตั้งค่า Mold temperature = 50°C
- 2.) ตั้งค่า Melt temperature = 220°C
- 3.) ตั้งค่า Mex machine injection pressure = 180 MPa
- 4.) ตั้งค่า Machine clamp open time = 5s หน้าตาการ

แสดงผลการตั้งค่าการฉีดแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าก่อนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

3.3.2 วัสดุที่ใช้ทั่วไป (Commonly used material)

- 1.) Manufacturer = A Schulan
- 2.) Trade name = Aqualoy 125B

3.3.3 ข้อมูลคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties)

- 1.) ค่าตัวแปร Elastic modulus 1st principal, direction
(E1) = 2,988 Mpa
- 2.) ค่าตัวแปร Elastic modulus 2nd principal, direction
(E2) = 2,891 Mpa

3.) ค่าตัวแปร Poisson's ratio (V12) = 0.409

4.) ค่าตัวแปร Poisson's ratio (V23) = 0.409

5.) ค่าตัวแปร Shear modulus (G12) = 852 MPa

3.3.4 ตั้งค่าคุณสมบัติของ Transversely Isotropic

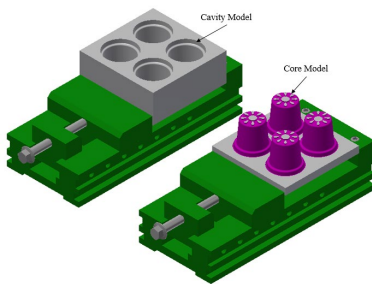
1.) ค่าตัวแปร Coefficient of thermal expansion (CTE) data

2.) ค่าตัวแปร Alpha1 = 6.31e-005 1/c

3.) ค่าตัวแปร Alpha1 = 7.39e-005 1/c

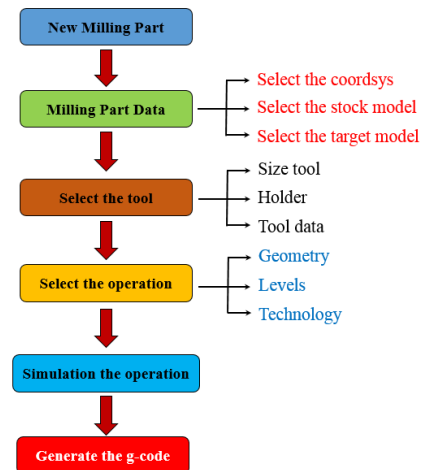
3.4 ขั้นตอนก่อนการกัดขึ้นรูปชิ้นงานของ Core และ Cavity

ขั้นตอนต่อไปเป็นเตรียมการในส่วนของการกระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงานแม่พิมพ์ ในส่วนนี้ผู้วิจัยจะนำชิ้นงานของ Core และ Cavity จากหัวข้อ 3.1 ดังรูปที่ 5 มาทำการประกอบกับชุดจับชิ้นงานแม่พิมพ์ (Work holding) จนได้ตามรูปแบบดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงชิ้นงาน Core และ Cavity สำหรับงานแคม

ก่อนทำการกัดขึ้นรูปชิ้นงานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกของชิ้นงานกระถางต้นไม้ของเล่น เพื่อจำลองเส้นทางการเดินของชุดไบมีดกัดขึ้นรูป (Toolpath) ที่ความเร็วรอบของชุดไบมีดกัดต่าง ๆ คือ 5000, 6000 และ 7000 รอบต่อนาทีตามลำดับ เพื่อจำลองระยะเวลาในการกัดขึ้นรูปของแต่ละ Operation เช่น การกัดแบบหยาบ (Roughing) การกัดแบบเก็บผิว (Finish) เป็นต้น ในงานวิจัย ผู้วิจัยได้แสดงขั้นตอนเพื่อทำการจำลองรูปแบบการเดินไบมีดกัดในงานวิจัยนี้สามารถทำการแบ่งการกัดงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ทำการกัดขึ้นรูปของ Core ด้วยฟังก์ชันการทำงาน 3D Milling และส่วนที่ทำการ Pocket 2.5D ให้กับชิ้นงาน Cavity ขั้นตอนในการทำ CAM operation ด้วยโปรแกรม InventorCAM 2014 ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงขั้นตอนการทำงานของแคมแบบ 3D Milling

4. ผลลัพธ์ของงานวิจัย

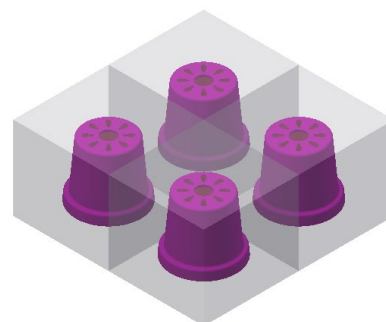
4.1 ผลลัพธ์การออกแบบชิ้นส่วนมาตรฐานของแม่พิมพ์ฉีด

พลาสติกสำหรับกระถางต้นไม้ของเล่น

ผลลัพธ์ของการออกแบบชิ้นส่วนมาตรฐานของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับกระถางต้นไม้ของเล่น ประกอบไปด้วยขั้นตอนการออกแบบที่สำคัญ คือ การออกแบบชิ้นงานพลาสติกที่ใช้ในการอ้างอิงเพื่อใช้ในการสร้าง Core และ Cavity โดยชิ้นงานพลาสติกที่สร้างจะเลือกสร้างเพียง 1 ชิ้นดังรูปที่ 10 หลังจากนั้นผู้วิจัยสามารถเลือกใช้วิธีการคัดลอกชิ้นงาน (Pattern) จะได้ผลลัพธ์ Cavity ที่ต้องการดังรูปที่ 11

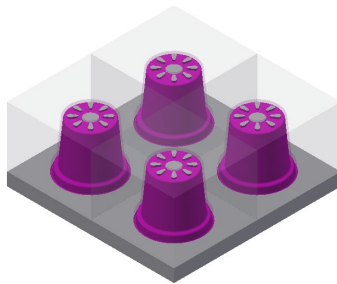


รูปที่ 10 ชิ้นงานพลาสติกของกระถางต้นไม้ของเล่น



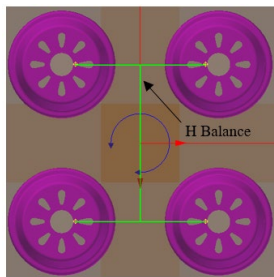
รูปที่ 11 ผลลัพธ์การคัดลอกชิ้นงานเพื่อกำหนด Cavity

หลังจากผู้วิจัยได้ทำการ Generate Core และ Cavity แล้วจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 12



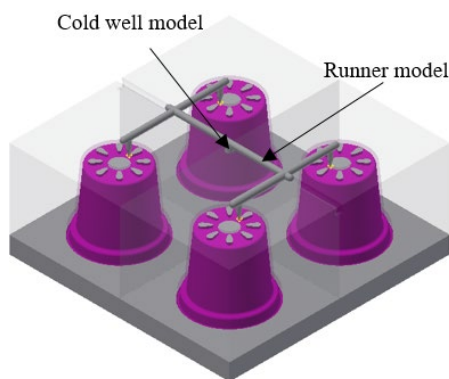
รูปที่ 12 ผลลัพธ์การ Generate Core และ Cavity

หลังจากนั้นผู้วิจัยจะทำการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งเข็มฉีด (Gate) พร้อมทั้งทำการกำหนด Runner Sketch โดยกำหนดรูปแบบเป็นแบบ H Balance ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดง Runner Sketch แบบ H Balance

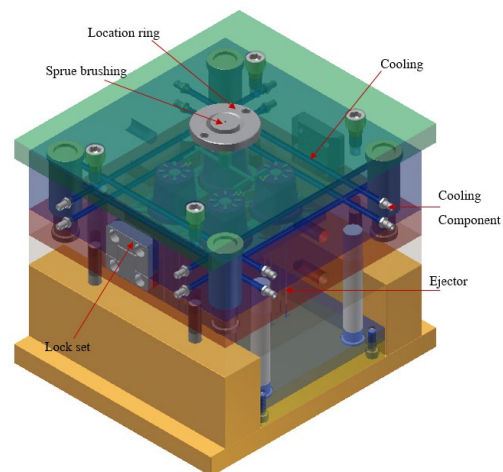
หลังจากนั้นจึงทำการสร้างรูปแบบของ Runner และทำการสร้าง Cold well จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงผลลัพธ์การสร้าง Runner

หลังจากนั้นให้ทำการสร้าง Mold base เพื่อนำชิ้นส่วนมาตรฐานของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกออกมาประกอบกับชิ้นงาน Core และ Cavity ของชุดแม่พิมพ์ที่ได้ทำการออก

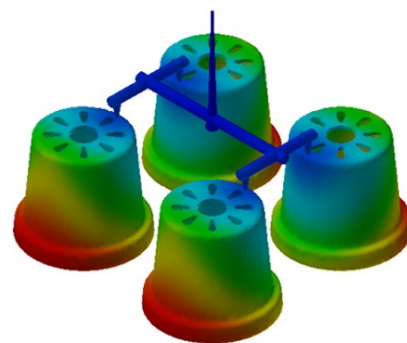
ไว้ในข้างต้น โดยทำการเลือกชนิดของแม่พิมพ์เป็นยี่ห้อ FUTABA ชนิด SA-S ของบริษัท FUTABA Corporation (Chiba-ken, Japan) ที่มีให้ใช้งานในโปรแกรม Inventor 2014 พร้อมกำหนด Sprue brushing, Location ring, Ejector, Cooling Component และในส่วนของ Lock set หลังจากนั้นจะได้ผลลัพธ์การสร้างองค์ประกอบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานกระถางต้นไม้ของเล่นดังรูปที่ 15



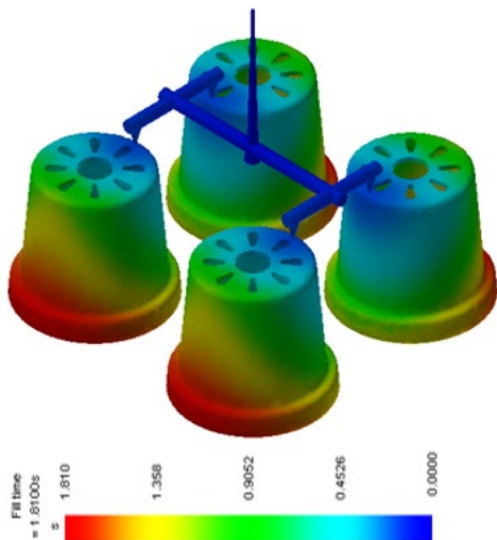
รูปที่ 15 แสดงผลลัพธ์การสร้าง Mold base

4.2 ผลลัพธ์ของกระบวนการฉีดพลาสติก

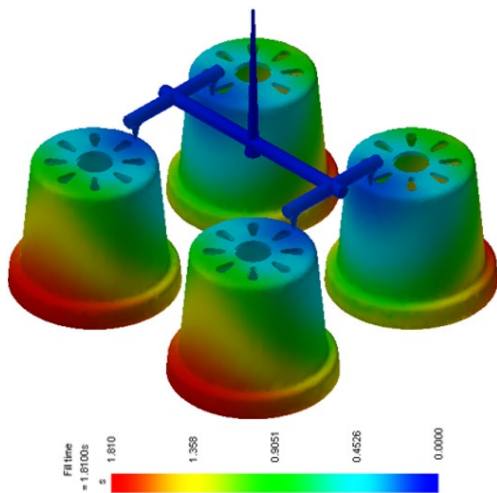
จากขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปรในส่วนของเงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปในหัวข้อที่ 3.2 จะได้ผลลัพธ์ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมและการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปตามแบบจำลองของ Gate จำนวน 3 รูปแบบ คือ Pin, Pin point และ Sprue ดังรูปที่ 16-18



รูปที่ 16 ผลลัพธ์การฉีดขึ้นรูปพลาสติกด้วย Pin



รูปที่ 17 แสดงผลลัพธ์การฉีดขึ้นรูปพลาสติกด้วย Pin point



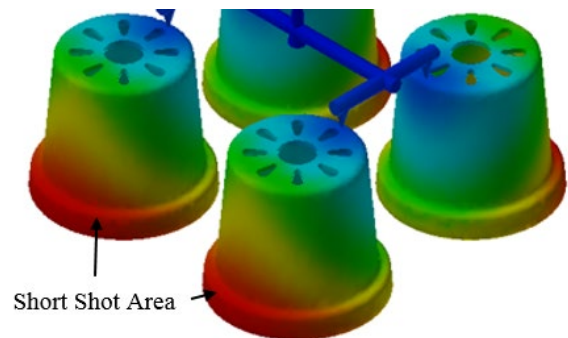
รูปที่ 18 ผลลัพธ์การฉีดขึ้นรูปพลาสติกด้วย Sprue

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกจาก gate แบบ Pin, Pin point และ Sprue พบว่าค่าการฉีดขึ้นรูป (Fill time) ของการฉีดขึ้นรูปของ Pin point และ Sprue จะได้ผลลัพธ์ที่มีค่าเท่ากันที่ 1.810 วินาที ที่ 46.309 และ 45.591 MPa ส่วน gate แบบ Pin นั้นให้ผลลัพธ์ในการฉีดขึ้นรูปพลาสติกที่ 1.923 วินาที ที่ 42.450 MPa ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์การฉีดพลาสติกด้วย Gate แบบต่าง ๆ

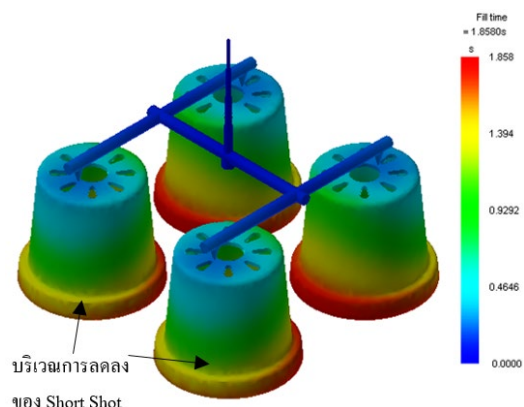
Gate types	Fill time	Injection pressure
Pin	1.923 (s)	42.450 MPa
Pin point	1.810 (s)	46.309 MPa
Sprue	1.810 (s)	45.591 MPa

จากการจำลองการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกของ กระดาษต้นไม้ของเล่น สามารถสรุปได้ว่า อาจเลือกใช้ ชนิดของ gate เป็นแบบ Pin point หรือแบบ Sprue ก็ได้ เนื่องจากช่วยลดเวลาในการฉีดได้ดีกว่าแบบ Pin และยัง ได้ค่าแรงดันในการฉีดที่สูงกว่าแบบ Pin ผลลัพธ์จากการ จำลองเชิงตัวเลขยังสามารถอธิบายได้ว่า ควรมีการปรับ รูปแบบในส่วนของการฉีดเพิ่มเติม เนื่องจากใน บางชิ้นงานพลาสติกที่ฉีดขึ้นรูปมีบางส่วนอาจจะมีการ ฉีดได้ไม่เต็มชิ้นงาน (Short shot) ดังรูปที่ 19



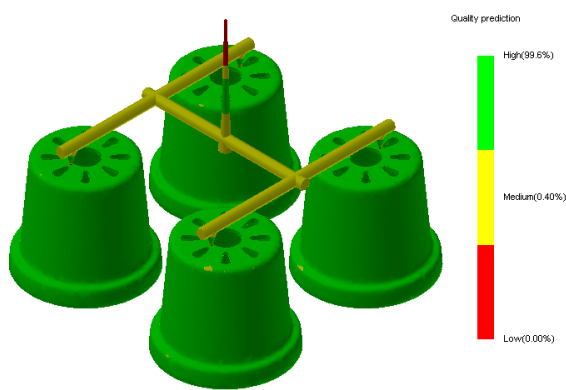
รูปที่ 19 แสดงผลลัพธ์การฉีดไม่เต็ม Short shot

จากตารางที่ 1 ผลการศึกษาและการจำลองเชิงตัวเลข ของการฉีดพบว่า รูปแบบของ Gate ที่สามารถสร้างอัตรา การฉีดขึ้นรูปที่ดี คือรูปแบบ Pin point และแบบ Sprue ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกแบบ Pin point ในการปรับตำแหน่ง ของการฉีดขึ้นรูปใหม่ ผลจากการปรับตำแหน่งการขึ้นรูป ชิ้นงานใหม่พบว่า สามารถช่วยลดสัดส่วนของการไหลที่ ไม่เต็ม (Short shot) ได้ดีขึ้นดังรูปที่ 20

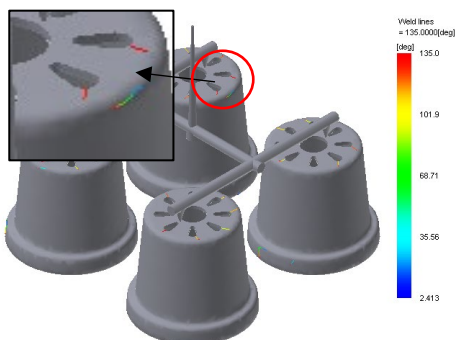


รูปที่ 20 แสดงผลลัพธ์ Fill time หลังการปรับตำแหน่ง การฉีดขึ้นรูปเพื่อลดสัดส่วนการฉีดขึ้นรูปไม่เต็ม

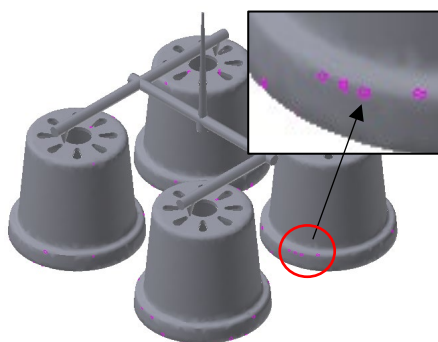
จากผลลัพธ์การจำลองผลเชิงตัวเลขในส่วนของการจำลองคุณภาพในการขึ้นรูปของเนื้อพลาสติก พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 99.6 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถอธิบายด้วยแถบสีดังแสดงในรูปที่ 21 ส่วนรูปที่ 22 จะแสดงผลถึงการผสานตัวของเนื้อพลาสติก กล่าวคือ ตำแหน่งที่เกิดเส้นสีคือตำแหน่งที่เนื้อพลาสติกไหลมาบรรจบกัน รอยสีที่เกิดขึ้นนั้นแสดงให้เห็นถึงช่วงอุณหภูมิของพลาสติกเหลวต่ำเกินไป และรูปที่ 23 จะอธิบายถึงการอันของอากาศภายใน Core และ Cavity ของกระบวนการฉีดขึ้นรูป ที่ไม่สามารถระบายออกจากโพรงของแม่พิมพ์ได้ทันเวลา



รูปที่ 21 การทำนายคุณภาพการฉีดพลาสติก



รูปที่ 22 แสดงผลลัพธ์และลักษณะของ Weld line



รูปที่ 23 แสดงผลลัพธ์และลักษณะของ Air traps

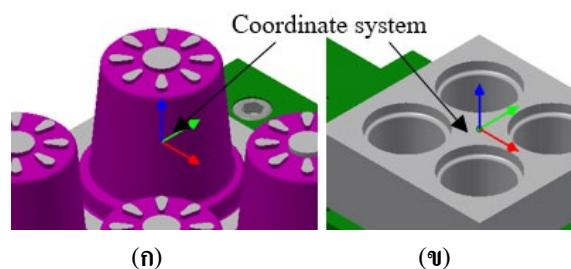
4.3 ผลลัพธ์การสร้างเส้นทางการเดินใบมีดกัด (Toolpath)

การจำลองเส้นทางการเดินของชุดใบมีดกัดขึ้นรูป (Toolpath) ที่ความเร็วรอบของชุดใบมีดกัดต่าง ๆ จะประกอบไปด้วยผลลัพธ์ของวิธีการสร้าง Operation 2 แบบ คือ การสร้าง 3D Milling และงาน Pocket โดยจะมีขั้นตอนและผลลัพธ์การสร้างดังนี้

4.3.1 การสร้าง 3D Milling และงาน Pocket

1.) CAM-Part

ผลลัพธ์การสร้าง Coordinate system ในกระบวนการของแคมของโปรแกรม InventorCAM เวอร์ชัน 2014 เป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก ซึ่งการสร้าง Coordinate system นั้นจะเริ่มต้นจากส่วนของ Core และ Cavity ซึ่งเป็นชิ้นส่วนหลักของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในงานวิจัย โดย Coordinate system ที่สร้างขึ้นจะเป็นกระบวนการ Operation ที่ใช้กำหนดจุดอ้างอิงให้เครื่องจักรซีเอ็นซีได้รู้จักระบบพิกัดต่าง ๆ บนชิ้นงานที่ต้องการทำแคม ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 24

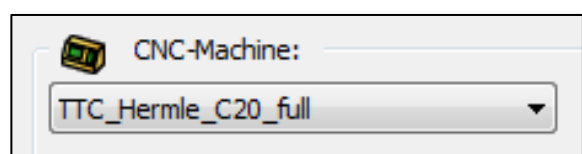


รูปที่ 24 แสดงผลลัพธ์การสร้าง Coordinate system

(ก) Core (ข) Cavity

2.) ผลลัพธ์การสร้าง CNC Machine

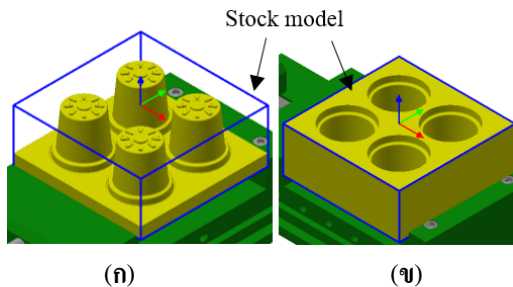
เป็นขั้นตอนการสร้าง CNC Machine ของ Core และ Cavity ซึ่งเป็นขั้นตอนการกำหนดคอนโทรลเลอร์ให้ตรงตามเครื่องจักรที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้จะเลือกเป็นแบบ TTC_Hermle_C20_full ดังแสดงในรูปที่ 25



รูปที่ 25 แสดงผลลัพธ์การสร้าง TTC_Hermle_C20_full

3.) ผลลัพธ์การสร้าง Stock model

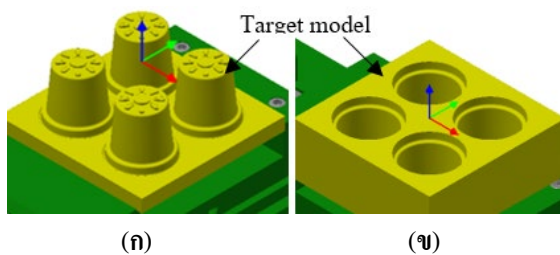
เป็นขั้นตอนการกำหนดรูปแบบ Stock model ในงานวิจัยนี้จะเลือกเป็นแบบชนิด Both และกำหนดรูปแบบเป็น Box โดยจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 แสดงผลลัพธ์การสร้าง Stock model
(ก) Core (ข) Cavity

4.) ผลลัพธ์การสร้าง Target model

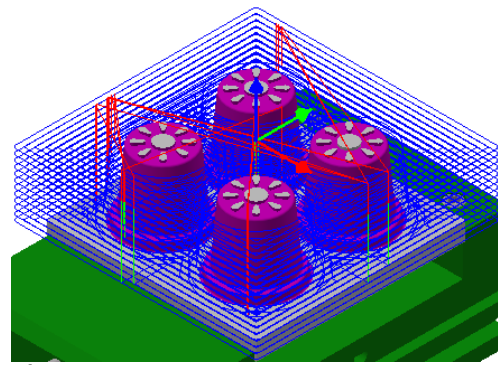
ขั้นตอนการกำหนดรูปแบบ Target model ในงานวิจัยนี้จะเลือกเป็นแบบชนิด Both โดยจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 27



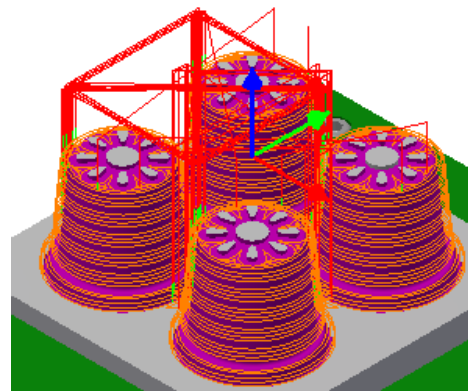
รูปที่ 27 แสดงผลลัพธ์การสร้าง Target model
(ก) Core (ข) Cavity

4.3.2 การสร้าง Operation ของ Milling

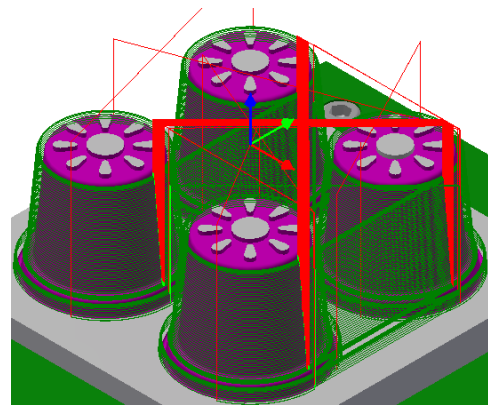
ในการสร้าง Operation ของงาน 3D Milling สำหรับการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน Core จะประกอบไปด้วยงานทั้งหมด 4 Operation คือ การกัดหยาบ Roughing ด้วยใบมีด 16 มิลลิเมตร การกัดหยาบ Roughing ด้วยใบมีด 6 มิลลิเมตร การกัดละเอียด Finish ด้วยใบมีด 6 มิลลิเมตร และการกัดละเอียด Finish ด้วยใบมีด 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะได้ผลลัพธ์การสร้างดังรูปที่ 28–32 และได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 2



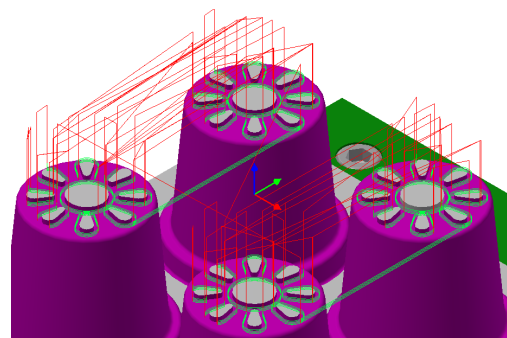
รูปที่ 28 Toolpath การกัดหยาบด้วยใบมีด 16 มิลลิเมตร



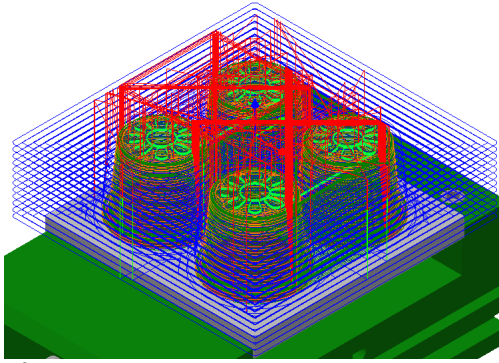
รูปที่ 29 Toolpath การกัดหยาบด้วยใบมีด 6 มิลลิเมตร



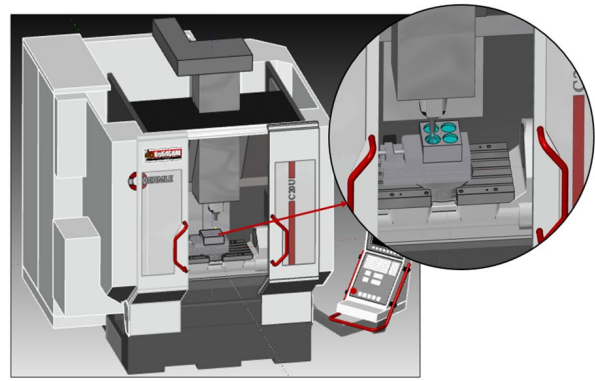
รูปที่ 30 Toolpath การกัดละเอียดด้วยใบมีด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 31 Toolpath การกัดละเอียดด้วยใบมีด 3 มิลลิเมตร



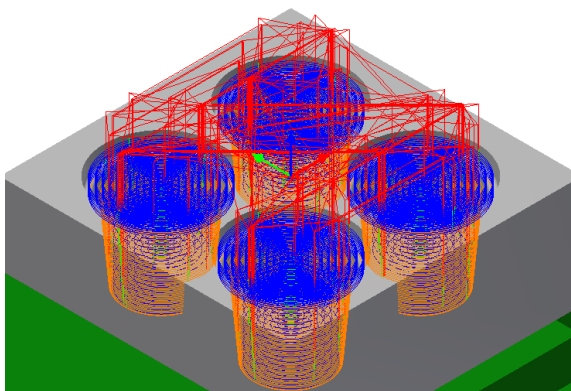
รูปที่ 32 Toolpath ในแต่ละ Operation ของงานกัด Core



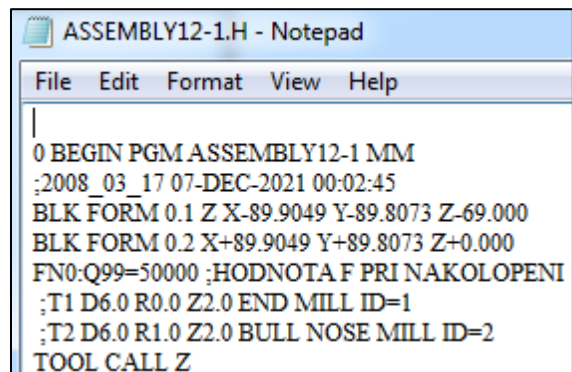
รูปที่ 34 การจำลอง Machine Simulation

4.3.3 การสร้าง Operation ของงาน Pocket

ในการสร้าง Operation ของงาน Pocket สำหรับการกัด ขึ้นรูปชิ้นงาน Cavity จะประกอบไปด้วยงานทั้งหมด 3 Operation คือ การกัดหยาบ Roughing ด้วยใบมีด End mill ขนาด 6 โดยกำหนดค่า Pocket depth เท่ากับ -9 มิลลิเมตร พร้อมทั้งกำหนด Mex Step down ในการกัดหยาบเท่ากับ 3 หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการกัดหยาบ Operation ที่ 2 ด้วย ใบมีด End mill ขนาด 6 โดยกำหนดค่า Pocket depth เท่ากับ -50 มิลลิเมตร พร้อมทั้งกำหนด Mex Step down ในการกัดหยาบเท่ากับ 5 หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการกัดขึ้นรูป ในส่วนงาน Operation ที่ 3 ด้วยดอกกัดแบบ Bull Nose Mill ขนาด 6 มิลลิเมตร ทำการกำหนดขอบเขตการกัดเก็บงานละเอียด จะได้ผลลัพธ์การสร้าง Toolpath ดังรูปที่ 33 และสามารถสรุปผลลัพธ์ได้ดังตารางที่ 3 และยังสามารถ จำลอง Machine Simulation ของการผลิตได้ดังรูปที่ 34 พร้อมทั้งสามารถทำการสร้างรูปแบบไฟล์จีโค้ดที่สามารถ นำไปใช้ในการควบคุมเครื่องจักรได้ดังรูปที่ 35



รูปที่ 33 Toolpath ในแต่ละ Operation ของงานกัด



รูปที่ 35 ตัวอย่างรูปแบบจีโค้ดในงานวิจัยนี้

จากตารางที่ 2 และ 3 และการจำลองกระบวนการกัด ขึ้นรูปชิ้นงาน Core และ Cavity ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก กระดาษต้นไม้ของเล่น ผู้วิจัยได้กำหนดค่า Chip load เท่ากับ 0.01 โดยค่า Chip load เป็นค่าตัวแปรแสดงปริมาณ วัสดุที่ถูกตัดออกจากขอบตัดแต่ละชิ้นระหว่างการตัด ซีเอ็นซี โดยผู้วิจัยจะนำค่าตัวแปรมาทำการคำนวณหา ค่าอัตราการป้อน (Feed rate) ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการป้อน ค่าให้กับโปรแกรม InventorCAM ซึ่งรูปแบบการคำนวณ อัตราการป้อนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9)

$$\text{Feed rate} = \frac{(\text{RPM} \times N \times \text{Cutting dia} \times CT)}{39.374} \quad (9)$$

โดยที่ N = จำนวนฟันกัด

CT = Chip load

$$\text{Feed rate} = (5000 \times 2 \times 0.63 \times 0.01) / 39.374$$

$$= 1.6 \text{ เมตรต่อนาที}$$

$$= 1600 \text{ มิลลิเมตรต่อวินาที}$$

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ของงานกัดขึ้นรูปชิ้นงาน Milling

RPM	Tool Size		Operation Milling	Chip load	Feed rate	Time
	mm	inch				
5,000	16	0.63	3D Roughing	0.01	1,600	1:21:35
	6	0.24	3D Roughing	0.01	610	1:45:35
	6	0.24	3D Finish	0.01	610	4:46:16
	3	0.118	3D Finish	0.01	300	0:35:58
6,000	16	0.63	3D Roughing	0.01	1,920	1:10:45
	6	0.24	3D Roughing	0.01	732	1:38:06
	6	0.24	3D Finish	0.01	732	2:31:26
	3	0.118	3D Finish	0.01	360	0:32:29
7,000	16	0.63	3D Roughing	0.01	2,240	1:03:01
	6	0.24	3D Roughing	0.01	854	1:32:57
	6	0.24	3D Finish	0.01	854	2:16:05
	3	0.118	3D Finish	0.01	420	0:29:58

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ของงานกัดขึ้นรูปชิ้นงาน Pocket

RPM	Tool Size		Operation Pocket	Chip load	Feed rate	Time
	mm	inch				
5,000	6	0.24	Pocket Roughing	0.01	610	0:26:39
	6	0.24	Pocket Roughing	0.01	610	2:22:01
	6	0.24	HSS Surface	0.01	610	2:04:35
6,000	6	0.24	Pocket Roughing	0.01	610	0:22:31
	6	0.24	Pocket Roughing	0.01	610	2:15:13
	6	0.24	HSS Surface	0.01	610	1:55:11
7,000	6	0.24	Pocket Roughing	0.01	610	0:19:34
	6	0.24	Pocket Roughing	0.01	610	2:10:23
	6	0.24	HSS Surface	0.01	610	1:48:30

5. สรุปผลของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งรูปแบบการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของการออกแบบขึ้นส่วนแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ส่วนการจำลองกระบวนการกัดขึ้นรูปพลาสติก และส่วนของการจำลองกระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซี จากผลลัพธ์ของการศึกษาทั้งสามส่วนพบว่า การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมในการสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกจะช่วย

ลดความซับซ้อนและช่วงเวลาในการออกแบบได้มากขึ้น ส่วนการจำลองกระบวนการกัดด้วยหลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า การวางตำแหน่งของเข็มฉีดเนื้อพลาสติกที่เหมาะสม (Gate) จะสามารถช่วยให้กระบวนการกัดมีประสิทธิภาพและลดอัตราการเกิด Short shot (ฉีดไม่เต็ม) ได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ในส่วน of ผลลัพธ์ของ Operation Milling และ Pocket ในการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน Core และ Cavity ของขึ้นส่วนงานกระถาง

ต้นไม้ของเล่นในตารางที่ 2 และ 3 พบว่า ความเร็วรอบของเครื่องจักรและอัตราการป้อน (Feed rate) จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพงาน และประสิทธิภาพของเครื่องจักรซีเอ็นซี เนื่องด้วยความเร็วรอบและอัตราการป้อนจะสัมพันธ์ไปกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานแต่ละ Operation ถ้าใช้ค่าอัตราการป้อนที่ไม่เหมาะสม สิ่งที่มาในการทำแคมอาจส่งผลต่อชุดไบมีดหรืออายุการใช้งานของไบมีดกัด ในทำนองเดียวกัน ถ้าเราใช้รอบการหมุนในการทำงานงานแต่ละ Operation ที่ไม่เหมาะสมอาจจะส่งผลเสียในเรื่องของพลังงานที่อาจสูญเสียไปในกระบวนการผลิต เป็นต้น ผลงานวิจัยทั้งสามส่วนสามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบ และศึกษาในเรื่องการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในแบบต่าง ๆ ได้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิชาการนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเงินทุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พิษณุโลก และขอขอบคุณวิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลกที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องสถานที่ทำงานวิจัยและการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Nazma, Md. Raihan Quader, Md. Jakaria and Md. H. Rahmn, "SolidCAM iMachining (2D): A Simulation Study of a Spur Gear Machining and G-code Generation for CNC Machine," *International Journal of Mechanical Engineering and Automation*, vol. 3, no. 1, p. 1–9, 2016.
- [2] M. P. Groover and E. W. Zimmers, "Conventional Numerical Control," in: *CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing*, New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc, 1984, pp. 113
- [3] F. David and H. Ron, "CNC Machining Plastic Injection Mold Plates in the Classroom," in *37th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, Milwaukee, WI, USA, Oct. 10–13, 2007, pp. 12–17, doi: 10.1109/FIE.2007.4417886.
- [4] P. Izol, M. Tomas and J. Beno, "Milling strategies evaluation when simulating the forming dies functional surfaces production," *De Gruyter Open Eng*, vol. 6, pp. 98–105, 2016, doi: 10.1515/eng-2016-0013.
- [5] J. Varga and E. Spisak, "Influence of the milling strategies on roundness of machined surfaces," *Acta Mechanica Slovaca*, vol. 24, no. 3, pp. 20–27, 2020, doi: 10.21496/ams.2020.001.
- [6] M. Ficko, J. balic, I. Pahole, J. Senveter, S. Brezovnik and S. Klancnik, "Expectations of automatic programming of CNC machine tool," *Advances in Production Engineering and Management*, vol. 5, no. 3, pp. 193–199, 2000.
- [7] Z. Rutkauskas and A. Bargelis, "Knowledge – based method for gate and cold runner definition in injection mold design," *Mechanika open access*, vol. 4, no. 66, p. 49–54, 2007.
- [8] L. Werayoot, "The design of Plastic Injection Mold using Finite Element Analysis," *Narasuan University Engineering Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 101–109, 2016.
- [9] O. Thanit and T. Prawit, "Analysis of the Flow front on the Cup of Injection Mold." Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Phranakhon Si Ayutthaya, Thailand, Research. Rep. 1–97, 2014.
- [10] L. Dalio, R. Francesco, B. Federico, C. Matteo, Q. Danilo, Z. Yang and T. Guido, "Experimental Validation of Injection Molding Simulations of 3D Micro parts and Micro Structured Components Using Virtual Design of Experiments and Multi-Scale Modeling," *Micromachines*, vol. 11, no. 6, pp. 614, 2020, doi: 10.3390/mi11060614.
- [11] H. H. Chang, C. A. Hieber and K. K. Wang, "A unified Simulation of the Filling and Post-Filling Stages in Injection Molding. Part I Formulation," *Polymer Engineering & Science*, vol. 31, no. 2, pp. 116–124, 1991, doi: 10.1002/pen.760310210.

การจัดเส้นทางขนส่งสำหรับปัญหาการรับและส่งมอบในระบบจักรยานเช่าสาธารณะ:
กรณีศึกษาระบบจักรยานเช่าสาธารณะ จังหวัดเชียงใหม่

Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem in Bike Sharing System: A Case
Study of the Chiang Mai Bike-Sharing System, Thailand

ศรายุทธ ก้านะโน^{1*} และ มณวิภา อวัพพันธุ์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร

กรุงเทพมหานคร 10900

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่ ซ่างเฟือก

เมือง เชียงใหม่ 50300

Katayut Kamano ^{1*} and Monwipa Arviphan ²

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Lat Yao, Chatuchak,

Bangkok, 10900, Thailand

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna,

Changpuak, Muang, Chiang Mai, 50300, Thailand

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

Received: Oct 20, 2022; Revised: Dec 26, 2021; Accepted: Feb 04, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจัดเส้นทางขนส่งสำหรับปัญหาการรับและส่งมอบในระบบจักรยานเช่าสาธารณะ กรณีศึกษาระบบจักรยานเช่าสาธารณะ จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อกำหนดเส้นทางขนส่งจักรยานเช่าสาธารณะจากศูนย์กระจายจักรยานไปยังสถานีปลายทาง 12 สถานี โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยทั้งหมด 2 ประการ ได้แก่ เพื่อให้มีระยะทางรวมที่สั้นที่สุด และหาความจุยานพาหนะที่ใช้ในการบรรทุกจักรยานที่เหมาะสม เนื่องจากค่าขนส่งเป็นต้นทุนหลักในการกระจายจักรยาน เพราะฉะนั้นการจัดเส้นทางขนส่งจักรยานจึงเป็นสิ่งสำคัญ ทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งในลักษณะที่มีทั้งการรับและส่งมอบ โดยพิจารณาเส้นทางขนส่งในปัจจุบันเทียบกับเส้นทางขนส่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าหากทำการขนส่งตามเส้นทางที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสามารถลดระยะทางขนส่งได้ 6.33 กิโลเมตรต่อรอบ แต่หากเปลี่ยนยานพาหนะชนิดใหม่ที่มีความจุจักรยานขนส่งลดลงจากพาหนะปัจจุบัน จะสามารถลดระยะทางลงได้ 4.83 กิโลเมตรต่อรอบ ด้วยการปรับขนาดของยานพาหนะที่บรรทุกของจักรยานผู้ให้บริการจะสามารถเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองและค่าใช้จ่ายอื่นๆเพิ่มเติมได้

คำสำคัญ: การจัดเส้นทางขนส่ง, จักรยานเช่าสาธารณะ, ปัญหาการรับและการส่งมอบ, การปรับสมดุลจำนวนจักรยาน

Abstract

This research will discuss several of the problems facing vehicle routing for delivery and pick-up services related to the bike-sharing system. Specifically, this research will analyse a case study of the Chiang Mai bike-sharing system, in

Thailand. This research will propose resolutions by routing the bike reallocation between the distribution hub to the 12 terminal bike stations in order to minimize the total distance of bike reallocation to reach an optimal fleet capacity. Given that transportation costs are significant for the bike-sharing system, it is crucial to consider route reallocation as a means to ensure economic success and viability. The study regarding pick-up and delivery routing problems was conducted by comparing current routing with a mathematical routing model. According to the computational model, the reallocation distance can be decreased by 6.33 km. The benefits of an alteration to the existing fleet with a lower capacity is also argued. These reallocations may reduce the total distance by only 4.83 km per route. The alternative fleet capacity providing the bike-sharing enterprises for making bike- reallocation cost properly.

Keywords: Vehicle routing problem, bike-sharing system, pick-up and delivery problem, bike rebalancing

1. บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับปัญหาการจัดเส้นทาง การรับและส่งมอบในระบบจักรยานเช่าสาธารณะ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบจักรยานเช่าของเทศบาลนคร เชียงใหม่ ซึ่งได้เปิดบริการให้แก่ประชาชนในเขตพื้นที่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ สามารถเช่าจักรยานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ แบ่งสถานีให้บริการเป็น 3 เขตพื้นที่ รวมทั้งหมด 13 สถานี กระจายอยู่บริเวณอำเภอเมือง เชียงใหม่ โดยมีสถานีหน้าพิพิธภัณฑสถานล้านนาและ สถานีหน้าวัดพระสิงห์เป็นจุดที่มีเจ้าหน้าที่ให้บริการ ผู้ที่สนใจใช้บริการต้องดำเนินการลงทะเบียนด้วยบัตรประชาชนสำหรับคนไทย หรือ หนังสือเดินทางสำหรับนักท่องเที่ยวต่างชาติก่อนที่จะทำการเช่าจักรยาน ทั้งนี้ ผู้ใช้บริการสามารถเช่าจักรยานจากสถานีต้นทางเพื่อไปยังจุดหมายที่ต้องการ และจอดจักรยานคืนยังสถานีปลายทาง โดยไม่จำเป็นต้องนำจักรยานกลับไปคืนยังสถานีต้นทางได้ ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 24.00 น.

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของโครงการจักรยานเช่า สาธารณะพบว่า เนื่องจากผู้ให้บริการสามารถเช่าจักรยาน จากสถานีต้นทางเพื่อเดินทางไปยังจุดหมายที่ต้องการ และ จอดจักรยานคืนยังสถานีปลายทางโดยไม่จำเป็นต้องนำ จักรยานกลับไปคืนยังสถานีต้นทาง ทำให้ในเวลา ก่อนระบบเปิดให้ใช้งานในช่วงเช้า (ระบบจักรยานเช่าจะปิดให้ เช่าจักรยานตั้งแต่ 24.00 น.-8.00 น.) บางสถานีมีจำนวน จักรยานไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ เนื่องจากถูกยืมออกไปเป็นจำนวนมาก และบางสถานีมี

ช่องจอดจักรยานไม่เพียงพอต่อจำนวนของจักรยานที่นำมา คืนเนื่องจากเป็นจุดที่มีผู้เช่าจักรยานมากเป็นจำนวน มาก

ทั้งนี้เจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบจักรยานเช่าจะใช้ช่วงเวลาที่ ระบบปิดเพื่อนำจักรยานไปเติมในสถานีที่มีจำนวน จักรยานไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ และ นำจักรยานที่ไม่ได้เก็บเข้าสู่ช่องจอดไปเติมยังสถานีอื่น หรือ นำจักรยานเข้าสู่ศูนย์กระจายจักรยานในกรณีที่ทำการ ขนส่งจักรยานครบทุกสถานี ด้วยการใช้รถกระบะบรรทุก จักรยานวนรอบเมืองเชียงใหม่โดยไม่มีการวางแผนการ เดินทางขนส่ง ซึ่งการจัดการขนส่งจักรยานไปยังสถานีต่าง ๆ ให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการโดยมี ค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดนั้น เป็นหนึ่งในปัญหาหลักของการ จัดการระบบจักรยานเช่าสาธารณะ เนื่องจากเจ้าหน้าที่ยัง ไม่มีวิธีการและเครื่องมือในการจัดการด้านการขนส่งที่ดี นอกจากการใช้ประสบการณ์ของผู้ที่มีหน้าที่รับผิดชอบใน การขนส่งเท่านั้น จึงส่งผลให้เกิดรอบการขนส่ง หรือ จำนวนเที่ยวในการขนส่งมากกว่าที่ควรจะเป็น และทำให้เกิดระยะทางในการขนส่งที่มากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนในการ ขนส่งมากขึ้นอีกด้วย

ด้วยเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเกี่ยวกับ การแก้ปัญหาการจัดเส้นทาง การขนส่งจักรยานเช่า สาธารณะในลักษณะของการขนส่งที่มีทั้งการรับและการ ส่งมอบ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดปัญหาหลักของการเข้า ใช้บริการของลูกค้าและลักษณะการขนส่งจักรยานเช่า สาธารณะ จากนั้นทำการออกแบบการจำลองสถานการณ์ อัตราการเข้ามาของผู้ใช้บริการ เพื่อวิเคราะห์หาเส้นทาง

การขนส่งจักรยานด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยมีเป้าหมายคือ ระยะเวลารวมของการขนส่งที่ต่ำที่สุด และจำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการบรรทุกจักรยานที่เหมาะสมที่สุด

ระบบจักรยานเช่าสาธารณะ (Bike Sharing System) ถือเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกสาธารณะที่จัดสรรให้กับผู้ที่อาศัยอยู่ในชุมชนเพื่อการเดินทางในระยะสั้น ผู้ใช้บริการจะเช่าจักรยานจากสถานที่ต้นทาง ปั่นเดินทาง และจะต้องคืนจักรยานในสถานีปลายทาง หรือนำมาคืนที่สถานีเดิมก็ได้ ซึ่งระบบจักรยานสาธารณะส่วนใหญ่จะให้บริการโดยส่วนราชการในท้องถิ่นนั้นๆ หรือร่วมมือกับภาคเอกชน โดยส่วนมากสถานีเช่าจักรยาน จะตั้งอยู่ใกล้กับสถานีรถบัส สถานีรถไฟ เพื่อการเชื่อมต่อการเดินทางของผู้ใช้บริการ [1] ปัจจุบันมีระบบสถานีรถจักรยานสาธารณะมากกว่า 200 ระบบที่เปิดให้บริการทั่วโลก [2] แต่ก็มีหลายระบบที่ปิดตัวลงและมีการให้บริการที่ไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากต้นทุนการให้บริการที่สูง รวมไปถึงระบบการบำรุงรักษาที่มีราคาสูง

ในปัจจุบันระบบจักรยานสาธารณะสามารถแบ่งการให้บริการด้วยเทคโนโลยีที่ใช้ในการให้บริการที่แตกต่างกันหลากหลาย เช่น การใช้ระบบบัตรสำหรับเช่าและค่าบริการอัตโนมัติ การเช่าและการคืนสามารถตรวจสอบได้ทันทีผ่านทางระบบสารสนเทศ รวมไปถึงสถานการณ์ให้บริการ สถานีต่างๆ ระบบประเภทนี้จะมีค่าติดตั้ง และค่าการบำรุงรักษาที่ค่อนข้างสูง โดยมีการรายงานว่าจะต้องมีการลงทุนต่อปีถึง 3,000–4,000 เหรียญสหรัฐ ต่อจักรยาน 1 คัน ในระบบจักรยานสาธารณะในเมือง นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา มีค่าบำรุงรักษาประมาณ 1,600 เหรียญสหรัฐ และมีค่าการเคลื่อนย้ายเพื่อเติมจักรยานในสถานีที่ขาดจักรยานประมาณ 3 เหรียญสหรัฐต่อครั้ง [1].

มีการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนระบบจักรยานสาธารณะ การจัดการโครงข่าย และความสามารถในการให้บริการจักรยานสาธารณะในระยะยาว เพื่อจะเป็นตัวการในการตัดสินใจในการจัดการของระบบ García และคณะ และ Midgley [3],[4] ได้ศึกษาและวิเคราะห์ ความต้องการของจักรยานในระบบปิดระหว่างจุดต่างๆ ในระบบขนส่ง

สาธารณะ เพื่อจะออกแบบจุดหมายของการเดินทางของผู้ใช้ เพื่อให้เกิดจุดบริการที่เหมาะสม Sayarshad และคณะ [5] ได้ศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาความคุ้มค่าของระบบจักรยานเช่าสาธารณะ โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจะหาจุดคุ้มค่า โดยมีการกำหนดวัตถุประสงค์เป้าหมายของการศึกษาคือ การได้ประโยชน์สูงสุดจากค่าเช่าจากระบบจักรยานสาธารณะ โดยมีข้อจำกัดทั้งด้านต้นทุน การเสียค่าปรับในกรณีไม่มีจักรยานให้เข้าในระบบ รวมไปถึงอุปทานที่สูงมากจนระบบไม่สามารถรองรับได้

นอกจากความสามารถของระบบแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความสะดวกในการให้บริการ กล่าวคือเมื่อระบบดำเนินการไป จะต้องมีการเติมจักรยานในสถานีที่มีจักรยานจำนวนน้อย เพื่อรองรับผู้เช่า และจะต้องนำจักรยานออกจากสถานีเมื่อจำนวนจักรยานในสถานีมีมากเกินไปทำให้ผู้เช่าไม่สามารถคืนจักรยานได้ Raviv และคณะ [6] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Mixed Integer Linear Programming (MILP) ซึ่งได้สร้างขึ้นด้วย ปัจจัยทั้งแบบสุ่มและปัจจัยแบบพลวัตของอุปทานในสมการวัตถุประสงค์ Ho และ Szeto [7] ได้ใช้วิธีการ การค้นหาแบบ Tabu เพื่อจะหาค่าปรับที่ต่ำที่สุดในแต่ละสถานีในสมการวัตถุประสงค์ ในการปรับสมดุลในระบบจักรยาน โดยการทดลองของพวกเขาได้แสดงให้เห็นว่า การใช้การค้นหาแบบ Tabu เป็นวิธีการที่ประยุกต์ใช้ได้งานและได้ผลดีต่อปัญหาประเภทนี้ Vogel และคณะ [8] ได้ใช้ MILP เพื่อหาค่าคาดหวังของต้นทุนที่น้อยที่สุดในการจัดสรรจักรยานในระบบจักรยานเช่าสาธารณะในกรุงเวียนนา พวกเขาได้สร้างระบบ Hybrid Metaheuristic โดยการใช้วิธีการค้นหาเพื่อนบ้านที่ใกล้เคียงขนาดใหญ่ (Large Neighborhood Search) นอกจากนี้ Wichapa และคณะ [9] ได้มีการศึกษา ปัญหาการจัดเส้นทางจักรยานแบบมีกรอบเวลา (Vehicle Routing Problem with Time Windows) ซึ่งเป็นส่วนขยายจาก (Vehicle Routing Problem) โดยเป็นการนำเสนออัลกอริทึมเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งเป็นปัญหาแบบ Np-hard โดยได้เสนออัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบผสมผสาน (Hybrid Genetic Algorithm) ซึ่งเป็นการบูรณา

การระหว่างฮิวริสติกแบบแทรกไปข้างหน้า (Push Forward Insertion Heuristic) วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) และการค้นหาคำตอบเฉพาะที่จำนวน 3 วิธี (Three Local Searches) ผลการดำเนินการพบว่าอัลกอริทึมที่เสนอนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีโดยได้คำตอบเบี่ยงเบนจากคำตอบที่ดีที่สุดที่รู้ค่าเล็กน้อย มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับ Bike-sharing inventory rebalancing ที่มี ปัญหา แบบ Vehicle routing โดย Shi และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาปัญหานี้ด้วยการใช้ particle swarm optimization ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยทำการกำหนดพาหนะที่ใช้ขนส่งจักรยานจำนวน 5 คัน โดยมีจุดบริการทั้งหมด 25 จุด โดยงานวิจัยนี้พบว่าอัตราการใช้งานของพาหนะที่ใช้ขนส่งมีอัตราการใช้ค่อนข้างสูงและมีข้อเสนอแนะให้ผู้ให้บริการมีการจัดการตารางการปรับสมดุลของสถานีจักรยาน และยังมี Schuijbroek และคณะ [11] ได้ศึกษาการปรับสมดุลจักรยานโดยเสนอวิธีการ cluster-first route-second heuristic ในปัญหาแบบ polynomial-size Clustering โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ของระดับการบริการและต้นทุนของเส้นทางที่เหมาะสม โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลสถานีจักรยานจาก บอสตัน และวอชิงตัน ดีซี ประเทศสหรัฐอเมริกา มาเป็นข้อมูลในการทดสอบวิธีการของพวกเขา ผลที่ได้ของงานวิจัยนี้พบว่า วิธีการที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแก้ปัญหาแบบ pure mixed-integer programming และ constraint programming นั้นมีผลลัพธ์ที่ดีกว่า

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีวิจัย

จักรยานเช่าสาธารณะถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการเดินทางท่องเที่ยวในระยะทางสั้น ผู้ใช้บริการสามารถเช่าจักรยานจากสถานีต้นทางเพื่อเดินทางท่องเที่ยว หรือ ไปยังจุดหมายที่ต้องการ และจอดจักรยานคืนยังสถานีปลายทางโดยไม่จำเป็นต้องนำกลับมาคืนยังสถานีต้นทางด้วยเหตุนี้ก่อนที่ระบบจักรยานเช่าจะเริ่มให้บริการในวันนั้นๆ ผู้ใช้บริการอาจจะพบจำนวนของจักรยานที่ให้บริการในแต่ละสถานีที่แตกต่างกันออกไปเช่น บางสถานีมีจักรยานไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ

เนื่องจากก่อนหน้านี้มีผู้มาเช่าจักรยานในสถานดังกล่าวเป็นจำนวนมาก และบางสถานีมีช่องจอดจักรยานเช่าสาธารณะไม่เพียงพอต่อจำนวนของจักรยานที่นำมาคืนเนื่องจากเป็นสถานที่ที่ผู้ใช้บริการนำจักรยานมาคืนเป็นจำนวนมาก โดยที่ปัจจุบันแต่ละสถานีจะมีช่องจอดจักรยานเช่าสาธารณะจำนวน 6 ช่องจอด แต่ละช่องจะสามารถจอดจักรยานได้เพียง 1 คัน เพื่อให้งานวิจัยนี้เห็นภาพการดำเนินงานวิจัยที่ชัดเจน งานวิจัยนี้จึงแบ่งการดำเนินการวิจัยให้เป็นส่วนย่อยๆ ดังนี้ ส่วนที่ 1 ลักษณะของการใช้บริการของผู้มาเช่าจักรยาน เพื่อให้ทราบถึงอัตราการเข้ามาใช้บริการ ลักษณะการใช้บริการตั้งแต่การเริ่มต้นยืมจักรยาน ไปจนถึงสิ้นสุดการใช้บริการโดยการนำจักรยานมาคืนที่ที่จอด ส่วนที่ 2 การขนส่งจักรยานหลังจากระบบให้ใช้บริการปิดลง เพื่อนำจักรยานไปเติมให้กับสถานีที่มีจำนวนจักรยานน้อยกว่าปริมาณจักรยานที่กำหนด และนำจักรยานออกจากสถานีที่มีจำนวนจักรยานมากเกินไปออกจากสถานี ส่วนที่ 3 การกำหนดตัวแปร และการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหการจัดเส้นทางรถขนส่งสำหรับปัญหาการรับและส่งมอบในบริการจักรยานเช่าสาธารณะ และในส่วนที่ 4 การกำหนดขนาดของรถที่จะนำจักรยานไปส่งเพื่อเติมจำนวนจักรยานในสถานีที่มีจักรยานน้อยและรับจักรยานในสถานีที่มีจำนวนมากเกินไปกำหนดออกจากสถานี

2.1 ลักษณะการใช้บริการ

การเข้ามาใช้บริการของลูกค้าในปัจจุบันมีลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละวัน โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดลักษณะปัญหาตามสมมติฐานดังต่อไปนี้ โดยอ้างอิงจากการใช้บริการจริงของระบบจักรยานเช่าของเทศบาลนครเชียงใหม่

1.) ผู้ใช้บริการสามารถเช่าและคืนจักรยานที่สถานีใดก็ได้ โดยไม่จำเป็นต้องยืมหรือคืนจักรยานในสถานีเดียวกัน โดยแต่ละสถานีจะมีช่องสำหรับจอดจักรยาน 6 ช่อง

2.) ผู้ใช้บริการหนึ่งท่านสามารถเช่าจักรยานได้เพียงครั้งละ 1 คัน ต่อหนึ่งรอบการท่องเที่ยว

3.) กำหนดให้หลังระบบปิด จักรยานทุกคันต้องถูกคืนเข้าสู่ระบบ กำหนดให้ระบบเปิดให้บริการตั้งแต่ 8.00 น. ถึง 24.00 น. ก่อนที่ระบบจะเปิดให้บริการ แต่ละสถานีจะต้องมีรถจอดให้บริการในแต่ละสถานีจำนวน 4 คัน เพื่อให้มี

จักรยานเพียงพอต่อความต้องการในการใช้บริการ และมีช่องจอดที่ว่างอยู่จำนวน 2 ช่อง เพื่อรองรับจักรยานที่ผู้เช่าจากสถานีอื่นจะนำเข้ามาจอด

4.) กำหนดพฤติกรรมการใช้จักรยานเช่าสาธารณะด้วยการคุมอัตราการเข้ามาของผู้ใช้บริการ โดยแบ่งลักษณะของผู้เข้ามาใช้บริการในแต่ละสถานีออกเป็น 3 ประเภท

- ก) อัตราการยืม มากกว่าอัตราการนำจักรยานมาคืน
- ข) อัตราการยืม เท่ากับอัตราการนำจักรยานมาคืน
- ค) อัตราการยืม น้อยกว่าอัตราการนำจักรยานมาคืน

ลักษณะการใช้บริการแบบ (ก) จะส่งผลให้สถานีดังกล่าวมีจำนวนจักรยานที่จอดให้บริการในสถานีน้อยลง แต่ในทางกลับกันจะทำให้ช่องจอดจักรยานมีจำนวนว่างเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อการใช้บริการถ้าหากอัตราการยืมมากกว่าอัตราการคืนในปริมาณที่สูง อาจจะส่งผลให้จักรยานในสถานียังคงกล่าวหมด และไม่มีจักรยานให้ผู้ใช้บริการยืมได้อีกต่อไป โดยก่อนระบบให้เช่าจักรยานจะเปิดให้บริการจะต้องมีการเติมจักรยานให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ ลักษณะการใช้บริการแบบ (ข) ลักษณะการใช้บริการเช่นนี้จะส่งผลให้จำนวนจักรยานสำหรับให้บริการและจำนวนช่องว่างสำหรับการคืนจักรยานคงที่ ดังนั้นก่อนระบบจะเปิดให้บริการจะต้องมีการเพิ่มจักรยานเมื่อจำนวนจักรยานมีจำนวนต่ำกว่าปริมาณของจักรยานที่กำหนดไว้ และหาจำนวนจักรยานมีจำนวนมากกว่าจำนวนที่กำหนดไว้จะต้องมีการนำจักรยานออกจากช่องจอดเมื่อจำนวนจักรยานมีจำนวนมากกว่าจำนวนที่กำหนดไว้ ในส่วนของลักษณะสุดท้ายคือแบบ (ค) การเข้าใช้บริการแบบนี้จะทำให้จำนวนจักรยานที่นำมาคืนมาก ซึ่งอาจจะส่งผลให้จำนวนช่องจอดจักรยานเต็มและผู้เช่าจักรยานไม่สามารถคืนจักรยานเข้าสู่ช่องจอดได้ ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดเหตุการณ์ที่ (ก) จักรยานที่สถานีหมดทำให้ผู้มาใช้บริการไม่สามารถยืมจักรยานได้ จึงกำหนดให้ผู้ให้บริการที่มาใช้บริการที่สถานีที่จักรยานหมดจะต้องออกจากระบบ ในทางกลับกัน ในกรณีสถานีประเภท (ค) ผู้ให้บริการที่มีจักรยานแล้วจะนำจักรยานมาคืนที่สถานีที่มีช่องจอดเต็มจะกำหนดให้ผู้ให้บริการต้องคืนจักรยานที่สถานีที่ใกล้ที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้จำนวนจักรยานในระบบขาดหายไป

2.2 การขนส่งจักรยานและสถานีให้เช่า

หลังจากระบบเช่าจักรยานปิดตัวลง เจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบจะต้องทำการตรวจสอบระดับจำนวนของจักรยานในแต่ละสถานีและต้องดำเนินการเติมจักรยานในสถานี (ก) หรือ (ข) ในกรณีที่จักรยานมีจำนวนต่ำกว่าปริมาณจักรยานที่กำหนด และจะต้องนำจักรยานออกจากสถานี (ข) หรือ (ค) เมื่อจำนวนจักรยานมีจำนวนมากกว่าปริมาณจักรยานที่กำหนดโดยการใช้ยานพาหนะบรรทุกจักรยานเพื่อเติมหรือเก็บจักรยานโดยยานพาหนะดังกล่าวจะดำเนินการภายใต้สมมติฐานต่อไปนี้

1.) ยานพาหนะต้องเดินทางออกจากศูนย์กระจายจักรยานไปยังสถานีเป้าหมาย และเมื่อเติม หรือ เก็บจักรยานเช่าสาธารณะในแต่ละสถานีเสร็จสิ้นแล้ว ต้องกลับมายังศูนย์กระจายจักรยานเสมอ

2.) ยานพาหนะสามารถเดินทางไปเติม หรือ เก็บจักรยานเช่าสาธารณะได้เพียงสถานีละหนึ่งครั้ง ในระหว่างช่วงเวลาระบบปิด และจะต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จก่อนระบบจะเปิดให้บริการอีกครั้ง

3.) เมื่อยานพาหนะบรรทุกจักรยานเช่าสาธารณะจนเต็มจะต้องเดินทางไปยังสถานีที่ต้องการเติมจักรยานเช่าสาธารณะ หรือ ต้องเดินทางไปยังศูนย์กระจายจักรยานเพื่อนำจักรยานลงจากยานพาหนะเท่านั้น จึงจะสามารถปฏิบัติงานต่อไปได้

4.) แต่ละสถานีจะมียานพาหนะเดินทางมาเติมหรือเก็บจักรยานเช่าสาธารณะเพียงหนึ่งครั้ง

5.) ยานพาหนะต้องเดินทางไปทุกสถานีจักรยานเช่าสาธารณะถึงแม้จะไม่มีเติม หรือ เก็บจักรยานก็ตาม เพื่อตรวจสอบความพร้อมของแต่ละสถานีจักรยานเช่าสาธารณะ

6.) ก่อนระบบเปิดให้บริการทุกสถานีจักรยานเช่าสาธารณะต้องมีจักรยานอยู่ในระบบ 4 คัน เมื่อทุกสถานีได้รับการเติม/เก็บจักรยาน หรือตรวจสอบความพร้อมเรียบร้อยทุกสถานีแล้ว ยานพาหนะจะต้องกลับมายังศูนย์กระจายจักรยานและถือว่าเสร็จงาน

การให้บริการของจักรยานเช่าสาธารณะของเทศบาลนครเชียงใหม่เปิดให้บริการทั้งหมด 13 สถานี โดยมีสถานีพิพิธภัณฑสถานล้านนาเป็นศูนย์ประสานงานและศูนย์

กระจายจักรยานเพื่อเติมและเก็บจักรยานในแต่ละสถานี ดังแสดงในรูปที่ 1.



รูปที่ 1 สถานีจักรยานเช่าสาธารณะเทศบาลนครเชียงใหม่

2.3 การกำหนดตัวแบบทางคณิตศาสตร์ และการจำลองสถานการณ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยฉบับนี้ กำหนดให้ N คือ จำนวนสถานีจักรยานเช่าสาธารณะทั้งหมด n คือ สถานีจักรยานเช่าสาธารณะใด ๆ โดยที่ $n = \{0, \dots, N\}$ และ D คือ เซตของเส้นเชื่อมระหว่างสถานี i ไปยังสถานี j หรือ เรียกว่า อาร์ค กำหนดให้ M คือ จำนวนยานพาหนะทั้งหมด m คือ ยานพาหนะใด ๆ d_{ij} คือ ระยะทางระหว่างสถานี i ไปยังสถานี j โดยที่ระยะทางจากสถานี i ไปยังสถานี j ไม่เท่ากับ ระยะทางจากสถานี j ไปยังสถานี i หรือ $d_{ij} \neq d_{ji}$ ในบางจุดซึ่งเป็นแบบไม่สมมาตร ด้วยยานพาหนะชนิดเดียวกันที่มีความจุจักรยานเท่ากัน โดยมี V คือ เซตของยานพาหนะที่มี Q_k คือ ความจุจักรยานสูงสุดของยานพาหนะ k โดยที่ $k \in V$ หรือ $k = \{1, \dots, M\}$ จะทำการขนส่งจักรยานไปยังสถานีต่าง ๆ เพื่อให้มีระยะทางรวมในการขนส่งที่สั้นที่สุด โดยที่จำนวนความต้องการจักรยานแต่ละสถานีที่ไม่แน่นอน

ปัญหาที่งานวิจัยนี้สนใจศึกษาสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

2.3.1 การกำหนดดัชนี

M คือ จำนวนยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งทั้งหมด

N คือ จำนวนสถานีจักรยานเช่าสาธารณะทั้งหมด

i คือ สถานีจักรยานเช่าสาธารณะ $i, i = 1, \dots, N$

j คือ สถานีจักรยานเช่าสาธารณะ $j, j = 1, \dots, N$

p คือ สถานีจักรยานเช่าสาธารณะ $p, p = 1, \dots, N$

k คือ ยานพาหนะคันที่ $k, k = 1, \dots, M$

2.3.2 การกำหนดพารามิเตอร์

d_{ij} คือ ระยะทางจากสถานีจักรยานเช่าสาธารณะ i ไปยังสถานี j (ดู ตารางที่ 1)

s_i คือ จำนวนความต้องการจักรยานของสถานี i ณ เวลาระบบปิด

Q_k คือ ความจุจักรยานสูงสุดของยานพาหนะ k

2.3.3 การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ

X_{ij}^k เท่ากับ 1 เมื่อยานพาหนะ k มีการเดินทางจาก i ไป j และเท่ากับ 0 ในกรณีอื่น ๆ

Y_{ij}^k เท่ากับ 1 เมื่อสถานี i ถูกเดินทางผ่านไปยังสถานี j โดยยานพาหนะ k และเท่ากับ 0 ในกรณีอื่น ๆ

U_{ij}^k คือ ค่าตัวแปรตัดสินใจเพื่อกำจัดเส้นทางเดินวนรอบไม่ครบ โดยที่ จำนวนจักรยานบนพาหนะ k จากสถานี i ต้องมีเพียงพอต่อความต้องการจักรยาน ที่จะไปส่งยังสถานี j และยานพาหนะ k จากสถานี i จะไม่เดินทางไปสถานี j เมื่อความต้องการจักรยานได้รับการปรับปรุงจนเพียงพอแล้ว

2.3.4 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สมการที่ (1) เป็นสมการระยะทางที่สั้นที่สุดของการขนส่งจักรยานเช่าจากสถานี i ไปยังสถานี j โดยยานพาหนะ k สมการที่ (2) เป็นสมการรับประกันว่ายานพาหนะ k จะเดินทางออกศูนย์กระจายจักรยานไปยังสถานี j อย่างน้อย 1 สถานี สมการที่ (3) เป็นสมการที่รับประกันว่ายานพาหนะ k จะเดินทางเข้าและออกสถานีจักรยานเช่าสาธารณะเท่ากัน 1 ครั้ง สมการที่ (4) เป็นสมการรับประกันว่าสถานีจักรยานเช่าสาธารณะหนึ่ง ๆ จะได้รับการเดินทางผ่านจากยานพาหนะอย่างน้อย 1 คัน สมการที่ (5) เป็นสมการรับประกันว่ายานพาหนะ k จะนำจักรยานไปส่งยังสถานีไม่เกินจำนวนที่สามารถบรรทุกได้ สมการที่ (6) เป็นสมการรับประกันว่าจะเดินทางเข้าสถานี i ได้ ก็ต่อเมื่อยานพาหนะ k เดินทางผ่านสถานี i จากเส้นทางของสถานี j สถานีใดสถานีหนึ่งเท่านั้น สมการที่ (7) เป็นสมการที่รับประกันว่าสถานี j จะได้รับการเดินทางผ่านโดยยานพาหนะ k อย่างน้อย 1 ครั้ง โดยใช้เส้นทางที่ผ่านมาจากสถานี i และสมการที่ (8)–(10) เป็นสมการเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดทัวร์ย่อย

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^M \sum_{j=0}^N \sum_{i=0}^N d_{ij} X_{ij}^k & \quad (1) & \sum_{k=1}^M \sum_{i=0}^N X_{ji}^k \geq 1 \forall j \in \{1, \dots, N\} & \quad (7) \\
\sum_{j=0}^N X_{0j}^k \geq 1 \forall k \in \{1, \dots, M\} & \quad (2) & U_i^k \geq U_j^k + s_i - Q_k + (Q_k(X_{ij}^k + X_{ji}^k)) + & \quad (8) \\
& & (X_{ij}^k(s_i + s_j)) \forall k \in \{1, \dots, M\}, \forall j \in & \\
\sum_{i=0}^N X_{ip}^k - \sum_{j=0}^N X_{pj}^k \forall p \in & \quad (3) & \{1, \dots, N\}, \forall i \in \{1, \dots, N\}, i \neq j & \\
\{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, M\} & & U_i^k \leq Q_k - X_{ij}^k(Q_k - s_i) \forall i \in & \quad (9) \\
\sum_{k=1}^M Y_i^k \forall i \in \{1, \dots, N\} & \quad (4) & \{1, \dots, N\}, \forall k \in \{1, \dots, M\} & \\
\sum_{i=0}^N s_i Y_i^k \leq Q_k \forall k \in \{1, \dots, M\} & \quad (5) & U_i^k \geq s_i + \sum_{i=1}^N s_j X_{ji}^k \forall i \in \{1, \dots, N\}, \forall k \in & \quad (10) \\
Y_i^k \leq \sum_{j=0}^N X_{ji}^k \forall i \in \{1, \dots, N\} & \quad (6) & \{1, \dots, M\} &
\end{aligned}$$

ตารางที่ 1 เมตริกระยะทางของสถานีจักรยานเช่าสาธารณะ (กิโลเมตร)

	ไป												
จาก	พิพิธภัณฑ์พื้นถิ่นฯ	Think Park	ตลาดดอกไม้	ตลาดประตู ชม.	ประตูเกษตร มข.	ประตูท่าแพ	วัดพระสิงห์	คริสตจักร ที่ 1	สวนบวหาด	หน้า มข.	รพ.สวนดอก	ร.ร.ศรีธนาพาณิชย์	หอประชุม มข.
พิพิธภัณฑ์พื้นถิ่นฯ	0	3.06	2.37	1.22	3.08	1.17	0.81	2.81	2.19	4.48	2.20	2.43	3.62
Think Park	2.90	0	4.38	4.12	2.17	3.89	3.01	4.67	3.76	1.42	2.10	0.66	1.13
ตลาดดอกไม้	2.12	5	0	2.81	5.79	1.1	2.8	0.44	4.18	6.42	4.19	4.37	5.61
ตลาดประตู ชม.	1.06	4.19	3.01	0	4.04	1.7	1.48	2.89	1.99	5.61	2.44	3.56	3.86
ประตูเกษตร มข.	3.43	1.77	5.77	4.21	0	4.57	3	6.07	3.53	2.28	1.6	2.21	0.66
ประตูท่าแพ	1.28	4.28	1.93	1.75	4.69	0	1.7	2.2	3.08	5.7	3.09	3.65	4.51
วัดพระสิงห์	0.72	2.66	3.07	1.21	2.99	1.85	0	3.51	1.38	4.09	1.39	2.03	2.81
คริสตจักร ที่ 1	2.41	5.62	0.79	3.11	6.09	1.4	3.09	0	4.48	7.04	4.48	4.99	5.9
สวนบวหาด	1.59	3.45	3.82	0.81	3.3	2.51	0.87	3.7	0	4.87	1.7	2.82	3.12
หน้า มข.	4.29	1.86	5.77	5.51	2.34	5.29	4.4	6.07	5.16	0	3.49	2.05	2.35
รพ.สวนดอก	1.82	2.07	4.17	2.61	1.6	2.97	1.4	4.46	1.93	3.49	0	1.72	1.42
ร.ร.ศรีธนาพาณิชย์	2.24	0.63	3.72	3.46	2.23	3.23	2.35	4.02	3.1	2.05	1.83	0	1.54
หอประชุม มข.	3.23	1.1	5.26	4.02	0.68	4.38	2.8	5.56	3.33	2.35	1.41	1.54	0

เมื่อทราบเส้นทางจักรยานส่งจักรยานเช่าสาธารณะจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์การตัดสินใจ โดยทำการคำนวณต้นทุนในการขนส่ง ซึ่งต้นทุน หรือ ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการขนส่งในงานวิจัยนี้หมายถึง ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งจักรยานเช่าสาธารณะ โดยพิจารณาวิธีการขนส่งที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดและเหมาะสมที่สุด

งานวิจัยนี้จะแบ่งลักษณะการจัดเส้นทางจักรยานส่งเป็น 3 วิธี ได้แก่

วิธีที่ 1 การจัดเส้นทางจักรยานส่งโดยใช้เส้นทางเดิมที่พนักงานคุ้นชิน ความจุของพาหนะที่ใช้ขนส่งจักรยาน 10 คัน

วิธีที่ 2 การจัดเส้นทางจักรยานส่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ความจุของพาหนะที่ใช้ขนส่งจักรยาน 10 คัน

วิธีที่ 3 การจัดเส้นทางรถขนส่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ความจุของพาหนะที่ใช้ขนส่งจักรยาน 5 คัน

2.3.5 การจำลองสถานการณ์

เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริง และข้อมูลที่ได้จากการสุ่มตัวเลขทำให้ผลลัพธ์ของสมการการจัดเส้นทางรถขนส่งแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงทำการสร้างข้อมูลแบบสุ่มตัวเลขที่นอกเหนือจากข้อมูลจริง เพื่อชี้วัดประสิทธิภาพของวิธีการ [12] ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการจำลองเพื่อหาเส้นทางรถขนส่งที่ทำให้ระยะทางในการขนส่งโดยรวมสั้นที่สุดของในแต่ละกรณี โดยการจำลองสถานการณ์การเข้ามาของผู้ใช้บริการที่มีอัตราการใช้บริการในรูปแบบการสุ่มอัตราการใช้บริการครั้งแรกจากฟังก์ชันการสุ่มตัวเลข ในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล กำหนดช่วงของอัตราการใช้บริการตั้งแต่ 1 ถึง 5 หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันการสร้างข้อมูลจากการสุ่มตัวเลขในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล กำหนดให้อัตราการใช้บริการมาจากการสุ่มตัวเลขครั้งแรกเพื่อจำลองสถานการณ์จำนวนจักรยานที่ผู้ใช้บริการเช่าและคืนในแต่ละสถานี สุดท้ายทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาระยะทางการขนส่งจักรยานเช่าสาธารณะที่สั้นที่สุด

จากสมการที่ (11) เป็นสมการเพื่อหาจำนวนจักรยานคงเหลือในสถานี i ณ เวลาในระบบปิดทำการ โดยระบบจะเปิดทำการตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 24.00 น. ซึ่งในแต่ละวันจะมีจำนวนจักรยานคงเหลือในแต่ละสถานีที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยกำหนดให้จำนวนจักรยานที่คงเหลือในสถานีอยู่ระหว่าง 0 คัน ถึง 6 คัน ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์จริงในปัจจุบันและป้องกันจำนวนจักรยานขาด หรือ เกินในระบบ และสมการที่ (12) เป็นสมการเพื่อหาจำนวนความต้องการจักรยานของสถานี i ณ เวลาในระบบปิดทำการ ซึ่งปริมาณความต้องการจักรยานหมายถึง จำนวนจักรยานเช่าสาธารณะที่เจ้าหน้าที่จะต้องนำไปเติม หรือ เก็บ ณ สถานี i ในช่วงเวลาในระบบปิดทำการ

q_i คือ ความจุสูงสุดของจักรยานเช่าสาธารณะในสถานี $i, i = 1, \dots, N$

z_i คือ จำนวนจักรยานที่ต้องมีในสถานี i ณ เวลาก่อนระบบเปิดทำการ, $i = 1, \dots, N$

I_i คือ จำนวนจักรยานที่ถูกคืนในสถานี i ในระหว่างระบบเปิดทำการ, $i = 1, \dots, N$,

O_i คือ จำนวนจักรยานที่ถูกเช่าในสถานี i ในระหว่างระบบเปิดทำการ, $i = 1, \dots, N$,

y_i คือ จำนวนจักรยานที่คงเหลือในสถานี i ณ เวลาในระบบปิดทำการ, $i = 1, \dots, N$

สามารถหาค่า y_i ได้จาก

$$y_i = z_i + I_i - O_i \quad (11)$$

โดยที่ $0 \leq y_i \leq 6$ ถ้า $y_i \geq 6, y_i = 6$
 $y_i \leq 0, y_i = 0$

s_i คือ จำนวนความต้องการจักรยานของสถานี i ณ เวลาในระบบปิดทำการ, $i = 1, \dots, N$ สามารถหาค่า s_i ได้จาก

$$s_i = y_i - z_i \quad (12)$$

โดยที่ $s_i \begin{cases} s_i > 0, \text{ ต้องเดินทางไปเก็บจักรยานจากสถานี } i \\ s_i = 0, \text{ ไม่ต้องเก็บหรือเติมจักรยานในสถานี } i \\ s_i < 0, \text{ ต้องเดินทางไปเติมจักรยานในสถานี } i \end{cases}$

3. ผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการจำลองสถานการณ์การเข้ามาของผู้ใช้บริการที่มีอัตราการใช้บริการในรูปแบบการแจกแจงแบบปัวส์ซอง ด้วยการสุ่มอัตราการใช้บริการครั้งแรกจากฟังก์ชันการสุ่มตัวเลขในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล โดยกำหนดช่วงของอัตราการใช้บริการตั้งแต่ 1 ถึง 5 หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันการสร้างข้อมูลจากการสุ่ม

ตัวเลขในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกซ์เซล กำหนดให้อัตราการใช้บริการมาจากการสุ่มตัวเลขครั้งแรก โดยจะทำการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 30 ครั้ง (ข้อมูลของการจำลองสถานการณ์ ทั้ง 30 ครั้งแสดงในภาคผนวก 1) โดยฟังก์ชันที่ใช้ในการสร้างข้อมูลแสดงในตารางที่ 2 ในการทดลองนี้สถานีพิพิธภัณฑสถานพื้นถิ่นล้านนาจะไม่มีรถเก็บหรือเติมจักรยานเนื่องจากเป็นสถานีเริ่มต้นที่ให้บริการ

ดังนั้นความต้องการของสถานีนี้จะมีค่าเท่ากับ 0 เสมอ และเมื่อนำตัวเลขสุ่มที่ได้จากตารางที่ 2 มาแทนค่าในสมการที่ 11 และ 12 จะได้รูปแบบการเก็บและเติมจักรยานตามตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงฟังก์ชันที่ใช้ในการสร้างข้อมูล

ลำดับ	การสร้างข้อมูล	ฟังก์ชัน
1	การสุ่มอัตราการเข้า	RANDBETWEEN
	มาใช้บริการ	(BOTTOM, TOP)
2	จำนวนจักรยาน	RANDOM NUMBER
	คงเหลือในสถานี	GENERATION

ตารางที่ 3 ตัวอย่างข้อมูลจากฟังก์ชันการสุ่มตัวเลขจากการทดลองที่ 29

สถานีที่	q_i	z_i	I_i	O_i	y_i	s_i
1	6	6	3	1	6	0
2	6	4	3	2	5	1
3	6	4	1	2	3	-1
4	6	4	1	3	2	-2
5	6	4	4	2	6	2
6	6	4	4	2	6	2
7	6	4	2	3	3	-1
8	6	4	0	4	0	-4
9	6	4	2	2	4	0
10	6	4	6	3	6	2
11	6	4	1	3	2	-2
12	6	4	5	4	5	1
13	6	4	5	1	6	2

เนื่องจากการขนส่งจักรยานเข้าสาธารณะเป็นการจัดสมดุลแบบคงตัว จึงทำการขนส่งเพียงครั้งเดียวต่อหนึ่งวัน ในช่วงเวลาปิดทำการ โดยโปรแกรมจะรับข้อมูลระยะทางจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทาง ปริมาณความต้องการจักรยานในแต่ละสถานีพร้อมกับจำนวนความจุจักรยานสูงสุดของยานพาหนะ หลังจากนั้น โปรแกรมจะพิจารณาตามเงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดย

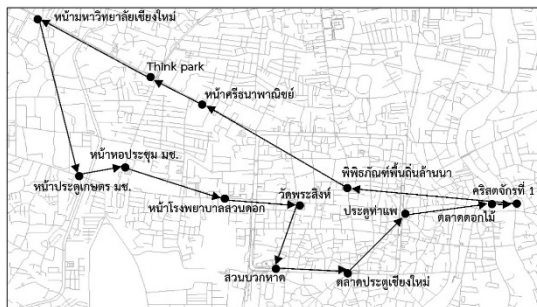
ประมวลผลตามหลักการเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด กล่าวคือยานพาหนะจะเริ่มต้นออกจากศูนย์กระจายจักรยานเดินทางไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดจนกระทั่งเต็ม หรือ เก็บจักรยานเสร็จ จากนั้นจะเดินทางไปยังสถานีต่อไปที่มีระยะทางที่ใกล้ที่สุด ที่มีจำนวนความต้องการจักรยานในสถานีต่อไปมีน้อยกว่า หรือ เท่ากับปริมาณจักรยานที่บรรทุกบนยานพาหนะ [9]

เมื่อนำเส้นทางการขนส่งจักรยานเข้าสาธารณะที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาแสดงการเชื่อมโยงระหว่างตำแหน่งการขนส่งจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทาง โดยจะแสดงให้เห็นในภาพของการเชื่อมโยงแบบระยะขจัดเพื่อความสะดวกในการแสดงผล แต่การเดินทางของยานพาหนะ ที่แท้จริงจะคลาดเคลื่อนไปตามถนน และเนื่องจากสถานการณ์ของแต่ละวันมีความแตกต่างกัน ทำให้ระยะทางและเส้นทางการขนส่งเปลี่ยนแปลงไป โดยผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างการจัดเส้นทางขนส่งจากการจำลองสถานการณ์ โดยแยกเป็น 2 กรณี ได้แก่ การจัดเส้นทางขนส่งจักรยานเข้าสาธารณะที่มีความจุจักรยานสูงสุดของยานพาหนะเท่ากับ 10 คัน และการจัดเส้นทางขนส่งจักรยานเข้าสาธารณะที่มีความจุจักรยานสูงสุดของยานพาหนะ 5 คัน ซึ่งมีเส้นทางการขนส่งแสดงดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

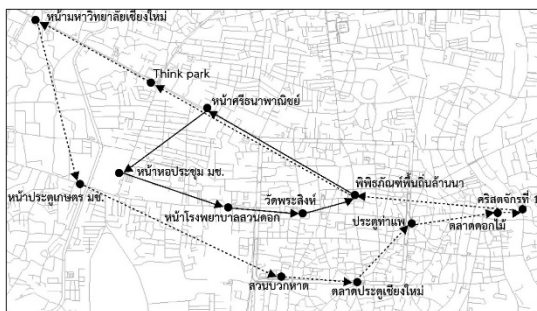
จากรูปที่ 2 แสดงเส้นทางการขนส่งจักรยาน ที่มีความจุจักรยานสูงสุดของยานพาหนะ 10 คัน มีเส้นทางการขนส่งเพียงเส้นทางเดียว โดยเริ่มเดินทางออกจากสถานีพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ ไปยังสถานีหน้าโรงเรียนศรีธนาพาณิชย์, สถานี Think park, สถานีหน้ามหาวิทยาลัยเชียงใหม่, สถานีประตูเกษตรมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, สถานีหอประชุมมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, สถานีโรงพยาบาลสวนดอก, สถานีวัดพระสิงห์, สถานีสวนบวกหาด, สถานีตลาดประตูเชียงใหม่, สถานีประตูท่าแพ, สถานีตลาดดอกไม้ว, สถานีคริสตจักรที่ 1 ตามลำดับ จากนั้นกลับมายังสถานีพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ มีระยะทางการขนส่งจักรยานเข้าสาธารณะรวมเท่ากับ 18.96 กิโลเมตร

จากรูปที่ 3 แสดงเส้นทางการขนส่งจักรยาน ที่มีความจุจักรยานสูงสุดของยานพาหนะ 5 คัน จะสังเกตได้ว่าเกิด

เส้นทางการขนส่งอยู่ 2 รอบ โดยรอบแรกเดินทางออกจากสถานีพิพิธภัณฑสถานพื้นถิ่นล้านนาไปยังสถานีหน้าโรงเรียนศรีษนาพานิชย์, สถานีหน้าหอประชุมมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, สถานีโรงพยาบาลสวนดอก, สถานีวัดพระสิงห์ ตามลำดับ และกลับมายังสถานีพิพิธภัณฑสถานพื้นถิ่นล้านนา และรอบที่สองเริ่มเดินทางออกจากสถานีพิพิธภัณฑสถานพื้นถิ่นล้านนาไปยังสถานี Think park, สถานีหน้ามหาวิทยาลัยเชียงใหม่, สถานีประตูเกษตรมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, สถานีสวนบวกหาด, สถานีตลาดประตูเชียงใหม่, สถานีประตูท่าแพ, สถานีตลาดดอกไม้วัด, สถานีคริสตจักรที่ 1 ตามลำดับ และกลับมายังสถานีพิพิธภัณฑสถานพื้นถิ่นล้านนา มีระยะทางการขนส่งจักรยานเช่าสาธารณะรวมเท่ากับ 25.15 กิโลเมตร



รูปที่ 2 เส้นทางการขนส่งจักรยาน ที่มีความจุของยานพาหนะเท่ากับ 10 คัน

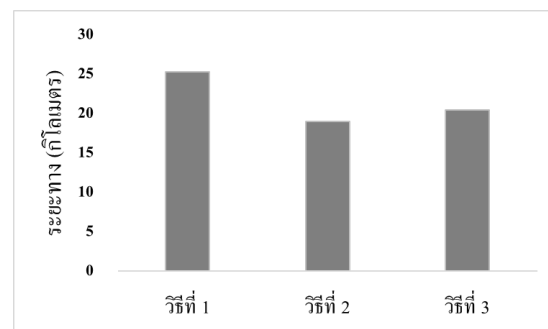


รูปที่ 3 เส้นทางการขนส่งจักรยาน ที่มีความจุของยานพาหนะเท่ากับ 5 คัน

ซึ่งทั้งสองกรณีมีจำนวนความต้องการจักรยานเท่ากัน แต่เนื่องจากยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งมีความสามารถในการจุจักรยานไม่เท่ากันจึงส่งผลให้เส้นทางการขนส่งแตกต่างกัน ซึ่งในกรณีที่ยานพาหนะมีความจุจักรยานสูงสุด 5 คัน เมื่อทำการวิเคราะห์หาเส้นทางจากสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่าเกิดเส้นทางการขนส่งสองรอบ ณ ที่นี้

ผู้วิจัยจึงต้องนำไปวิเคราะห์ว่าจะใช้ยานพาหนะ 2 คันเพื่อขนส่งจักรยาน หรือ ใช้ยานพาหนะเพียง 1 คัน แต่เดินทางวน 2 รอบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับต้นทุนในการขนส่ง และถึงแม้ระยะทางการขนส่งโดยรวมของยานพาหนะที่มีความจุจักรยานสูงสุด 10 คัน จะน้อยกว่าระยะทางการขนส่งโดยรวมของยานพาหนะที่มีความจุจักรยานสูงสุด 5 คัน แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าจะเลือกใช้ยานพาหนะชนิดใด เนื่องจากต้องทำการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อตัดสินใจว่าจะเลือกวิธีการขนส่งแบบใด และใช้ยานพาหนะชนิดใดในขั้นต่อไป

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งทั้งหมด 30 กรณี จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีการจัดเส้นทางการขนส่งแบบเดิม ซึ่งผลการศึกษาได้นำเสนอตามแผนภูมิดังต่อไปนี้ โดยแผนภูมิจะมีการจัดเส้นทางการขนส่งทั้ง 3 วิธี จากรูปที่ 4 แสดงระยะทางการขนส่งเฉลี่ยของแต่ละวิธี เมื่อเทียบกับวิธีการที่ 1 พบว่าระยะทางเฉลี่ยของวิธีการที่ 2 ลดลง 6.33 กิโลเมตร และวิธีการที่ 3 ลดลง 4.83 กิโลเมตร



รูปที่ 4 ระยะทางการขนส่งเฉลี่ยของแต่ละวิธี

ผู้วิจัยได้ทำระยะทางในการขนส่งทั้งหมด 30 กรณี (ผลการทดลองแสดงในภาคผนวกที่ 2) มาทำการเฉลี่ยและนำไปเปรียบเทียบระยะทางในการขนส่ง ซึ่งเมื่อเทียบระยะทางการขนส่งของแต่ละวิธีกับวิธีการที่ 1 พบว่าระยะทางเฉลี่ยของวิธีการที่ 2 ลดลง 6.33 กิโลเมตร และวิธีการที่ 3 ลดลง 4.83 กิโลเมตร โดยเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อรอบการขนส่งของแต่ละวิธีกับวิธีการที่ 1 พบว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของวิธีการที่ 2 ลดลง 0.53 ลิตร และวิธีการ

ที่ 3 ลดลง 1.18 ลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบเฉพาะปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะใช้น้ำมันของรถบรรทุกเท่าใดก็จะสามารถลดค่าขนส่งได้ และทางผู้ให้บริการสามารถนำผลการทดลองด้วยวิธีที่ 3 ไปคิดต้นทุนในการซื้อพาหนะคันใหม่ที่เล็กลงและมีอัตราการใช้น้ำมันที่น้อยกว่า

4. อภิปรายและสรุปผล

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การรับและส่งมอบจักรยานสาธารณะด้วยข้อจำกัดของการกำหนดขนาดของการขนส่ง และจำลองสถานการณ์การรับส่งเพื่อเติมจักรยานในสถานีที่จักรยานมีจำนวนน้อยกว่าข้อกำหนด และการนำจักรยานออกเมื่อจักรยานในสถานีมีมากกว่าข้อกำหนด โดยเริ่มจากการกำหนดจำนวนของสถานีบริการให้เข้าจักรยาน และเมื่อระบบปิดจะถือว่าระบบให้บริการจักรยานได้สิ้นสุดในวันนั้นๆ ทางผู้ให้บริการจะต้องทำการนำจักรยานไปเติมในสถานีที่มีจำนวนจักรยานต่ำกว่าปริมาณที่กำหนดและนำจักรยานออกจากสถานีที่มีจำนวนมากกว่าที่กำหนด โดยงานวิจัยนี้ได้จำลองพฤติกรรมของผู้มาใช้บริการด้วยการสุ่มตัวเลขจำนวนผู้มาเช่าและผู้มาคืนจักรยานในแต่ละสถานี เมื่อทราบว่าสถานีใดต้องได้รับการเติมหรือยกออก พาหนะบรรทุกจักรยานจะต้องออกไปปรับสมดุลจำนวนจักรยานให้อยู่ในจำนวนที่กำหนด โดยข้อจำกัดของโมเดลนี้คือขนาดบรรทุกสูงสุดของจำนวนจักรยาน เมื่อจำนวนบรรทุกมีขนาดเล็กลงอาจจะทำให้เกิดการวนรอบลดในจำนวนที่เพิ่มขึ้น

จากการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า หากเจ้าหน้าที่ทำการขนส่งตามเส้นทางที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสามารถลดระยะทางการขนส่งได้ 6.33 กิโลเมตรต่อรอบ และลดปริมาณเชื้อเพลิงได้ 0.53 ลิตรต่อรอบ และหาเปลี่ยนยานพาหนะชนิดใหม่ที่มีความจุจักรยานและอัตราการใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าพาหนะเดิมจะสามารถลดระยะทางการขนส่งได้ 4.83 กิโลเมตรต่อรอบ และลดปริมาณเชื้อเพลิงได้ 1.18 ลิตรต่อรอบ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้พาหนะขนส่งที่เล็กลงสามารถขนส่งจักรยานได้

น้อยลงแต่จะสามารถทำให้อัตราการสิ้นเปลืองของการใช้น้ำมันลดลงด้วยเช่นกัน การตัดสินใจลงทุนจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ ในอนาคต ซึ่งงานวิจัยลักษณะนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการรับส่งแบบอื่นๆ ที่มีข้อจำกัดทางด้านขนาดของรถบรรทุกที่จะใช้ในการขนส่งเพื่อหาขนาดของพาหนะที่ใช้บรรทุกที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงระยะทางและต้นทุนอื่นๆ มาประกอบการตัดสินใจ

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Demaio, "Bike-sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future," *Journal of Public Transportation*, vol. 12, no. 4, pp. 41–56, 2009, doi: 10.5038/2375-0901.12.4.3.
- [2] P. Demaio. "Bike-sharing World Map." <http://bike-sharing.blogspot.com/2021/10/the-meddin-bike-sharing-world-map-mid.html> (accessed Jul. 29, 2020)
- [3] J. C. García-Palomares, J. Gutiérrez and M. Latorre, "Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach," *Applied Geography*, vol. 35, no. 1–2, pp. 235–246, 2012, doi: 10.1016/j.apgeog.2012.07.002.
- [4] P. Midgley, "The role of smart bike-sharing systems in urban mobility," *Journeys*, vol 2, pp. 23–31, 2009.
- [5] H. Sayarshad, S. Tavassoli and F. Zhao, "A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 36, no. 10, pp. 4944–4951, 2012, doi: 10.1016/j.apm.2011.12.032.
- [6] T. Raviv, M. Tzur and I. A. Forma, "Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches," *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 2, pp. 187–229, 2013, doi: 10.1007/s13676-012-0017-6.
- [7] S. C. Ho and W. Szeto, "Solving a static repositioning problem in bike-sharing systems using iterated tabu search," *Transportation Research Part E: Logistics*

- and *Transportation Review*, vol. 69, pp. 180–198, 2014, doi: 10.1016/j.tre.2014.05.017.
- [8] P. Vogel, B. A. N. Saavedra and D. C. Mattfeld, “A Hybrid Metaheuristic to Solve the Resource Allocation Problem in Bike Sharing Systems,” in *9th International Workshop*, Hamburg, Germany, 2014, pp. 16–29, doi: 10.1007/978-3-319-07644-7_2.
- [9] N. Wichapa, T. Sudsuansee and P. Khokhajaikiat, “Solving the Vehicle Routing Problems with Time Windows Using Hybrid Genetic Algorithm with Push Forward Insertion Heuristic and Local Search Procedure” *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 1, pp.4–13, 2019.
- [10] L. Shi, Y. Zhang, W. Rui and X. Yang, “Study on the bike-sharing inventory rebalancing and vehicle routing for bike-sharing system,” *Transportation Research Procedia*, vol. 39, pp. 624–633, 2019, doi: 10.1016/j.trpro.2019.06.064.
- [11] J. Schuijbroek, R. C. Hampshire and W.-J. van Hoes, “Inventory rebalancing and vehicle routing in Bike Sharing Systems,” *European Journal of Operational Research*, vol. 257, no. 3, pp. 992–1004, 2017, doi: 10.1016/j.ejor.2016.08.029.
- [12] M. Dellamico, E. Hadjicostantinou, M. Iori and S. Novellani, “The bike sharing rebalancing problem: Mathematical formulations and benchmark instances,” *Omega*, vol. 45, pp. 7–19, 2014, doi: 10.1016/j.omega.2013.12.001.

ภาคผนวก

ภาคผนวก 1 แสดงความต้องการจักรยานของแต่ละสถานีที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ ก แสดงตัวเลขความต้องการที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

กรณีที่	สถานีที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	-1	2	1	-3	2	-2	-1	1	-1	2	-2	2
2	0	0	-4	-2	2	-1	0	2	0	-2	2	1	2
3	0	2	2	-2	-2	2	-1	2	2	-1	-2	0	-2
4	0	-3	-3	-1	1	2	2	-1	-1	2	-1	1	2
5	0	-1	1	1	-4	0	-1	2	-2	2	-2	2	2
6	0	-4	2	2	-2	2	0	0	1	2	-3	1	-1
7	0	-2	1	-2	0	2	-1	0	2	2	1	1	-4
8	0	2	0	1	1	-4	-1	1	0	-4	1	2	1
9	0	2	-1	-3	2	2	-2	0	-3	2	1	-1	1
10	0	-4	2	-2	1	2	0	2	2	-4	-1	2	0
11	0	-2	-2	0	1	-1	-1	2	0	1	-1	1	2
12	0	1	1	2	-2	2	0	-2	-1	0	2	1	-4
13	0	2	-1	-4	2	-1	1	-1	1	1	-1	2	-1
14	0	-3	2	1	-3	2	-2	0	-1	2	2	1	-1

ตารางที่ ก แสดงตัวเลขความต้องการที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ (ต่อ)

กรณีที่	สถานีที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
15	0	0	2	-3	0	2	-2	1	-1	-1	2	-2	2
16	0	-2	2	2	0	-2	0	2	2	1	-2	0	-3
17	0	-3	2	2	-2	2	2	-2	1	2	-1	-3	0
18	0	-3	-2	-1	2	2	2	-1	-2	2	-1	0	2
19	0	1	2	-1	-3	-2	2	-2	2	-1	2	2	-2
20	0	2	2	-1	2	-4	-2	1	-2	-2	1	2	1
21	0	1	0	-3	-2	2	2	-1	1	0	-4	2	2
22	0	2	-3	-2	1	2	1	0	-2	-1	2	-1	1
23	0	-1	2	2	1	-2	-1	2	-2	-3	2	1	-1
24	0	2	-1	1	2	-3	1	1	-2	1	1	1	-4
25	0	-1	2	2	1	-1	-3	1	2	-1	0	-2	0
26	0	0	-1	2	-3	1	-2	-1	2	2	-2	1	1
27	0	-4	2	2	2	-2	2	2	-4	-2	2	-2	2
28	0	-2	1	-2	1	2	1	-2	-1	1	-1	2	0
29	0	1	-1	-2	2	2	-1	-4	0	2	-2	1	2
30	0	-1	2	2	-3	-2	1	-1	2	-2	2	-2	2

ภาคผนวก 2 ผลลัพธ์เส้นทางการขนส่งจักรยานเข้าสาธารณะที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตาราง ข ผลลัพธ์เส้นทางการขนส่งจักรยานเข้าสาธารณะที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ลำดับ	ความจุสูงสุด	รอบการขนส่ง	ระยะทางรวม	เส้นทาง
	(คัน)	(รอบ)	(กิโลเมตร)	
1	10	1	19.29	1-3-8-6-4-9-7-11-5-13-2-10-12-1
	5	1	19.29	1-3-8-6-4-9-7-11-5-13-2-10-12-1
2	10	1	19	1-7-11-5-13-2-10-12-9-4-8-3-6-1
	5	1	19.17	1-7-11-12-2-10-5-13-9-4-8-3-6-1
3	10	1	18.18	1-3-8-6-7-12-2-10-5-13-11-9-4-1
	5	2	22.97	1-3-8-7-9-11-12-2-10-5-13-1
				1-6-4-1
4	10	1	18.52	1-7-12-2-10-5-13-11-9-4-6-3-8-1
	5	1	18.52	1-7-12-2-10-5-13-11-9-4-6-3-8-1
5	10	1	19.12	1-3-8-6-4-9-7-12-2-10-5-13-11-1
	5	1	19.12	1-3-8-6-4-9-7-12-2-10-5-13-11-1

ตาราง ข ผลลัพธ์เส้นทางการขนส่งจักรยานเข้าสาธารณะที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

ลำดับ	ความจุสูงสุด	รอบการขนส่ง	ระยะทางรวม	เส้นทาง
	(คัน)	(รอบ)	(กิโลเมตร)	
6	10	1	19.12	1-3-8-6-4-9-7-12-2-10-5-13-11-1
	5	2	22.94	1-3-8-6-7-12-2-10-5-13-1
				1-4-9-11-1
7	10	1	18.95	1-3-8-6-12-2-10-5-13-11-7-9-4-1
	5	1	18.95	1-3-8-6-12-2-10-5-13-11-7-9-4-1
8	10	1	18.53	1-12-2-10-5-13-11-7-9-4-8-3-6-1
	5	1	18.53	1-12-2-10-5-13-11-7-9-4-8-3-6-1
9	10	1	19.55	1-11-5-13-2-10-12-3-8-6-7-9-4-1
	5	1	23.48	1-2-10-12-3-8-6-4-11-5-13-9-7-1
10	10	1	18.18	1-3-8-6-7-12-2-10-5-13-11-9-4-1
	5	1	25.13	1-6-7-11-9-4-8-3-2-12-13-5-10-1
11	10	1	19.4	1-12-10-2-13-5-11-7-9-4-8-3-6-1
	5	1	19.4	1-12-10-2-13-5-11-7-9-4-8-3-6-1
12	10	1	20.64	1-6-3-8-4-9-11-12-2-10-5-13-7-1
	5	1	21.41	1-6-3-8-4-9-11-13-12-2-10-5-7-1
13	10	1	18.09	1-7-12-2-10-5-13-11-9-4-8-3-6-1
	5	2	22.36	1-7-12-3-8-6-1
				1-2-10-5-13-11-9-4-1
14	10	1	19.25	1-3-8-6-12-2-10-5-13-11-9-4-7-1
	5	1	19.25	1-3-8-6-12-2-10-5-13-11-9-4-7-1
15	10	1	18.18	1-3-8-6-7-12-2-10-5-13-11-9-4-1
	5	1	18.18	1-3-8-6-7-12-2-10-5-13-11-9-4-1
16	10	1	19.12	1-3-8-6-4-9-7-12-2-10-5-13-11-1
	5	1	21.37	1-3-8-6-4-7-12-2-10-5-13-9-11-1
17	10	1	19.12	1-3-8-6-4-9-7-12-2-10-5-13-11-1
	5	1	22.88	1-3-8-6-4-9-2-10-5-13-11-7-12-1
18	10	1	19.39	1-7-12-10-2-13-5-11-9-4-6-3-8-1
	5	1	19.39	1-7-12-10-2-13-5-11-9-4-6-3-8-1
19	10	1	19.1	1-7-9-4-11-5-13-2-10-12-3-8-6-1
	5	1	19.12	1-6-3-8-7-12-2-10-5-13-11-9-4-1
20	10	1	18.53	1-12-2-10-5-13-11-7-9-4-8-3-6-1
	5	1	20.46	1-12-2-10-5-13-7-11-9-4-8-3-6-1

ตาราง ข ผลลัพธ์เส้นทางการขนส่งจักรยานเข้าสาธารณะที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

ลำดับ	ความจุสูงสุด	รอบการขนส่ง	ระยะทางรวม	เส้นทาง
	(คัน)	(รอบ)	(กิโลเมตร)	
21	10	1	18.92	1-6-3-8-7-12-2-10-5-13-11-9-4-1
	5	2	20.87	1-6-8-3-12-2-10-5-13-11-1
				1-7-9-4-1
22	10	1	18.52	1-7-12-2-10-5-13-11-9-4-6-3-8-1
	5	1	18.52	1-7-12-2-10-5-13-11-9-4-6-3-8-1
23	10	1	19.44	1-3-8-6-4-7-12-2-10-5-13-11-9-1
	5	1	19.44	1-3-8-6-4-7-12-2-10-5-13-11-9-1
24	10	1	18.09	1-7-12-2-10-5-13-11-9-4-8-3-6-1
	5	1	18.31	1-7-12-2-10-13-5-11-9-4-8-3-6-1
25	10	1	19.29	1-3-8-6-4-9-7-11-5-13-2-10-12-1
	5	1	19.49	1-3-8-6-4-12-2-10-5-13-11-9-7-1
26	10	1	19.62	1-4-8-3-6-12-2-10-5-13-11-9-7-1
	5	1	19.62	1-4-8-3-6-12-2-10-5-13-11-9-7-1
27	10	1	19.29	1-3-8-6-4-9-7-11-5-13-2-10-12-1
	5	1	20.66	1-3-8-6-4-9-7-11-2-13-5-10-12-1
28	10	1	18.92	1-6-3-8-7-12-2-10-5-13-11-9-4-1
	5	1	18.92	1-6-3-8-7-12-2-10-5-13-11-9-4-1
29	10	1	18.96	1-12-2-10-5-13-11-7-9-4-6-3-8-1
	5	2	25.15	1-12-13-11-7-1
				1-2-10-5-9-4-6-3-8-1
30	10	1	19.12	1-7-9-4-11-5-13-2-10-12-3-8-6-1
	5	1	21.35	1-4-9-7-2-10-13-5-11-12-3-8-6-1

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 และไม่อยู่ในระหว่างการศึกษาหรือตีพิมพ์ในวารสารวิชาการอื่น ๆ ให้ผู้แต่งส่ง (1) บทความพร้อมกับ (2) จดหมายนำ (Cover Letter) ที่ระบุ

- ขอบเขต ของบทความว่าสอดคล้องกับขอบเขตของวารสารในหัวข้อใด
- ความสำคัญของหัวข้อบทความหรือปัญหาทางจริง
- ปัญหาทางวิจัยหรือช่องว่างขององค์ความรู้
- ผลงานวิจัยที่ได้มีความแตกต่างหรือดีกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้อย่างไร
- 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 การตั้งค่าน้ำกระดาษ 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 และหากมีหัวข้อย่อยให้ใช้เลขระบบบทสนิยกำกับหัวข้อย่อย 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 และอาชววรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)
- วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods) กล่าวถึงรายละเอียด การวิเคราะห์และทดลองที่กระชับและชัดเจน
- ผลการทดลอง (Results) บอกผลที่พบอย่างชัดเจน สมบูรณ์ และมีรายละเอียดครบถ้วน
- อภิปรายผลและสรุป (Discussion and Conclusion) อาจเขียนรวมกับผลการทดลองได้ เป็นการประเมินการตีความและการวิเคราะห์ในแง่มุมต่างๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้อง หรือขัดแย้งกับผลงานของผู้อื่นอย่างไร

ต้องมีการอ้างหลักการหรือทฤษฎีมาสนับสนุน หรือหักล้างอย่างเป็นเหตุเป็นผลและ
อาจมีข้อเสนอแนะที่จะนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

2.6 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) (ถ้ามี) ระบุสั้นๆ ว่าได้รับการสนับสนุนทุน
วิจัย หรือได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานใด

2.7 เอกสารอ้างอิง (References)

การอ้างอิงในบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลขในวงเล็บก้ามปู[1] เอกสารอ้างอิง
ท้ายบททุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงในบทความ และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลัก
วิชาการตามรูปแบบของ IEEE ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบดังต่อไปนี้

กรณีเป็นหนังสือ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher,
(only U.S. State), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] R. E. Blahut, *Theory and Practice of Error Control Codes*, Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1983.
- [2] I.A. Glover and P.M. Grant, *Digital Communications*, 3rd ed. Harlow: Prentice Hall, 2009.
- [3] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York, NY, USA: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [4] Westinghouse Electric Corporation (Staff of Technology and Science, Aerospace Div.), *Integrated Electronic Systems*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1970.
- [5] T.M. Lillis and J. Swann, "Giving feedback on student writing," in *Teaching academic writing: a toolkit for higher education*, C. Coffin, Eds. London: Routledge, 2003, pp. 101-129.

กรณีเป็นหนังสือ E-Book

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of Published Book*, xth ed. City of Publisher, State,
Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx. [Online]. Available: <http://www.web.com>

ตัวอย่าง

- [1] G. O. Young, “Synthetic structure of industrial plastics,” in *Plastics, vol. 3, Polymers of Hexadromicon*, J. Peters, Ed., 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64. [Online]. Available: <http://www.bookref.com>.
- [2] *The Terahertz Wave eBook*. ZOmega Terahertz Corp., 2014. [Online]. Available: http://dl.z-thz.com/eBook/zomega_ebook_pdf_1206_sr.pdf. Accessed: May 19, 2014.
- [3] P. B. Kurland and R. Lerner, Eds., *The Founders’ Constitution*. Chicago, IL, USA: Univ. of Chicago Press, 1987. [Online]. Available: <http://press-pubs.uchicago.edu/founders/> Accessed: Feb. 28, 2010.

กรณีเป็นหนังสือแปล

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher (in Language), year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] K. Ichiro, *Thai Economy and Railway 1885–1935*, Tokyo: Nihon Keizai Hyoronsha (in Japanese), 2000.
- [2] M. Gorkii, “Optimal design,” *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, vol. 12, pp. 111–122, 1961 (Transl.: in L. Pontryagin, Ed., *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. New York, NY, USA: Interscience, 1962, ch. 2, sec. 3, pp. 127–135).

กรณีเป็นส่วนหนึ่งของหนังสือ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] T. Ogura, “Electronic government and surveillance-oriented society,” in *Theorizing Surveillance: The Panopticon and Beyond*. Cullompton, U.K.: Willan, 2006, ch. 13, pp. 270–295.
- [2] L. Li, J. Yang, and C. Li, “Super-resolution restoration and image reconstruction for passive millimeter wave imaging,” in *Image Restoration—Recent Advances and Applications*, A. Histace, Ed., Rijeka, Croatia: InTech, 2012, pp. 25–45.
- [3] หนังสือ With Editor
- [4] C. Bennett, “What happens when you book an airline ticket? The collection and processing of passenger data post 9/11,” in *Global Surveillance and Policing: Borders, Security, Identity*, E. Zureik and M. Salter, Eds., Cullompton, U.K.: Willan, 2005, pp. 113–138.

กรณีหนังสือที่มีบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of Published Book*, X. Editor, Ed., City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, pp. xxx–xxx.

X. Editor, Ed. *Title of Published Book*. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year.

ตัวอย่าง

- [1] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed., New York, NY, USA: Wiley, 1994, pp. 55–70.
- [2] C. Bennett, "What happens when you book an airline ticket? The collection and processing of passenger data post9/11," in *Global Surveillance and Policing: Borders, Security, Identity*, E. Zureik and M. Salter, Eds., Cullompton, U.K.: Willan, 2005, pp. 113–138.
- [3] W. R. Leonard and M. H. Crawford, Eds. *Human Biology of Pastoral Populations*. New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2002.

กรณีเป็นหนังสือมี Series

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, X. Editor, Ed., xth ed. City of Publisher, State (only U.S.), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Taflov, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* in Computational Electrodynamics II, vol. 3, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 1996.
- [2] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, Eds., San Francisco, CA, USA: Academic, 1977, pp. 47–160.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการ (บทความถูกนำเสนอในการประชุมแล้ว)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," presented at the Abbreviated Name of Conf., City of Conf., Abbrev. State, Country, Month and day(s), year, Paper number.

ตัวอย่าง

- [1] J. G. Kreifeldt, "An analysis of surface-detected EMG as an amplitude-modulated noise," presented at the 1989 Int. Conf. Medicine and Biological Engineering, Chicago, IL, USA, Nov. 9–12, 1989.

- [2] G. W. Juette and L. E. Zeffanella, "Radio noise currents on short sections on bundle conductors," presented at the IEEE Summer Power Meeting, Dallas, TX, USA, Jun. 22–27, 1990, Paper 90 SM 690-0 PWRS.
- [3] J. Arrillaga and B. Giessner, "Limitation of short-circuit levels by means of HVDC links," presented at the IEEE Summer Power Meeting, Los Angeles, CA, USA, Jul. 12–17, 1990, Paper 70 CP 637.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการที่กำลังจะตีพิมพ์ (บทความถูกนำเสนอในการประชุมแล้ว)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, (location of conference is optional), (Month and day(s) if provided) year, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] W. D. Doyle, "Magnetization reversal in films with biaxial anisotropy," in *1987 Proc. INTERMAG Conf.*, pp. 2.2- 1–2.2-6.
- [2] C. T. Meadow and D. W. Waugh, "Computer assisted interrogation," in *1991 Fall Joint Computer Conf., Proc. AFIPS Conf.*, vol. 29. Washington, DC, USA: Spartan, 1991, pp. 381–394.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการที่มีเลข DOI

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, (location of conference is optional), year, pp. xxx– xxx, doi: xxx.

ตัวอย่าง

- [1] J. Zhao, G. Sun, G. H. Loh, and Y. Xie, "Energy-efficient GPU design with reconfigurable in-package graphics II. Style—7 memory," in *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. Low Power Electron. Design (ISLPED)*, Jul. 2012, pp. 403–408, doi: 10.1145/2333660.2333752.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมสถานที่

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, City, State, Country, year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] L. S. Carmichael, N. Ghani, P. K. Rajan, K. O'Donoghue, and R. Holt, "Characterization and comparison of modern layer-2 Ethernet survivability protocols," in *Proc. 37th Southeastern Symp. Syst. Theory (SSST 2005)*, Tuskegee, AL, USA, Mar. 20–22, 2005, pp. 124–129

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมบรรณาธิการ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, X. Editor, Ed. (location of conference is optional), year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Amador-Perez and R. A. Rodriguez-Solis, "Analysis of a CPW-fed annular slot ring antenna using DOE," in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, in Slot Ring Antennas II, vol. 3, 2nd ed., Jul. 2006, pp. 4301–4304.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการพร้อมหัวข้อต่อเนื่อง ฉบับ และ บรรณาธิการ

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.* in Volume Title, in Series Title, ed., year, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง

- [1] A. Amador-Perez and R. A. Rodriguez-Solis, "Analysis of a CPW-fed annular slot ring antenna using DOE," in *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, in Slot Ring Antennas II, vol. 3, 2nd ed., Jul. 2006, pp. 4301–4304.

กรณีเป็นบทความจากประชุมวิชาการออนไลน์

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author. (Date). Title. Presented at Abbreviated Conf. title. [Type of Medium]. Available: site/path/file

ตัวอย่าง

- [1] V. Chandrasekaran, S. Sanghavi, P. A. Parrilo, and A. S. Willsky. (2009). Sparse and low-rank matrix decompositions. Presented at IFAC 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016388632>

กรณีเป็นฐานข้อมูล Online Dataset ที่มีการอ้างอิงเลข DOI

รูปแบบพื้นฐาน

Title, Source, Date, doi: xxx.

Title, Source, Date, doi: URL.

ตัวอย่าง

- [1] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013, doi: 10.3886/ICPSR30122.v2.
- [2] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.3886/ICPSR30122.v2>.

กรณีเป็นฐานข้อมูล Online Dataset ที่มีการอ้างอิงผ่านเว็บไซต์

รูปแบบพื้นฐาน

Title, Source, Date. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] *Treatment episode dataset: Discharges (TEDS-D): Concatenated, 2006 to 2009*, U.S. Department of Health and Human Services, Substance Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, Aug. 2013. [Online]. Available: <http://www.icpsr.umich.edu/icpsrweb/SAMHDA/studies/30122/version/2>

กรณีเป็นหนังสือคู่มือ(รูปเล่ม)

รูปแบบพื้นฐาน

Name of Manual/Handbook, x ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, Country, year, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง

- [1] *Transmission Systems for Communications*, 3rd ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, USA, 1985, pp. 44-60.

กรณีเป็นหนังสือคู่มือ(ออนไลน์)

รูปแบบพื้นฐาน

J. K. Author (or Abbrev. Name of Co., City of Co. Abbrev. State, Country). Name of Manual/Handbook, x ed. (year). Accessed: Date. [Online]. Available: <http://www.url.com>

ตัวอย่าง

- [1] L. 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 ควรมีการอ้างอิงภายในเนื้อหามายังภาคผนวก เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ง่าย ผู้แต่งสามารถแบ่งภาคผนวกออกเป็นหลาย ๆ ส่วนได้ เช่น ภาคผนวก 1 แสดงถึงการรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจ ภาคผนวก 2 แสดง การรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐและเอกชน เป็นต้น

2.9 ตารางและรูป และสมการ

การแทรกตารางและรูป และสมการ ต้องมีความคมชัดไม่น้อยกว่า 300 dpi ให้แทรกไว้ในเนื้อหาบทความ มีคำอธิบายประกอบสั้นๆ ที่สามารถสื่อความหมายได้สาระครบถ้วนและเข้าใจ

กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า “ตารางที่...” และมีคำอธิบายใส่ไว้เหนือตาราง

กรณีที่เป็นรูปให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า“รูปที่...” และมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูป กรณีที่มีรูปหลายรูปที่จะแสดงในครั้งเดียว ให้แบ่งรูปภาพด้วยตัวอักษร (ก), (ข), (ค) สำหรับบทความภาษาไทย และ ตัวอักษร (a), (b), (c) สำหรับบทความภาษาอังกฤษ

กรณีเป็นการแทรกสมการ ให้ระบุลำดับที่ของสมการไว้ทางด้านขวาของสมการภายในวงเล็บ เช่น (1) และการอ้างอิงในเนื้อหา ให้ใช้คำว่า สมการที่ (1)

3. เกณฑ์การพิจารณาบทความ

เกณฑ์การพิจารณาบทความสำหรับวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบังมีดังนี้ เนื้อหาของบทความมีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ 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.....

Ladkrabang Engineering Journal

The Ladkrabang Engineering Journal is a technical journal belonging to the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMITL).

The objectives are to:

1. publish high quality research papers in the field of engineering and technology at national and international levels
2. disseminate research works and development in the field of engineering and technology
3. be a medium of exchanging research works and new body of knowledge in the field of engineering and technology among students, researchers, lecturers, and interested persons
4. be an archive of research reports and articles that are interesting and valuable in the field of engineering and technology.

Frequency:

The journal is published quarterly.

Policy:

Articles and reports should have engineering research values whether containing substantial supported theories, innovative works, substantial experiment results and/or fulfilled with useful and constructive discussions or reviews standardized to regional or international acceptance.

Manuscripts:

Manuscripts can be written in either Thai or English, complying with the journal format, which are ready to be submitted in camera ready form. To ensure that all papers are at the same standard, authors are asked to prepare their manuscripts using Microsoft Word for windows. Others associated components such as graphs or figures should be prepared using windows-based packages.

For convenience in printing and to common standard in publication, submitted manuscripts should conform to the following orders.

Titles: Should be given in both Thai and English.

Author and co-authors: Are given without any title.

Correspondent address: Specify short address of authors. If authors are students, institution address (department, faculty and institution) is required.

Abstract: Should be given in both Thai and English.

Main theme: Should contain the following sections.

1. Introduction
2. Theory
3. Construction and experimental procedures
4. Experimental results and discussions
5. Conclusion or Summary

Acknowledgement: (if required)

References: Should follow the pattern given below.

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

Submission:

Manuscripts from inside and outside King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang can be submitted to the journal. The first page of the manuscript contains the authors' names and complete affiliations. Please duplicate the first page of the manuscript with the names and affiliations made anonymous. The manuscript length is between 8-14 pages of A4. The manuscript that exceeds the length limitation may not be considered for publication depending on the editorial judgment. Please also clearly fill out name-surname, address, phone number, and e-mail address in the submission form. Authors can submit their manuscripts online via the journal system at the url: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>.

Published by:

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Tel: (662) 329-8000 Ext. 3464, 3465

Fax: (662) 329-8317

Advisors:

Dean School of Engineering

Assoc.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai

Editor-in-chief:

Prof.Dr.Uma Seeboonruang

Associate Editor:

Assoc.Prof.Dr.Jakrapong Pongpeng

Professor Editor:

Prof.Dr.Pornchai Supnithi

Associate Editor:

Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvonge

Associate Editor:

Assoc.Prof.Dr.Ravipat Lapcharoensuk

Assistant Editor:

Dr.Pinit Tanachaichoksirikun

Editorial Staff:

Miss.Chanunchida Nobnom

Liaise & Member Relationships

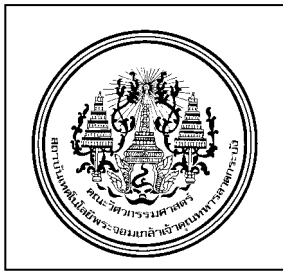
Create Original Artwork

Mr.Virun Chulkaivalsucharit

Proofreading and Photo Books

Mr.Thanongsak Chaichuensaen

Cover Design



ISSN 0125-1724 (Print)

ISSN 2730-3888 (Online)

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 39 Number 1

March 2022

Research Papers

1. A Mathematical Model for Service Scheduling Problem of Tourism Enterprises in Thailand with Soft Time Windows 1
P. Thumrongvut K. Sethanan T. Jamrus C. Wongloucha and K. Worasan
2. Treatment of Gaseous Formaldehyde in a Gross Anatomy Laboratory using Ozonation 11
W. Dechapanya S. Nontula S. Phudthabun S. Sanongraj and S. Mattaraj
3. Optimal Condition on Surface Roughness in Side Milling of High Density Polyethylene and Rubberwood Flour Composites using Response Surface Methodology 23
C. Srivabut S. Rawangwong C. Homkhiew and J. Rodjananugoon
4. Influence of Brake pad shim on the Brake Noise for Sports Utility Vehicle (SUV) 7 Seats 35
A. Khunthipong K. Tangchaichit C. Soemphol and S. Siripornakarachai
5. Influence of Factors on Non-Exhaust PM Emissions from Motorcycle 45
W. Songkitti S. Pong-a-mas C. Plengsa-ard and E. Wirojsakunchai
6. The Developing Cost Model for Electric Public Transport Vehicles Charging Based on Blockchain Technology 54
K. Sukkrajang
7. The Application of Employing the Discriminant Analysis Technique to Forecast the Inspection Marking on the Integrated Circuit Product 63
K. Boonma and S. klongboonjit
8. The study and Design for Manufacturing Process of toy plant pot using CAD/CAM/CAE Technique 76
W. Lahamornchaiyakul and W. Doncomephang
9. Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem in Bike Sharing System: A Case Study of the Chiang Mai Bike-Sharing System, Thailand 91
K. Kamano and M. Arvipphan