

“วิศวกรรมลาดกระบัง”

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เป็นเอกสารรวบรวมรายงานและบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนกับงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิดหรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้และมีทฤษฎีประกอบหรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

รูปแบบของบทความ

บทความที่เสนอจะเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยจัดพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดให้ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลทเพื่อพิมพ์ได้ทันที (camera ready) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของบทความมีมาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ **Microsoft Word for Windows** สำหรับรูปภาพประกอบ หากมีใช้ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่น่าสนใจเสนอเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

ชื่อเรื่อง	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	
ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน	ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ	
สถานที่ทำงาน	ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน	
บทคัดย่อ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	
เนื้อความ	ควรประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ และมีเลขประจำหัวข้อ ตามลำดับ	
	1. บทนำ	3. การทดลองและผลการทดลอง
	2. ทฤษฎี	4. สรุป
	2.1 หลักการของ.....	
	2.2 หลักการใหม่.....	

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัวเลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ 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. 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.

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 6 หน้า 2 คอลัมน์ โดยติดต่อส่งได้ที่ E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสมผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465

โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คณบดี

รศ.ดร.คมสัน มาลีสี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รศ.ดร.อิสระชัย จามหฺร

กองบรรณาธิการ

นายโกล วดเขียน

ออกแบบปกและรูปเล่ม

นางอาทิตย์ดา ขาววิกรม

ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์

จัดทำต้นฉบับ Artwork

พิสูจน์อักษร

จัดจำหน่ายโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางอาทิตย์ดา ขาววิกรม

โทร. 02-329-8317



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติสุขภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เควิต บรรเจิดพงษ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชษฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตรจรัส

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนัย ไกรฤกษ์

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร

สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูง (THAIST)

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ปัจจัยสำคัญของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อการผลิตไบโอดีเซล

Important Parameters in Transesterification for Biodiesel Production

ธาดา ทรัพย์พัฒนา ชนินทร ตริ่มังมิตร ธนวรรณ พิณรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยทั่วไปที่นิยมใช้มี 4 วิธี คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์ และการใช้สภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งแต่ละวิธีนั้นจะมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป โดยบทความนี้จะเปรียบเทียบแต่ละวิธี และกล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซลได้แก่ อิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน อิทธิพลของอัตราส่วน โดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน อิทธิพลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอิทธิพลของการใช้ตัวทำละลาย

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล, ตัวเร่งปฏิกิริยา, ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน, ตัวทำละลาย

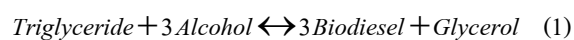
Abstract

This article presents the reviews of the production of biodiesel from transesterification. There are four common methods, which are base catalyst, acid catalyst, enzyme catalyst and supercritical method. Each methodology have different advantage and disadvantage. This article will compare each method. The factors, which affect to the production of biodiesel such as temperature and pressure, molar ratio of alcohol to oil, type and amount of catalyst, reaction time, and use of solvent, were discussed

Keywords : Biodiesel, Catalyst, Transesterification, Solvent

1. บทนำ

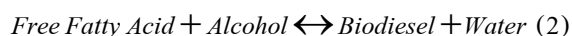
การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยทั่วไปนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้สามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็ว โดยที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ (ที่ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์) กับแอลกอฮอล์โดยมีการให้ความร้อน เกิดอัลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล และมีสารข้างเคียงเกิดขึ้นคือ กลีเซอรอล ดังแสดงในสมการที่ (1)



วัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอดีเซลนั้นจะมีผลอย่างมากกับการเลือกใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และสภาวะที่เหมาะสม โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาคือ ปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำที่มีอยู่ในสารตั้งต้น โดยงานวิจัยของ Kusdiana และ Saka [1] แสดงให้เห็นว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระเพียงร้อยละ 20 จะทำให้ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลลดลงโดยถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลงร้อยละ 65 เทียบกับการใช้วัตถุดิบบริสุทธิ์ที่สามารถผลิตไบโอดีเซลได้เกือบร้อยละ 100 นอกจากนี้ น้ำที่ปริมาณ

เพียงร้อยละ 1 จะส่งผลกระทบต่อร้อยละการผลิตไบโอดีเซลอย่างมาก โดยถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะลดผลผลิตไบโอดีเซลลงประมาณร้อยละ 10 และถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะลดผลผลิตไบโอดีเซลลงประมาณร้อยละ 20 [1] เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะน้ำและกรดไขมันอิสระทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้น โดยในกรณีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส น้ำสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล โดยที่กรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับเบสเกิดเป็นสบู่ในปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน นอกจากส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลงแล้วจะทำให้การแยกสารผลิตภัณฑ์กับสารที่ไม่ต้องการนั้นยากขึ้นอีกด้วย

ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสจะใช้ได้ดีเฉพาะวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น ซึ่งปกติมีราคาแพงทำให้ต้นทุนสูง สำหรับสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระอยู่เป็นจำนวนมากเช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว พืชน้ำมันที่ไม่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ หรือสาหร่าย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีถ้าทำการแยกน้ำออก ก่อนเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยากรดเกิดเป็นไบโอดีเซลและน้ำได้ในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันแสดงดังในสมการที่ (2)



แต่ถ้าไม่ทำการแยกน้ำออกจากสารตั้งต้น กรดจะเกิดการแตกตัวในน้ำทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของกรดลดลง [2]

นอกจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดและเบส ยังมีนักวิจัยบางส่วนได้ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์เข้าช่วยในการทำปฏิกิริยาโดยที่สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำปนเปื้อน [3-5] อีกหนึ่งวิธีการที่น่าสนใจคือ การใช้สถานะเหนือวิกฤตของแอลกอฮอล์ ที่สถานะนี้คุณสมบัติของน้ำมันและแอลกอฮอล์จะมีการเปลี่ยนแปลง โดยสารตั้งต้นทั้งสองสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ในสถานะดังกล่าว ประกอบกับอุณหภูมิและความดันที่สูงทำให้

ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีและรวดเร็ว รวมทั้งการทำปฏิกิริยา ณ สถานะนี้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งสิ่งเจือปน (กรดไขมันอิสระและน้ำ) ไม่มีผลต่อปฏิกิริยา [1], [6-7]

2. อิทธิพลของตัวแปร

สถานะที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของแต่ละวิธีมีความแตกต่างกัน ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยอิทธิพลของแต่ละตัวแปรจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน

อุณหภูมิและความดันถือเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยตรงเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ภายในโมเลกุลทำให้สารตั้งต้นนั้นทำปฏิกิริยากัน ผลผลิตไบโอดีเซลจะเกิดได้รวดเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสมักนิยมใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาใกล้จุดเดือดของแอลกอฮอล์ คือประมาณ 60 องศาเซลเซียส [8-9]

เมื่อใช้อุณหภูมิที่ต่ำประมาณอุณหภูมิห้อง (25 และ 30 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน (สาหร่าย *คลอเรลล่า วูกาลิส*, *Chlorella vulgaris*) คือ 180:1 กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณของไบโอดีเซลจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นคือ ร้อยละ 5 ถึง 10 หลังทำปฏิกิริยาโดยใช้เวลานานถึง 6 ชั่วโมง แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่ 60 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณร้อยละผลผลิตสูงถึง 95 อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 70 องศาเซลเซียส ปริมาณของร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือ 81 ทั้งนี้อาจเพราะเมทานอลระเหยทำให้ลดความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา [10] โดยทั่วไปการทำปฏิกิริยาจะมีความดันกับระบบเล็กน้อย 2-3 ความดันบรรยากาศ เพื่อพยายามทำให้เมทานอลกลั่นตัวอยู่ในสถานะของเหลว

ให้มากที่สุด สำหรับการทำให้ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดวิกฤตของแอลกอฮอล์ (ประมาณ 240-270 องศาเซลเซียส) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีในระยะเวลาสั้น 15 นาที โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารตั้งต้นอยู่ในเฟสเดียวกันที่สภาวะดังกล่าวและประกอบกับสภาวะอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว [11-12] แต่อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันไม่ควรมีค่าสูงเกิน 300 องศาเซลเซียส เพราะจะเกิดการแตกตัวของผลิตภัณฑ์ และมีการเปลี่ยนจากไอโซเมอร์แบบ cis เป็น trans ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารตั้งต้นที่มีพันธะคู่มาก ซึ่งมีความไม่อิ่มตัวสูง [11]

2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

แอลกอฮอล์นั้นเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันถ้าตามสมการปฏิกิริยา (สมการที่ (1)) การทำปฏิกิริยาโดยเริ่มต้นที่น้ำมันปริมาณ 1 โมลจะใช้แอลกอฮอล์ปริมาณ 3 โมล แต่โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ปริมาณแอลกอฮอล์มากเกินไป เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมัน และเป็นการผลักดันให้ปฏิกิริยาเกิดในทิศทางของผลิตภัณฑ์มากขึ้น

โดยทั่วไปการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันไม่มากนักซึ่งการทดลองของ Agarwal และคณะ [13] จะศึกษาช่วง 3:1 ถึง 10:1 ที่สภาวะอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง จะพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ 6:1 จะมีค่าผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดที่ร้อยละ 98.5 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 10:1 ซึ่งได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ร้อยละ 94.1 เพราะปริมาณของแอลกอฮอล์ส่งผลทำให้ความเข้มข้นรวมของสารตั้งต้นลดลงเกิดการเจือจางจึงทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลน้อยลง นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมากกว่า 9:1 ทำให้การแยกกลีเซอรอลยากขึ้นอีกด้วย

อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดนั้นจะใช้น้ำมันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับชนิดเบส จากการทดลองของ Soriano และคณะ [14] ที่สภาวะ 75 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดร้อยละ 5 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง ศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 12:1 24:1 42:1 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ต่ำมาประมาณร้อยละ 20 และที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 24:1 จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ร้อยละ 86 และถ้าอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมากกว่า 42:1 จะทำให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ลดลงเพราะการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง

นอกจากนี้การใช้แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นจะทำให้การเข้าทำปฏิกิริยายากขึ้น และทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลในระยะเวลาที่เท่ากันลดลงจาก 90 เป็น 77 และ 70 เมื่อใช้เมทานอล เอทานอล และโพรพานอล ตามลำดับ [15] โดยส่วนใหญ่แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้คือเมทานอล เพราะหาง่ายและราคาถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ และสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี

2.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นการเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบเป็นหลัก และปริมาณของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลอย่างมากต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนิยมกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเพราะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า แต่ Ramadhas และคณะ [16] นำสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระเจือปนทดลองศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 0.3-1 โดยน้ำหนักน้ำมัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 45 ± 5 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 9:1 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 0.5 ได้ผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุด ประมาณร้อยละ 98 และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะอาจจะมีสบู่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาดังชนิดกัน

วิธีการ	สภาวะ			สิ่งเจือปน		เวลา (นาท)	ร้อยละผลผลิต ไบโอดีเซล	อ้างอิง
	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	อัตราส่วนโดย โมล (เมทานอล: น้ำมัน)	กรด ไขมัน อิสระ	น้ำ			
ตัวเร่งปฏิกิริยา	65	P^{sat}	12:1	มีผล	มีผล	180	95	[8]
ชนิดเบส	55	P^{sat}	6:1	มีผล	มีผล	30	100	[9]
ตัวเร่งปฏิกิริยา	65	P^{sat}	30:1	ไม่มีผล	มีผล	4,140	99	[17]
ชนิดกรด	200	P^{sat}	30:1	ไม่มีผล	มีผล	300	85	[18]
ตัวเร่งปฏิกิริยา	50	P^{sat}	1:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	480	96	[4]
แบบเอนไซม์	37	P^{sat}	5:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	3,600	94	[5]
สภาวะเหนือ	255	P^{sat}	9:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	25	90	[6]
วิกฤต	400	200	40:1	ไม่มีผล	ไม่มีผล	40	96	[7]

หมายเหตุ P^{sat} คือ ความดันไอ

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสแต่เหมาะสำหรับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระปนเปื้อน โดยการทดลองที่ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเมื่อใช้ร้อยละ 1 2 4 โดยน้ำหนักน้ำมันที่สภาวะอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 10:1 เมทานอลต่อไดเมทิลอีเทอร์ 1.76 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง จะได้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่มากที่สุด 95 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดที่ร้อยละ 4 [19]

ในการใช้งานยังสามารถเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้น คือของเหลวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) หรือสามารถเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) มักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง สามารถทำการแยกออกได้ง่ายหลังการทำปฏิกิริยา [18]

2.4 อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

เมื่อเปรียบเทียบจากตารางที่ 1 จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดจะใช้ช่วงระยะเวลา 300-4,140 นาที่ [17-18] ซึ่งนานกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสซึ่งมีช่วงระยะเวลา

30-180 นาที่ [8-9] เพื่อให้ได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 95-100 และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์จะใช้ระยะเวลาจนถึง 480-3,600 นาที่ [4-5] ส่วนการทำปฏิกิริยาในสภาวะเหนือวิกฤตจะใช้ช่วงระยะเวลานี้ที่มากที่สุดคือ 25-40 นาที่ [6-7]

2.5 อิทธิพลของการใช้ตัวทำละลาย

การใช้ตัวทำละลายเข้าช่วยสามารถลดการใช้อุณหภูมิที่มีค่าสูง และลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาได้

การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, KOH) สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ 25 องศาเซลเซียส (ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้องของประเทศเมืองหนาว) เมื่อใช้ตัวทำละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ (TMBE) หรือไดเอทิลอีเทอร์ (DEE) หรือไดเมทิลอีเทอร์ (DME) หรือเตตระไฮโดรฟูแลน (THF) ที่สภาวะการเข้าความถี่ 2.6 เฮิร์ตส เวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาที่ อัตราส่วนโดยโมลตัวทำละลายต่อเมทานอลใช้น้อยที่สุดที่ต้องการให้สารละลายกัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายทั้งหมด

พบว่าร้อยละไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นผกผันกับค่าความหนืดของตัวทำละลายโดยไดเมทิลอีเทอร์ มีประสิทธิภาพมากที่สุด ให้ปริมาณไบโอดีเซลถึงร้อยละ 80 แต่ถ้าไม่ใช้ตัวทำละลายจะได้ผลผลิตไบโอดีเซลเพียงเล็กน้อยร้อยละ 60 นอกจากนี้ถ้าอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันดอกทานตะวันเพิ่มขึ้น อิทธิพลของตัวทำละลายจะลดลง ถ้าเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 8:1 ร้อยละไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวทำละลายต่างชนิดกันจะไม่มีผลแตกต่างกัน และให้ผลผลิตร้อยละ 99 เนื่องจากเมทานอลมีส่วนทำหน้าที่เป็นสารละลายด้วย ทำให้น้ำมันและเมทานอลผสมกันได้ดีขึ้น [20]

Pena และคณะ [21] ได้ศึกษาวิจัยการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันละหุ่ง และใช้ตัวทำละลายคือ เฮกเซน จากผลการทดลองพบว่าถ้าไม่มีการเพิ่มตัวทำละลายจะได้ไบโอดีเซลร้อยละ 86.4 แต่เมื่อเพิ่มตัวทำละลายร้อยละ 15 โดยปริมาตร ส่งผลให้เกิดไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 93.7 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสคือ โซเดียมเมทอกไซด์ (Sodium Methoxide) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันคือ 6:1 และใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที

Alhassan และคณะ [22] ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันฝ้าย และใช้ตัวทำละลายคือ ไดเอทิลอีเทอร์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มตัวทำละลายร้อยละ 10 โดยปริมาตร ได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 70 แต่เมื่อเพิ่มตัวทำละลายเป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ได้ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 97 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันคือ 6:1 และใช้เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที

การเพิ่มตัวทำละลายในปฏิกิริยามีอิทธิพลอย่างมากต่อการเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลจากหลายงานวิจัย [20-22]

3. สรุป

ดังนั้นในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์-เอสเตอร์ริฟิเคชันต้องคำนึงถึงปัจจัยที่ได้กล่าวมาด้วยกัน เพื่อให้ได้ผลผลิตที่เหมาะสม โดยเริ่มต้นจากการเลือกวัตถุดิบ และวิธีการที่เหมาะสมกับวัตถุดิบดังกล่าวและทำ

การปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งคือ อุณหภูมิ และความดัน อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และการใช้ตัวทำละลาย

4. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Kusdiana and S. Saka, "Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment," *Bioresour. Technol.*, Vol. 91, No. 3, pp. 289–295, Feb., 2004.
- [2] E. Lotero, Y. Liu, D. E. Lopez, K. Suwannakarn, D. A. Bruce, and J. G. Goodwin, "Synthesis of Biodiesel via Acid Catalysis," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 44, No. 14, pp. 5353–5363, Jul., 2005.
- [3] C.-H. Liu, C.-C. Huang, Y.-W. Wang, D.-J. Lee, and J.-S. Chang, "Biodiesel production by enzymatic transesterification catalyzed by Burkholderia lipase immobilized on hydrophobic magnetic particles," *Appl. Energy*, Vol. 100, pp. 41–46, Dec., 2012.
- [4] M. M. R. Talukder, P. Das, T. S. Fang, and J. C. Wu, "Enhanced enzymatic transesterification of palm oil to biodiesel," *Biochem. Eng. J.*, Vol. 55, No. 2, pp. 119–122, Jul., 2011.
- [5] X. Li, X.-Y. He, Z.-L. Li, Y.-D. Wang, C.-Y. Wang, H. Shi, and F. Wang, "Enzymatic production of biodiesel from Pistacia chinensis bge seed oil using immobilized lipase," *Fuel*, Vol. 92, No. 1, pp. 89–93, Feb., 2012.
- [6] P. D. Patil, V. G. Gude, A. Mannarswamy, S. Deng, P. Cooke, S. Munson-McGee, I. Rhodes, P. Lammers, and N. Nirmalakhandan, "Optimization of direct conversion of wet algae to biodiesel under supercritical methanol conditions," *Bioresour. Technol.*, Vol. 102, No. 1, pp. 118–122, Jan., 2011.

- [7] G. Madras, C. Kolluru, and R. Kumar, "Synthesis of biodiesel in supercritical fluids," *Fuel*, Vol. 83, No. 14–15, pp. 2029–2033, Oct., 2004.
- [8] X. Liu, H. He, Y. Wang, S. Zhu, and X. Piao, "Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst," *Fuel*, Vol. 87, No. 2, pp. 216–221, Feb., 2008.
- [9] M.Çetinkaya and F.Karaosmanoglu, "Optimization of Base-Catalyzed Transesterification Reaction of Used Cooking Oil," *Energy Fuels*, Vol. 18, No. 6, pp. 1888–1895, Nov., 2004.
- [10] M. K. Lam and K. T. Lee, "Catalytic transesterification of high viscosity crude microalgae lipid to biodiesel: Effect of co-solvent," *Fuel Process. Technol.*, Vol. 110, pp. 242–248, Jun., 2013.
- [11] A. Demirbas, "Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 50, No. 4, pp. 923–927, Apr., 2009.
- [12] H. Imahara, E. Minami, S. Hari, and S. Saka, "Thermal stability of biodiesel in supercritical methanol," *Fuel*, Vol. 87, No. 1, pp. 1–6, Jan., 2008.
- [13] M. Agarwal, G. Chauhan, S. P. Chaurasia, and K. Singh, "Study of catalytic behavior of KOH as homogeneous and heterogeneous catalyst for biodiesel production," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, Vol. 43, No. 1, pp. 89–94, Jan., 2012.
- [14] N. U. Soriano Jr., R. Venditti, and D. S. Argyropoulos, "Biodiesel synthesis via homogeneous Lewis acid-catalyzed transesterification," *Fuel*, Vol. 88, No. 3, pp. 560–565, Mar., 2009.
- [15] R. D. Micic, M. D. Tomic, F. E. Kiss, E. B. Nikolic-Djoric, and M. D. Simikic, "Influence of reaction conditions and type of alcohol on biodiesel yields and process economics of supercritical transesterification," *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 717–726, Oct. 2014.
- [16] A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, "Biodiesel production from high FFA rubber seed oil," *Fuel*, Vol. 84, No. 4, pp. 335–340, Mar., 2005.
- [17] B. Freedman, E. H. Pryde, and T. L. Mounts, "Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils," *J. Am. Oil Chem. Soc.*, Vol. 61, No. 10, pp. 1638–1643, Oct., 1984.
- [18] H. Sun, Y. Ding, J. Duan, Q. Zhang, Z. Wang, H. Lou, and X. Zheng, "Transesterification of sunflower oil to biodiesel on ZrO₂ supported La₂O₃ catalyst," *Bioresour. Technol.*, Vol. 101, No. 3, pp. 953–958, Feb., 2010.
- [19] G. Guan, K. Kusakabe, N. Sakurai, and K. Moriyama, "Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using acid catalysts in the presence of dimethyl ether," *Fuel*, Vol. 88, No. 1, pp. 81–86, Jan., 2009.
- [20] G. Guan, N. Sakurai, and K. Kusakabe, "Synthesis of biodiesel from sunflower oil at room temperature in the presence of various cosolvents," *Chem. Eng. J.*, Vol. 146, No. 2, pp. 302–306, Feb., 2009.
- [21] R. Pena, R. Romero, S. L. Martínez, M. J. Ramos, A. Martínez, and R. Natividad, "Transesterification of Castor Oil: Effect of Catalyst and Co-Solvent," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 48, No. 3, pp. 1186–1189, Feb., 2009.
- [22] Y. Alhassan, N. Kumar, I. M. Bugaje, H. S. Pali, and P. Kathkar, "Co-solvents transesterification of cotton seed oil into biodiesel: Effects of reaction conditions on quality of fatty acids methyl esters," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 84, pp. 640–648, Aug., 2014.

การค้นห่า่านการลือกของวงจรหารความถี่จ่านวนคี่ที่อาศัยวงจร ออสซิลเลเตอร์แบบฟ่อนคลายที่มีการอินเจ็คชั่นลือก

Determining Locked Ranges of Odd-number Frequency

Divider Based on Injection Locked Relaxation Oscillator

อารัมภ์ กิตติพงษ์วัฒนา¹ พูลศักดิ์ โกษิยาภรณ์² จิรสุดา โกษิยาภรณ์¹ ปราโมทย์ วาดเขียน¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการห่า่านการลือกของวงจรหารความถี่ที่อาศัยวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟ่อนคลายที่มีการอินเจ็คชั่นลือก โมเดลที่นำเสนอสามารถชี้ให้เห็นว่าอัตราการหารความถี่ที่เหมาะสมของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟ่อนคลายที่มีการอินเจ็คชั่นลือกเป็นจ่านวนคี่ ย่านการลือกของวงจรที่ได้มาจากโมเดลนี้ออกจากจะหาได้จากอิทธิพลของสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์แล้ว แต่ยังสามารถหาได้จากสัญญาณอินพุตไม่เป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์อีกด้วย โมเดลที่นำเสนอถูกพิสูจน์ด้วยการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟ่อนคลายซึ่งใช้เทคโนโลยี 0.35um CMOS ของ TSMC

คำสำคัญ : วงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟ่อนคลาย, วงจรหารความถี่, อินเจ็คชั่นลือกออสซิลเลเตอร์

Abstract

The mathematical model for determining locked ranges of frequency divider based on an injection locked relaxation oscillator (ILRO) is proposed. The proposed model can indicate that an appropriate frequency division ratio of the injection locked relaxation oscillator is an odd number. Locked ranges of the oscillator which are derived from the proposed model can not only be determined from the influence of a pure sinusoidal input signal but also from non-pure sinusoidal input signal. The verification of the proposed model is provided by using the simulation of the injection locked relaxation oscillator based on 0.35um CMOS of TSMC.

Keywords : Relaxation oscillator, Frequency divider, Injection locked oscillator (ILO)

1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรหารความถี่โดยอาศัยอินเจ็คชั่นลือกออสซิลเลเตอร์ (ILOs) ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นจ่านวนมาก

เช่น โครงข่ายกระจายสัญญาณนาฬิกา [1] วงจรกู้สัญญาณนาฬิกา [2] วงจรสังเคราะห์ความถี่ [3] และเครื่องรับส่ง FSK [4] เป็นต้น

เพื่อที่เราจะสามารถนำวงจรหารความถี่ที่อาศัย ILOs ไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราจะต้องทราบขั้นตอนการเลือกและอัตราการทำงานที่ถูกต้องของวงจร ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากนำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาขั้นตอนการเลือก กลุ่มแรก [5]-[6] เป็นโมเดลเชิงการวิเคราะห์ซึ่งถูกจำกัดไว้ที่วงจรออสซิลเลเตอร์ที่สามารถโมเดลได้ด้วยระบบป้อนกลับ ขณะที่อีกกลุ่มหนึ่ง [7]-[8] เป็นโมเดลเชิงเลขที่ได้อธิบายความไม่เป็นเชิงเส้นของออสซิลเลเตอร์ซึ่งส่งผลให้มีกระบวนการคำนวณที่มากและซับซ้อน นอกจากนี้โมเดลทั้งสองกลุ่มจะกำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนของการวิเคราะห์และเพื่อให้ขั้นตอนการเลือกสามารถเขียนในรูปสูตรทางคณิตศาสตร์ได้ แต่ในทางปฏิบัติพบว่าสัญญาณอินพุตอาจจะไม่ใช่สัญญาณไซน์ เช่น ในระบบดิจิทัล ดังนั้นการทราบอิทธิพลของสัญญาณดังกล่าวต่อขั้นตอนการเลือกจึงมีความสำคัญต่อการนำ ILOs ไปประยุกต์ใช้

ในปี 2013 วงจรหารความถี่ที่อาศัย ILRO [9] ได้ถูกนำเสนอ วงจรดังกล่าวมีวิสัยทัศน์กว้างกว่าวงจรหารความถี่ที่อาศัยวงจรออสซิลเลเตอร์ประเภทอื่น (ดังตารางที่ 5 ของ [5]) และมีอัตราการทำงานที่เพียงค่าเดียว เป็นที่น่าเสียดายว่าบทความดังกล่าวไม่ได้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการค้นหาขั้นตอนการเลือกที่ถูกต้อง นอกจากนี้โมเดลทั้งสองกลุ่มก็ไม่สามารถนำมาใช้หาขั้นตอนการเลือกให้ในรูปของสูตรทางคณิตศาสตร์สำหรับ ILRO ได้โดยง่าย ในบทความนี้โมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาขั้นตอนการเลือกและอัตราการทำงานที่ถูกต้องของ ILRO จะถูกนำเสนอ นอกจากนี้โมเดลที่นำเสนอจะถูกนำไปใช้คำนวณหาขั้นตอนการเลือกเมื่อสัญญาณอินพุตไม่ใช่สัญญาณไซน์ได้อีกด้วย

องค์ประกอบของบทความนี้ประกอบด้วย หลักการพื้นฐานของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟอนคลายในหัวข้อที่ 2 หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงพฤติกรรมทางกายภาพและปัจจัยการเลือกโมเดลสำหรับการค้นหาขั้นตอนการเลือกจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและการจำลองการทำงานจะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 5 และหัวข้อที่ 6 จะเป็นบทสรุปของงานวิจัย

2. วงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟอนคลาย

โดยทั่วไปโครงสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟอนคลายประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักดังรูปที่ 1 (โดยไม่มีแหล่งจ่ายกระแส $i_{in}(t)$) ส่วนแรกคือตัวเก็บประจุ ส่วนที่สองคือวงจร Charge Pump โดยที่ I_{CP} คือขนาดของกระแส ส่วนสุดท้ายคือวงจร Schmitt trigger ซึ่งมีระดับแรงดันขีดเปลี่ยนคือ $V_{th,L}$ และ $V_{th,H}$ คาบเวลาธรรมชาติของสัญญาณ (T_{nat}) ที่วงจรสร้างขึ้นซึ่งประกอบไปด้วยค่าเวลาการเก็บประจุ (τ_H) และคายประจุ (τ_L) สามารถเขียนคือ $T_{nat} = 2C\Delta V_{th}/I_{CP}$ และความถี่ธรรมชาติหาได้จาก $f_{nat} = 1/T_{nat}$

3. พฤติกรรมทางกายภาพและปัจจัยการเลือก

ด้วยกระบวนการผลิตสัญญาณของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟอนคลายซึ่งแบ่งออกเป็นขั้นตอนการเก็บและคายประจุของตัวเก็บประจุ ดังนั้นเพื่อที่จะผลิตสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ ค่าเวลา τ_H และ τ_L จะต้องเท่ากัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือขนาดของกระแสของวงจร Charge Pump ในช่วงการจ่าย ($+I_{CP}$) และการดึง ($-I_{CP}$) จะต้องเท่ากัน

จากกระบวนการข้างต้น เมื่อสัญญาณอินพุตปรากฏ วงจรจะพยายามทำการปรับคาบเวลาของสัญญาณเอาต์พุตให้สอดคล้องกับคาบเวลาของสัญญาณอินพุต พร้อมทั้งทำการปรับค่าเวลาเก็บและคายประจุให้เท่ากันเพื่อรักษาความถูกต้องของสัญญาณ และเมื่อสัญญาณอินพุตอยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสมวงจรจะเข้าสู่สภาวะล็อก เมื่อพิจารณามุมมองทางกายภาพดังรูปที่ 2 วงจรจะทำการล็อกสัญญาณอินพุต เมื่อค่าขนาดเฉลี่ยของสัญญาณอินพุตในช่วงเวลาการเก็บและคายประจุมีขนาดเท่ากันแต่ขั้วต่างกัน อิทธิพลของค่าขนาดเฉลี่ยนี้จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปสัญญาณ และคาบเวลาของสัญญาณอินพุต ตัวแปรเหล่านี้จะถูกพิจารณาในหัวข้อถัดไป

จากพฤติกรรมทางกายภาพข้างต้นทำให้เราทราบความสัมพันธ์ทางด้านเวลาในกรณีที่วงจรอยู่ในสภาวะล็อกคือ

$$\tau_{1,H} = \tau_{1,L} = T_1/2 \quad (1)$$

โดยที่ $\tau_{1,H}$ และ $\tau_{1,L}$ คือค่าเวลาการเก็บและคายประจุในสภาวะลือกตามลำดับ ขณะที่ T_1 คือคาบเวลาเอาต์พุตในสภาวะลือก ความสัมพันธ์ของค่าเวลาดังกล่าวสอดคล้องกับสภาวะปกติของวงจร นอกจากนี้ในรูปที่ 2 ยังพบอีกว่าเมื่อวงจรอยู่ในสภาวะลือก คาบเวลาของสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณอินพุตมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_1 = nT_{in} \quad (2)$$

โดยที่ T_{in} คือคาบเวลาสัญญาณอินพุต และ n คืออัตราส่วนการหารจำนวนเต็ม

4. ย่านการลือกของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟ่อนคลายที่มีการอินเจกชันลือก

ในบทความนี้สัญญาณอินพุตจะถูกพิจารณาให้อยู่ในรูปของอนุกรมฟูเรียร์และสามารถเขียนได้ดังนี้

$$i_{in}(t) = I_{in} \sum_{x=1}^{\infty} a_x \sin(x\omega_{in}t) \quad (3)$$

โดยที่ I_{in} คือขนาด ω_{in} คือความถี่ x คือดัชนี a_x คือสัมประสิทธิ์ของแต่ละ x ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์หนึ่งความถี่จะพบว่า $x=1$ และ $a_1=1$ ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม องค์ประกอบของสัญญาณจะมีเฉพาะฮาร์โมนิกคี่เท่านั้น (x_{Odd}) และสัมประสิทธิ์จะมีค่าเป็น

$$a_{x_{Odd}} = 8/(\pi x_{Odd})^2 \quad (4)$$

เช่นกันถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม องค์ประกอบของสัญญาณจะมีเฉพาะฮาร์โมนิกคี่และสัมประสิทธิ์จะมีค่าเป็น

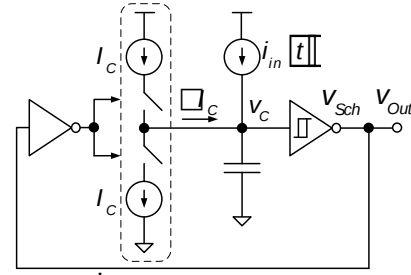
$$a_{x_{Odd}} = 4/(\pi x_{Odd}) \quad (5)$$

สมการสำหรับการหาค่าเวลาในการเก็บประจุสามารถถูกเขียนได้ดังนี้

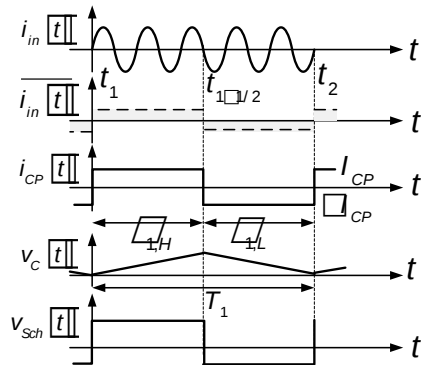
$$\int_{v_C(t_1)}^{v_C(t_{1+1/2})} dv_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_{1+1/2}} [I_{CP} + i_{in}(t + t_{d,1})] dt \quad (6)$$

โดยที่ $t_{d,1}$ คือเวลาหน่วง ด้วยการกำหนดให้ $t_1 = 0$, $t_{1+1/2} = \tau_{1,H}$, $v_C(t_1) = V_{th,L}$ และ $v_C(t_{1+1/2}) = V_{th,H}$ ผลต่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุคือ

$$\Delta V_{th} = I_{CP}\tau_{1,H}/C - \frac{I_{in}}{C\omega_{in}} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \left[\cos(x\omega_{in}(\tau_{1,H} + t_{d,1})) - \cos(x\omega_{in}t_{d,1}) \right] \quad (7)$$



รูปที่ 1 โครงสร้างของวงจร ILRO



รูปที่ 2 ลักษณะสัญญาณอินพุตที่ส่งผลให้ระบบทำการลือกและสัญญาณอื่นๆของ ILRO

ทำการจัดรูปสมการเพื่อหาค่าเวลาการเก็บประจุจะได้

$$\tau_{1,H} = \frac{T_{nat}}{2} + \frac{\alpha}{\omega_{in}} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \left[\cos(x\omega_{in}(\tau_{1,H} + t_{d,1})) - \cos(x\omega_{in}t_{d,1}) \right] \quad (8)$$

โดยที่ $\alpha = I_{in}/I_{CP}$ ในกรณีของค่าเวลาการคายประจุสามารถหาได้จาก

$$\int_{v_C(t_{1+1/2})}^{v_C(t_2)} dv_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_{1+1/2}}^{t_2} [-I_{CP} + i_{in}(t + t_{d,1})] dt \quad (9)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าผลต่างของตัวเก็บประจุคือ

$$-\Delta V_{th} = -I_{CP}\tau_{1,L}/C - \frac{I_{in}}{C\omega_{in}} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \left[\cos(x\omega_{in}(T_1 + t_{d,1})) - \cos(x\omega_{in}(\tau_{1,H} + t_{d,1})) \right] \quad (10)$$

โดยกำหนดให้ $t_2 = T_1$, $v_C(t_2) = V_{th,L}$ และ $v_C(t_{1+1/2}) = V_{th,H}$ หลังจากการจัดรูปสมการ ค่าเวลาการคายประจุจะได้

$$\tau_{1,L} = T_{nat}/2 + \frac{\alpha}{\omega_{in}} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \left[-\cos(x\omega_{in}(T_1 + t_{d,1})) + \cos(x\omega_{in}(\tau_{1,H} + t_{d,1})) \right] \quad (11)$$

จากความสัมพันธ์ $T_1 = \tau_{1,H} + \tau_{1,L}$ และจากสมการที่ (8) และ (11) จะได้

$$T_1 = T_{nat} + \frac{\alpha}{\omega_{in}} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \begin{bmatrix} -\cos(x\omega_{in}(T_1 + t_{d,1})) \\ +2\cos(x\omega_{in}(\tau_{1,H} + t_{d,1})) \\ -\cos(x\omega_{in}t_{d,m}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3 ภายหลังจากการแทนสมการที่ (1) และ (2) ลงในสมการที่ (12) มันจะกลายเป็น

$$nT_{in} = T_{nat} + \frac{\alpha}{\omega_{in}} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{a_x}{x} \begin{bmatrix} -\cos(xn2\pi + x\omega_{in}t_{d,1}) \\ +2\cos(xn\pi + x\omega_{in}t_{d,1}) \\ -\cos(x\omega_{in}t_{d,1}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

จากองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณอินพุตซึ่งมีเฉพาะฮาร์โมนิกที่เท่ากัน และความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ สมการที่ (13) จะกลายเป็น

$$nT_{in} = T_{nat} - \frac{4\alpha}{\omega_{in}} \sum_{x_{Odd}=1}^{\infty} \frac{a_{x_{Odd}}}{x_{Odd}} \sin^2\left(\frac{x_{Odd}n\pi}{2}\right) \cos(x_{Odd}\omega_{in}t_{d,1}) \quad (14)$$

ในกรณีที่ n เป็นจำนวนคู่จะพบว่า $\sin^2(x_{Odd}n_{Even}\pi/2) = 0$ และสมการที่ (14) จะกลายเป็น

$$n_{Even}T_{in} = T_{nat} \quad (15)$$

สมการนี้ชี้ให้เห็นว่าในกรณีที่ ILRO จะทำการล็อกเฉพาะที่ความถี่ $f_{in} = n_{Even}f_{nat}$ นอกจากนี้มันยังได้แสดงให้เห็นว่าวงจรหารความถี่โดยอาศัย ILRO ไม่เหมาะสมจะทำการหารด้วยอัตราจำนวนคู่

ในกรณีที่ n เป็นจำนวนคี่จะพบว่า $\sin^2(x_{Odd}n_{Odd}\pi/2) = 1$ และสมการที่ (14) จะกลายเป็น

$$\sum_{x_{Odd}=1}^{\infty} \frac{a_{x_{Odd}}}{x_{Odd}} \cos(x_{Odd}\omega_{in}t_{d,1}) = \frac{T_{nat} - n_{Odd}T_{in}}{4\alpha/\omega_{in}} \quad (16)$$

จากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติจะพบว่าเทอมทางฝั่งซ้ายของสมการจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\omega_{in}t_{d,1} = 0$ หรือ 2π และจะมีค่าต่ำสุดเมื่อ $\omega_{in}t_{d,1} = \pi$ ดังนั้นสมการที่ (16) จะเขียนได้เป็น

$$-K \leq (T_{nat} - n_{Odd}T_{in})/(4\alpha/\omega_{in}) \leq K \quad (17)$$

โดยที่ $K = \sum_{x_{Odd}=1}^{\infty} \frac{a_{x_{Odd}}}{x_{Odd}}$ ภายหลังจากการจัดรูปสมการสมการย่านการล็อกของวงจรที่มีอัตราหารจำนวนคี่จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (18)

$$(n_{Odd}f_{nat} - \Delta f) \leq f_{in} \leq (n_{Odd}f_{nat} + \Delta f) \quad (18)$$

โดยที่ $\Delta f = f_{nat}2\alpha K/\pi$ จากสมการได้แสดงให้เห็นว่าย่านการล็อกของแต่ละ n_{Odd} จะเท่ากัน ด้วยผลลัพธ์ที่ได้

ILRO เหมาะสมที่จะเป็นวงจรหารความถี่จำนวนคี่ จากสมการที่ (15) และ (18) ย่านการล็อกของวงจรหารความถี่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยที่แกนตั้งและแกนนอนเป็นขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุตตามลำดับ

ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์มันถูกพบว่า $K = \pi/2$ ดังนั้นความกว้างของย่านการล็อกจะเป็น

$$2\Delta f = 2f_{nat}(2\alpha/\pi) \quad (19)$$

ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมความกว้างของย่านการล็อกจะเป็น

$$2\Delta f = 2f_{nat}((16\alpha/\pi^3)(1.0518)) \quad (20)$$

และถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความกว้างของย่านการล็อกจะเป็น

$$2\Delta f = 2(f_{nat}\alpha) \quad (21)$$

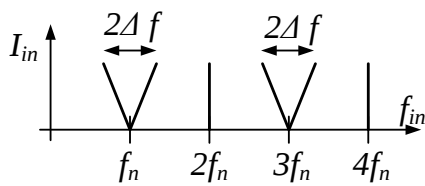
จากสมการที่ (19) ถึง (21) แสดงให้เห็นว่าย่านการล็อกแปรผันตรงกับขนาดของสัญญาณอินพุตและผลรวมสัมประสิทธิ์ (K) และย่านการล็อกจะกว้างมากที่สุดเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม และกว้างน้อยที่สุดเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม

5. ผลการจำลองการทำงาน

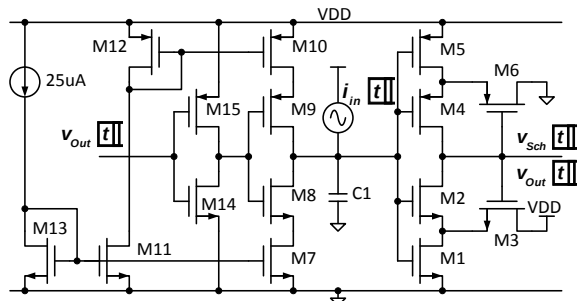
เพื่อทำการพิสูจน์หลักการที่นำเสนอวงจรออสซิลเลเตอร์แบบฟอนคลายจะถูกออกแบบโดยใช้เทคโนโลยี 0.35um CMOS ของ TSMC โครงสร้างของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 และขนาดของ MOS สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1. วงจร Schmitt trigger มีแรงดันขีดผ่านด้านสูงและด้านต่ำคือ 2.75V และ 0.65V วงจร Charge-pump มีขนาดกระแส 25uA ตัวเก็บประจุมีค่า 1pF และแหล่งจ่ายกำลังมีค่า 3.3V ในสภาวะปราศจากสัญญาณภายนอกวงจรผลิตสัญญาณที่มีความถี่ 5.4MHz ซึ่งความถี่นี้อยู่ในย่าน 60-meter และเป็นความถี่ที่ใช้ควบคุม Switching regulator ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5

เนื่องจาก ILRO เหมาะสมเป็นวงจรหารความถี่จำนวนคี่ ดังนั้นเพื่อให้กระชับต่อการนำเสนอ การจำลองการทำงานและการคำนวณจะถูกนำเสนอเฉพาะในกรณีที่อัตราหารเป็นคี่เท่านั้นซึ่งคือ 3 และ 5 รูปที่ 6 และ 7 คือผลการหารความถี่ด้วย 3 เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีขนาด 3uA

ตามลำดับ รูปที่ 8 คือผลการหารความถี่ด้วย 5 เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 3uA



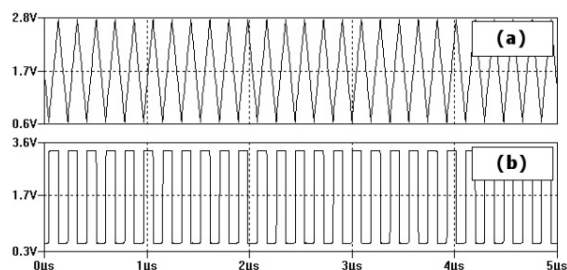
รูปที่ 3 ข่ายการลือกของวงจรหารความถี่ที่อาศัย ILRO



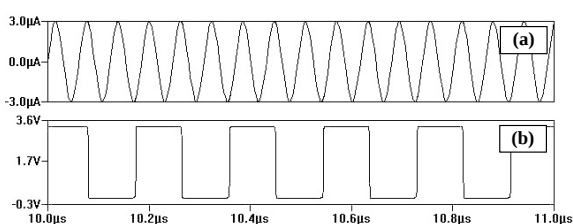
รูปที่ 4 โครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบพอนคลาย

ตารางที่ 1. ขนาดของอุปกรณ์

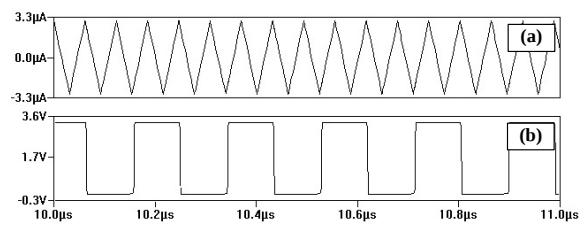
Device names	W(um)/L(um)	Device names	W(um)/L(um)
M1, 2, 7, 8, 11, 13, 14	4.2/0.7	M4, 5, 9, 10, 12, 15	14/0.7
M3	25/0.7	M6	70/0.7



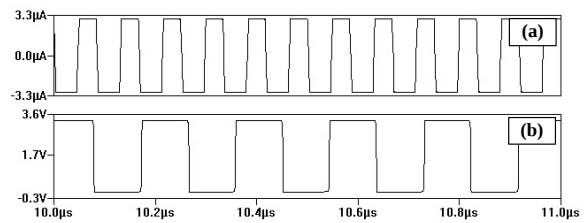
รูปที่ 5 สัญญาณของวงจรในสภาวะปราศจากสัญญาณอินพุต โดยที่ (a) คือ $v_C(t)$ และ (b) คือ $v_{Sch}(t)$



รูปที่ 6 ผลการหารความถี่ด้วย 3 โดยที่ (a) คือ $i_{in}(t)$ เป็นสัญญาณไซน์ ($f_{in} = 16.2\text{MHz}$) และ (b) คือ $v_{Sch}(t)$



รูปที่ 7 ผลการหารความถี่ด้วย 3 โดยที่ (a) คือ $i_{in}(t)$ เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ($f_{in} = 16.2\text{MHz}$) และ (b) คือ $v_{Sch}(t)$

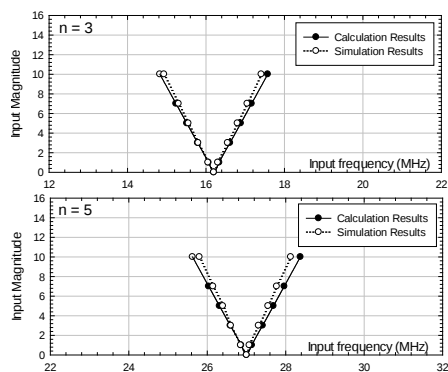
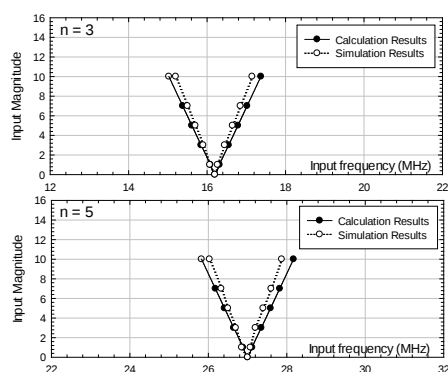
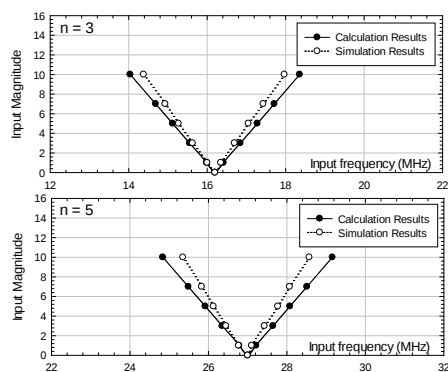


รูปที่ 8 ผลการหารความถี่ด้วย 5 โดยที่ (a) คือ $i_{in}(t)$ เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ($f_{in} = 27\text{MHz}$) และ (b) คือ $v_{Sch}(t)$

รูปที่ 9 ถึง 11 คือข่ายการลือกที่ได้จากการจำลองการทำงานเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นไซน์ สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม ตามลำดับ โดยที่แกนตั้งและแกนนอนเป็นขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุต จากรูปพบว่าข่ายการลือกของทั้งสามกรณีแปรผันตรงกับขนาดของสัญญาณอินพุต ดังที่ถูกแสดงไว้ในสมการที่ (19) ถึง (21) ทุกอัตราการหารข่ายการลือกจะกว้างมากที่สุดเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม และแคบที่สุดเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม นอกจากนี้จะเห็นว่าข่ายการลือกที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองอีกด้วย

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับการค้นการข่ายการลือกซึ่งอยู่ในรูปสูตรทางคณิตศาสตร์ของวงจรหารความถี่ที่อาศัย ILRO หลักการที่นำเสนอได้แสดงให้เห็นว่า ILRO เหมาะสมกับการเป็นวงจรหารความถี่จำนวนคี่และแสดงให้เห็นว่านอกจากความกว้างของข่ายการลือกขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณอินพุต มันยังขึ้นอยู่กับอีกรูปร่างของสัญญาณอินพุตซึ่งหาได้จากผลรวมของสัมประสิทธิ์ของสัญญาณ พร้อมกันนั้นผลการคำนวณข่ายการลือกมีค่าใกล้เคียงกับข่ายการลือกที่ได้จากการจำลองการทำงาน

รูปที่ 9 ข่ายการล็อกเมื่อ $i_{in}(t)$ เป็นสัญญาณไซน์รูปที่ 10 ข่ายการล็อกเมื่อ $i_{in}(t)$ เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมรูปที่ 11 ข่ายการล็อกเมื่อ $i_{in}(t)$ เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม

7. กิตติกรรมประกาศ

Financial support from the Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (Grant No. PHD/0014/2553) to Arum Kitipongwatana and Paramote Wardkein are acknowledged.

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Zhang, B. Ciftcioglu, M. Huang, and H. Wu, "Injection-Locked Clocking: A New GHz Clock

- Distribution Scheme," IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2006
- [2] S. Jafarbeiki, K. Hajsadeghi and N. Modir, "A 20 Gb/s Injection-Locked Clock and Data Recovery Circuit," International Journal of VLSI design & Communication Systems, Vol. 5, No.4, Aug. 2014
- [3] H. R. Rategh, H. Samavati, and T. H. Lee, "A CMOS Frequency Synthesizer with an Injection-Locked Frequency Divider for a 5-GHz Wireless LAN Receiver," IEEE Journal on Solid-State Circuits, Vol. 35, No. 5, May, 2000
- [4] J. Bae and H. J. Yoo, "A Low Energy Injection-Locked FSK Transceiver with Frequency-to-Amplitude Conversion for Body Sensor Applications," Symposium on VLSI Circuits/Technical Digest of Technical Papers, 2010
- [5] K. Zhu, S. K. Islam, M. Roknsharifi, Md. S. Hasan and I. Mahub, "A Divide-by-3 0.4–1.4 GHz Injection-Locked Frequency Divider Based on Relaxation Oscillator" IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 23, Jul. 2013
- [6] B. Razavi, "A Study of injection locking and pulling in oscillators," IEEE J. Solid-State Circuits, 2004
- [7] I. Ali, A. Banerjee, A. Mukherjee, and B. N. Biswas, "Study of Injection Locking with Amplitude Perturbation and its Effect on Pulling of Oscillator," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. 59, No. 1, Jan. 2012
- [8] P. Maffezzoni, "Analysis of Oscillator Injection Locking through Phase-Domain Impulse-Response," IEEE Trans. Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2008
- [9] P. Maffezzoni, "Computing the Synchronization Regions of Injection-Locked Strongly Nonlinear Oscillators for Frequency Division Applications," IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 29, No. 12, Dec 2010

การพัฒนาการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะ สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

Development of a Carrier-Based PWM for Three-Level Inverters

ไพบุลย์ เกียรติสุขคนธา¹ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์²

¹ ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ บทความได้ขยายทฤษฎีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ที่ใช้มุมมองการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์มาพัฒนาใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับ นอกจากนั้นยังได้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับ เมื่อประยุกต์ใช้แรงดันลำดับศูนย์ในทำนองเดียวกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตที่ได้พัฒนาสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมในเชิงการแปลงแรงดันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการกับแรงดันอ้างอิงได้โดยตรงในลักษณะเดียวกับการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สองระดับ

คำสำคัญ : อินเวอร์เตอร์สองระดับ, อินเวอร์เตอร์สามระดับ, การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ, การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

Abstract

This paper presents development of a carrier-based PWM for three-level inverters. In this paper, the theory of a carrier-based PWM of two-level inverters, as viewpoint of the reference voltages which are the command output voltages and the addition of zero voltage, is considered for three-level inverters. Moreover, the modulation pattern of three-level inverters is also shown that zero voltage had been applying in the same way of the space-vector modulation of two-level inverters. The research results reveal that the developed PWM can be shown the behavior of voltage conversion and straightforward to the relationship between command output voltages and reference voltages.

Keywords : Two-level inverters, Three-level inverters, Carrier-based modulation, Space-vector modulation

1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์สองระดับเป็นคอนเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม การสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ นิยมใช้วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) เนื่องจากสามารถสร้างแรงดันด้านออก ณ ขณะหนึ่ง และยังให้ดัชนีการมอดูเลตมีค่าสูงสุดอีกด้วย อย่างไรก็ตามงานวิจัย[1][2]ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ด้วยการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมทำให้การมอดูเลตทำได้โดยง่ายและใช้การคำนวณน้อยลง นอกจากนี้ยังเห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ต้องการสร้างกับแรงดันอ้างอิงได้โดยตรง

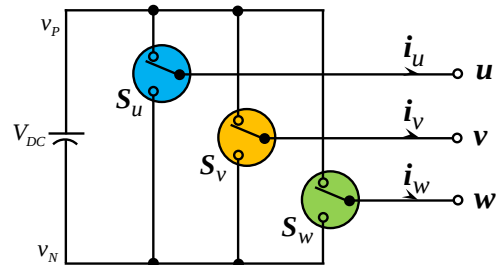
อินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สองระดับที่ไม่สามารถทนแรงดันสูงๆได้ แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งครึ่งแรงดันบัสไฟตรง ทำให้ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีแรงดันตกคร่อมเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเท่านั้น นอกจากนี้ในกรณีที่ขนาดแรงดันด้านเข้าเท่ากับอินเวอร์เตอร์สามระดับ จะมีความผิดเพี้ยนของแรงดันด้านออกน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับ อย่างไรก็ตามการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับไม่สามารถใช้การมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สองระดับได้โดยตรง ดังนั้นงานวิจัย[3][4]ได้พัฒนาการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ โดยขยายแนวคิดจากการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับ แต่วิธีการมอดูเลตดังกล่าวยังมีความซับซ้อนและใช้การคำนวณค่อนข้างมาก รวมทั้งไม่เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ต้องการสร้างกับแรงดันอ้างอิงได้โดยตรง

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ โดยมีประเด็นหลักที่จะนำเสนอ ดังนี้

- ขยายทฤษฎีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ที่ใช้การคำนวณน้อยและใช้มุมมองการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์มาพัฒนาใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

- แสดงการประยุกต์ใช้แรงดันลำดับศูนย์ในการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับกับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

2. การมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ



รูปที่ 1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สองระดับ

2.1 โครงสร้างและรูปสมการทั่วไปของอินเวอร์เตอร์สองระดับ

อินเวอร์เตอร์สองระดับมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกได้ดังสมการที่ (1) - (2)

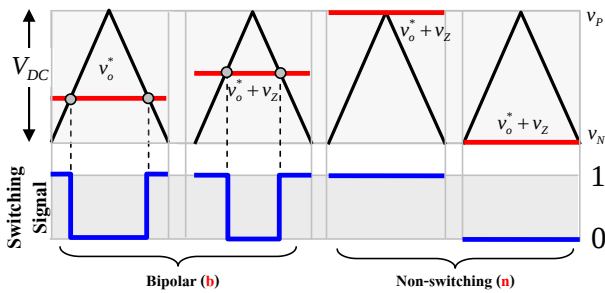
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* + v_z \\ v^* + v_z \\ w^* + v_z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \\ m_{31} & m_{32} \end{bmatrix}}_{M_{3 \times 2}} \begin{bmatrix} v_P \\ v_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$0 \leq m_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^2 m_{ij} = 1, i = \{1, 2, 3\}, j = \{1, 2\} \quad (2)$$

ในที่นี้ v_P, v_N คือแรงดันบัสไฟตรงด้านเข้าค่าบวกและค่าลบ ตามลำดับ u^*, v^*, w^* คือแรงดันด้านออกคำสั่ง m_{ij} คือฟังก์ชันการมอดูเลตและ v_z คือแรงดันลำดับศูนย์

2.2 การสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะ

การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอินเวอร์เตอร์สองระดับ การมอดูเลตแบบนี้จะสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์โดยอาศัยสัญญาณอ้างอิงเปรียบเทียบกับรูปคลื่นพาหะสามเหลี่ยม โดยทั่วไปรูปคลื่นพาหะและสัญญาณอ้างอิงมักจะมีขนาดหนึ่งหน่วย แต่ในบทความนี้รูปคลื่นพาหะที่ใช้ในการอธิบายแนวคิดการมอดูเลตจะมีค่าสูงสุดและต่ำสุดตามค่าแรงดันด้านเข้าหรือแรงดันบัสไฟตรง โดยสัญญาณอ้างอิงจะมีค่าเท่ากับแรงดันด้านออกที่ต้องการสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2



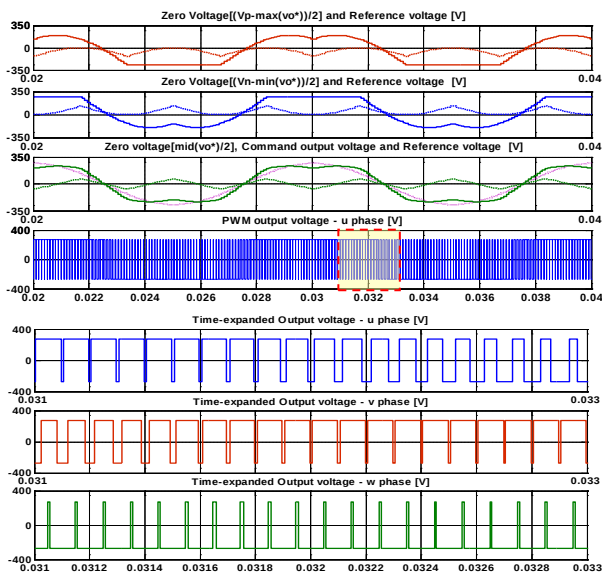
รูปที่ 2 การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ

รูปที่ 2 แสดงการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับ จะเห็นได้ว่ากรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับ จะให้รูปแบบการมอดูเลตที่เป็นไปได้เพียง 2 รูปแบบเท่านั้น คือแบบไม่สวิตช์ (non-switching) และแบบสองขั้ว (bipolar)

2.3 การบวกแรงดันลำดับศูนย์สำหรับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

การมอดูเลตที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับคือการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ ดังนั้นในที่นี้จะเลือกแรงดันลำดับศูนย์ v_z ที่ให้รูปแบบการสวิตช์เหมือนกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ซึ่งจะได้ตามสมการที่ (4) และสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 3

$$v_z = \frac{[v_p - \max(u^*, v^*, w^*)]}{2} + \frac{[v_N - \min(u^*, v^*, w^*)]}{2} = \frac{\text{mid}(u^*, v^*, w^*)}{2} \quad (4)$$



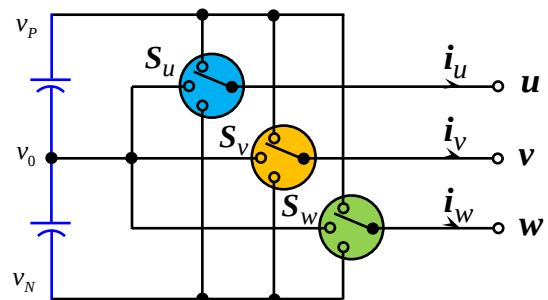
รูปที่ 3 รูปคลื่นการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับที่สมมูลกับวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์

รูปที่ 3 แสดงรูปคลื่นของปริมาณต่างๆ ในการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการบวกแรงดันลำดับศูนย์ตามสมการที่ (4) ในการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ จะให้รูปแบบการสวิตช์เหมือนกับวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แต่วิธีการมอดูเลตแบบนี้จะไม่ซับซ้อนและใช้การคำนวณน้อยกว่า

3. การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

3.1 โครงสร้างและรูปสมการทั่วไปของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

อินเวอร์เตอร์สามระดับแบบครึ่งจุดนิวทริลมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ 9 ตัว ทำหน้าที่สร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการ แรงดันไฟตรงสามระดับด้านเข้าจะได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งครึ่งแรงดันบัสไฟตรง



รูปที่ 4 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบครึ่งจุดนิวทริล

จากรูปที่ 4 จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกกับด้านเข้าในรูปของเมทริกซ์การมอดูเลตดังสมการที่ (5)

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* + v_z \\ v^* + v_z \\ w^* + v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_0 \\ v_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$0 \leq m_{ij} \leq 1, \quad \sum_{j=1}^3 m_{ij} = 1, \quad i = \{1, 2, 3\}, \quad j = \{1, 2, 3\} \quad (6)$$

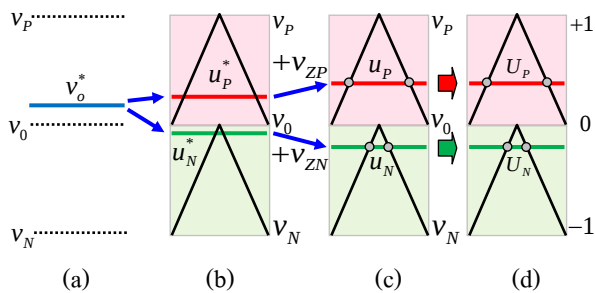
3.2 แนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งบนฐานคลื่นพาหะแบบขั้วคู่สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าสวิตช์ในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะมี 3 ตัว ซึ่งแตกต่างจากกรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับที่มีเพียง 2 ตัว ดังนั้นการมอดูเลตในกรณีนี้คลื่นพาหะและแรงดันอ้างอิงที่นำมาเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์จึงต้องมีสองชุด ซึ่งเราจะเรียกลักษณะอย่างนี้ว่า “การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบขั้วคู่” [5]

ดังแสดงในรูปที่ 5 การมอดูเลตแบบนี้มักถูกมองเป็นแค่เทคนิคในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์เท่านั้น จึงไม่สามารถมองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการกับสัญญาณอ้างอิงได้โดยตรง ดังนั้นหากเราขยายแนวคิดการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับที่ใช้มุมมองการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์มาพัฒนาใช้กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบขาของอินเวอร์เตอร์สามระดับ จะทำให้สามารถมองเห็นพฤติกรรมในเชิงการสร้างแรงดันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการ v_o^* กับสัญญาณอ้างอิง U_p, U_n ได้โดยตรง ค่าแรงดันอ้างอิง u_p, u_n และค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_{zp}, v_{zn} จะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (7)

$$u_p = u_p^* + v_{zp}, \quad u_n = u_n^* + v_{zn} \quad (7)$$

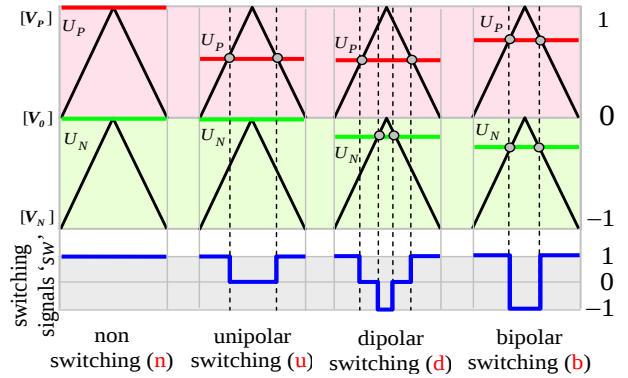
โดยที่ $v_o^* = u_p^* + u_n^*$ และ $v_z = v_{zp} + v_{zn}$



รูปที่ 5 แนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันด้านออกคำสั่งในการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบขา

รูปที่ 5 แสดงการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบขาสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับซึ่งสามารถอธิบายแนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งได้ดังนี้ แรงดันด้านออกคำสั่ง v_o^* ตามรูปที่ 5(a) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือแรงดันคำสั่งบวก u_p^* ซึ่งสร้างจากบัสบวกและแรงดันคำสั่งลบ u_n^* ซึ่งสร้างจากบัสลบ ดังแสดงในรูปที่ 5(b) เมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์ v_{zp} กับแรงดันคำสั่งบวก u_p^* จะทำให้แรงดันอ้างอิง u_p เลื่อนขึ้นหรือลงอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ในทำนองเดียวกันแรงดันคำสั่งลบ u_n^* เมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์ v_{zn} ที่เหมาะสมจะทำให้แรงดันอ้างอิง u_n เลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการเช่นเดียวกัน การบวก v_{zp}, v_{zn} ตามรูปที่ 5(c) จะมีอิสระต่อกัน และเมื่อนำแรงดันอ้างอิง u_p และ u_n ในรูปที่ 5(c)

มาทำเป็นค่าปกติ (normalized) จะได้สัญญาณอ้างอิง U_p, U_n ที่ใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาหะแบบขาของอินเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 5(d) การเลื่อน U_p, U_n ไปยังตำแหน่งต่างๆ จะได้รูปแบบการมอดูเลตแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปแบบการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

รูปที่ 6 แสดงรูปแบบการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบขาของอินเวอร์เตอร์สามระดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_{zp}, v_{zn} ต่างกันจะทำให้ได้รูปแบบการมอดูเลตแตกต่างกัน 4 รูปแบบคือ แบบไม่สวิตช์ (Non-Switching) แบบขาเดียว (Unipolar Switching) แบบขาคู่ (Dipolar Switching) และแบบสองขา (Bipolar Switching)

3.3 การประยุกต์ใช้แรงดันลำดับศูนย์สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

รูปสมการทั่วไปของการมอดูเลต $\mathbf{M}$ สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับในสมการที่ (5) หากแยกเทอมของฟังก์ชันการมอดูเลตแรงดันลำดับศูนย์ออกจากฟังก์ชันการมอดูเลตจะได้

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}' + \mathbf{M}_0 = [\mathbf{m}'_{ij}] + \mathbf{M}_0 \quad (8)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{M}' = \frac{1}{v_p^2 + v_0^2 + v_n^2} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_0 \\ v_n \end{bmatrix}^T \text{ และ } \mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ X & Y & Z \\ X & Y & Z \end{bmatrix}$$

เมื่อนำรูปสมการทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}$ จากสมการที่ (8) แทนในสมการที่ (5) และนำแรงดันด้านออกและด้านเข้าเทียบกับจุดกึ่งกลางบัสจะได้

$$\begin{bmatrix} u - v_0 \\ v - v_0 \\ w - v_0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m'_{11} + X \\ m'_{21} + X \\ m'_{31} + X \end{bmatrix}}_{u_p} (v_p - v_0) + \underbrace{\begin{bmatrix} m'_{13} + Z \\ m'_{23} + Z \\ m'_{33} + Z \end{bmatrix}}_{u_n} (v_n - v_0) \quad (9)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} m'_{11} \\ m'_{21} \\ m'_{31} \end{bmatrix} = \frac{v_P}{\sqrt{v_P^2 + v_0^2 + v_N^2}} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} m'_{13} \\ m'_{23} \\ m'_{33} \end{bmatrix} = \frac{v_N}{\sqrt{v_P^2 + v_0^2 + v_N^2}} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix}$$

และแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP}, v_{ZN} ในสมการที่ (7) หาได้จาก

$$v_{ZP} = X[v_P - v_0], \quad v_{ZN} = Z[v_N - v_0] \quad (10)$$

ในที่นี้จะเลือกค่า x, z น้อยที่สุดที่ทำให้เงื่อนไข $0 \leq m_{ij} \leq 1$ เป็นจริง ซึ่งจะได้ตามสมการที่ (11) และสามารถแสดงตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง $\mathbf{M}$ ได้ดังรูปที่ 7

$$X = -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}), \quad Z = -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \quad (11)$$

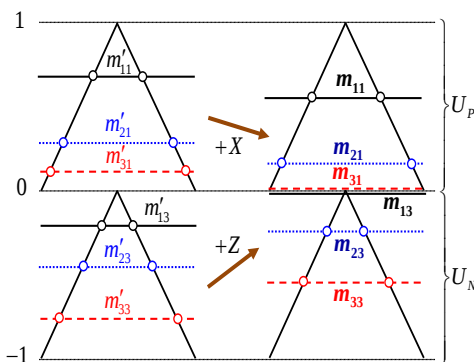
เมื่อนำสมการที่ (11) แทนในสมการที่ (10) จะได้แรงดันลำดับศูนย์

$$\left. \begin{aligned} v_{ZP} &= -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31})(v_P - v_0) \\ &= \frac{-v_P}{\|v_i\|^2} \min[v_o^*](v_P - v_0) \\ &= -\frac{1}{2} \min[v_o^*]; (\text{if } v_0 = 0, v_P = v_N) \end{aligned} \right\} \quad (12.1)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{ZN} &= -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33})(v_N - v_0) \\ &= \frac{-v_N}{\|v_i\|^2} \max[v_o^*](v_N - v_0) \\ &= -\frac{1}{2} \max[v_o^*]; (\text{if } v_0 = 0, v_P = v_N) \end{aligned} \right\} \quad (12.2)$$

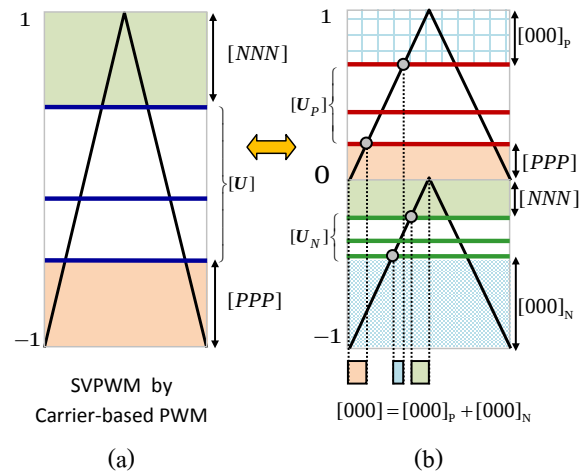
และผลรวมของแรงดันลำดับศูนย์

$$v_Z = v_{ZP} + v_{ZN} = \frac{1}{2} \text{mid}(u^*, v^*, w^*) \quad (13)$$



รูปที่ 7 ตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิงเมื่อเลือกค่า x, z น้อยที่สุด

จากสมการที่ (13) จะเห็นว่าผลรวมแรงดันลำดับศูนย์ v_Z จะเหมือนกับสมการที่ (4) ของอินเวอร์เตอร์สองระดับและหากนำแรงดันอ้างอิง u_P, u_N ของอินเวอร์เตอร์สามระดับมารวมกันจะได้แรงดันอ้างอิงเหมือนกับกรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเลือกค่า x, z น้อยที่สุดตามสมการที่(11) จะทำให้ผลรวมของแรงดันลำดับศูนย์เหมือนกับกรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับ



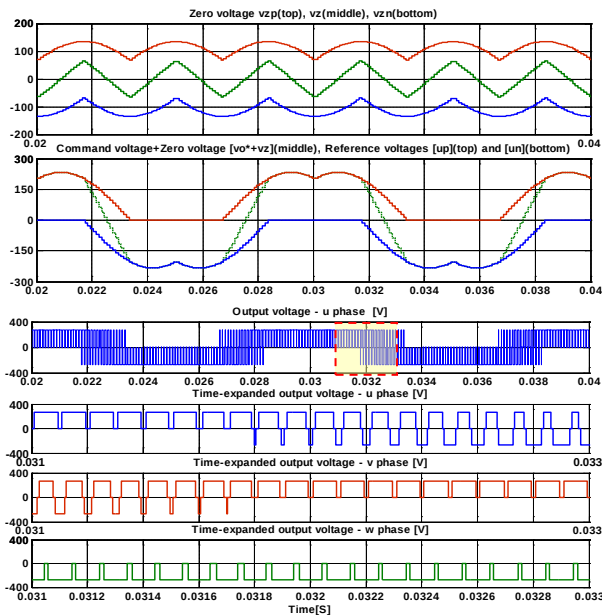
รูปที่ 8 การใช้เวกเตอร์ศูนย์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับและสามระดับบนมุมมองของการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ

รูปที่ 8 แสดงการใช้เวกเตอร์ศูนย์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับและสามระดับบนมุมมองของการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ จากแนวคิดการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับหากพิจารณาตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง $[U]$ ดังแสดงในรูปที่ 8(a) จะพบว่าเป็นกรณีที่ใช้เวกเตอร์ศูนย์ “PPP” และ “NNN” เท่านั้น ส่วนในกรณีของอินเวอร์เตอร์สามระดับตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง $[U_P], [U_N]$ ที่สอดคล้องกับการใช้เวกเตอร์ศูนย์ “PPP” “000” และ “NNN” สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8(b) และหากพิจารณาการมอดูเลตในรูปที่ 7 จะพบว่าเป็นกรณีที่ใช้เวกเตอร์ศูนย์ “000” เท่านั้น

3.4 ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 9 แสดงผลการจำลองการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับ บนสุดคือแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP}, v_Z และ v_{ZN} ตามลำดับ ถัดมาคือแรงดันอ้างอิง u_P, u_N และ u ที่ขั้วสุดท้ายคือแรงดันด้านออก เมื่อพิจารณาในส่วนขยายสเกลเวลาในรูปที่ 3

และ 8 จะเห็นได้ว่าในกรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับจะได้รูปแบบการมอดูเลตแบบสองชั่วทั้งสามเฟส<3b> แต่ในกรณีของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะได้การมอดูเลตเป็นแบบชั่วเดียว 2 เฟสและแบบชั่วคู่ 1 เฟส <2u1d> [6] อย่างไรก็ตาม รูปแบบการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับสามารถสร้างได้อีกหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP}, v_{ZN}

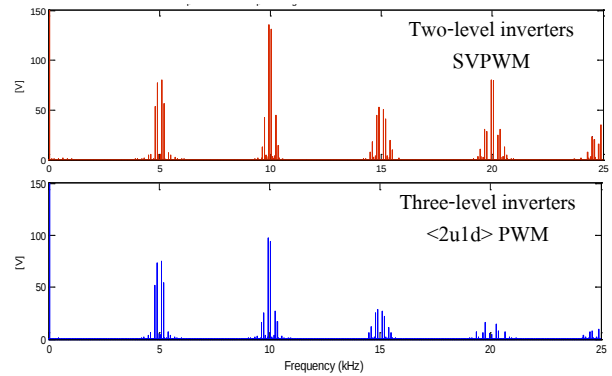


รูปที่ 8 รูปคลื่นการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบชั่วคู่ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ

	อินเวอร์เตอร์	
	สองระดับ	สามระดับ
แรงดันอ้างอิง	u	u_p, u_n
แรงดันลำดับศูนย์	v_z	v_{ZP}, v_{ZN}
คลื่นพาหะ	1 ชั่ว	2 ชั่ว
รูปแบบการมอดูเลตที่เป็นไปได้	<1n2b> และ <3b>	<2u1d>, <1n2d>, <1u1b1d>, <3d>, ฯลฯ
จำนวนครั้งการสวิตช์	4, 6 ครั้ง	8, 12 ครั้ง

จากแนวคิดที่ได้พัฒนาการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับมาเป็นการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบชั่วคู่สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับสามารถแสดงการเปรียบเทียบทั้งสองกรณีได้ดังตารางที่ 1 และสามารถแสดงสเปกตรัมแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สองระดับและสามระดับได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 สเปกตรัมของแรงดันด้านออกสำหรับการมอดูเลตแบบ<3b> และ <2u1d> ที่ดัชนีการมอดูเลต $q=0.8$

4. สรุป

บทความนี้ได้พัฒนาการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ โดยขยายแนวคิดการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ที่ใช้มุมมองการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์มาใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับ นอกจากนั้นยังได้แสดงการประยุกต์ใช้แรงดันลำดับศูนย์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับมาใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับด้วย ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแนวคิดที่นำเสนอสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมในเชิงการแปลงแรงดันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการกับแรงดันอ้างอิงได้โดยตรงในลักษณะเดียวกันกับอินเวอร์เตอร์สองระดับ และที่สำคัญแนวคิดนี้ยังสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดใช้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้อีกด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Blasko, "Analysis of a hybrid PWM based on modified space-vector and triangle-comparison method," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, pp. 756-764, May/June, 1997.
- [2] K. Zhou and D. Wang, "Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier based PWM: A comprehensive analysis," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 1, pp. 186-196, Feb. 2002.
- [3] N. Celanovic and D. Boroyevich, "A comprehensive study of neutral point voltage balancing problem in three level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, pp. 242-249, Mar. 2000.
- [4] S. B. Monge, et al., "Capacitor voltage balance for the neutral point clamped converter using the virtual space vector concept with optimized spectral performance," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135, July. 2007.
- [5] B. Velaerts, et al., "A novel approach to the generation and optimization of three-level PWM waveforms for three-level inverters," in Proc. of PESC, vol. 2, pp. 1255-1262, April. 1988.
- [6] A. Saengseethong and S. Sangwongwanich, "A new modulation strategy for capacitor voltage balancing in three-level NPC inverters based on matrix converter theory," in Proc. of IPEC-Sapporo, pp. 2358-2365, June. 2010.

การประเมินสมรรถนะ และความคุ้มค่าของระบบผลิตไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายเทคโนโลยีที่ติดตั้งบนหลังคา ในประเทศไทย

Evaluation of Rooftop Solar PV Performance of Different PV Module Technologies operating in Thailand

ปิระวุธ ชินวรรังสี ศศิวมล ทรงไทร ณัฐกานต์ อุดมเดชาณัติ ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์ อัสวิน หงษ์สิงห์ทอง
ทวีวัฒน์ กระจำงสังข์ จริญญา ศรีธาราธิคุณ กอบศักดิ์ ศรีประภา

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สวทช.

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอผลการประเมินสมรรถนะ (Performance ratio : PR) และความคุ้มค่าของเทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างกันโดยติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 6 ระบบบนหลังคาในประเทศไทยด้วยการบันทึกข้อมูลในระยะเวลา 1 ปี พบว่า ระบบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีค่าสมรรถนะสูงที่สุดเท่ากับ 82.2% ขณะที่ระบบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด mono c-Si มีค่าสมรรถนะต่ำที่สุดเท่ากับ 68.9% นอกจากนี้ยังพบว่า เทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด poly-Si มีความเหมาะสมและคุ้มค่าที่สุดสำหรับใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาในปัจจุบัน

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์, แผงเซลล์แสงอาทิตย์, สมรรถนะของระบบ, ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา

Abstract

This paper presents the evaluation results of the performance ratio (PR) of different photovoltaic (PV) module technologies by installing the six generated PV systems onto roof in Thailand with records data of one year period. It was found that a-Si:H PV system has a highest initial PR of 82.2%, while mono c-Si PV system has a lowest PR of 68.9%. Furthermore, it also found that poly-Si PV module technology is suitability and the best worthiness for use in rooftop solar PV system on present-day.

Keywords : Photovoltaic, PV module, Performance ratio, Rooftop solar PV system

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตร ซึ่งสามารถรับแสงได้ตลอดทั้งปี มีค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปี $17.4 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{day}$ ($4.83 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$) [1] ซึ่งมีศักยภาพที่เพียงพอต่อการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานได้ทั้งปี และในแผนพัฒนาพลังงานทดแทน และพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan : AEDP) ของประเทศไทย มีเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกในปี พ.ศ. 2564 ตั้งอยู่ที่ 25% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการให้ความสำคัญต่อการนำพลังงานทดแทน ในส่วนของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีเป้าหมายการติดตั้งที่ 3,000 MW ซึ่งหน่วยงานภาครัฐพยายามส่งเสริมให้เกิดการลงทุนติดตั้งใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดตั้งบนหลังคาอาคาร บ้านพักอาศัย (Solar Rooftop) ทำให้มีปริมาณการติดตั้งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงาน

โดยทั่วไปคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบุโดยผู้ผลิตนั้นทำการทดสอบที่เงื่อนไขมาตรฐาน (Standard Test Condition : STC) นั่นคือ การทดสอบที่อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 25°C ความเข้มรังสีอาทิตย์ $1,000 \text{ W/m}^2$ และสเปกตรัมแสง AM 1.5 (Air Mass 1.5) ซึ่งมีความแตกต่างจากสภาวะการใช้งานจริง ด้วยปัจจัยของสิ่งแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์, ฝุ่นละออง และอื่น ๆ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [2] จากปัญหาดังกล่าวทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่มีเทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างชนิดกัน จำนวน 6 ระบบ เพื่อทดสอบการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดภายใต้สภาวะการใช้งานจริงในประเทศไทย จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาประเมินสมรรถนะของระบบ เพื่อหาเทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม และคุ้มค่าที่สุดในการติดตั้งใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาต่อไป

2. การทดสอบ

ในการทดสอบนี้ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเทคโนโลยีของแผง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน จำนวน 6 ระบบ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous Silicon Single-Junction (a-Si:H), เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Amorphous/ Microcrystalline Silicon Double-Junction (a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$), เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Copper Indium Gallium Selenide (CIGS), เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono-Crystalline Silicon (mono c-Si), เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly-Crystalline Silicon (poly c-Si) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Hetero-Junction with Intrinsic Thin Film (HIT) โดยแต่ละระบบมีขนาดกำลังการติดตั้งประมาณ 1 kWp ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 6 ระบบนี้ติดตั้งอยู่บนหลังคาอาคารจอดรถของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) อำเภอน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา หันหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ทำมุม 14° ซึ่งเป็นทิศทางและมุมที่สามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปีได้มากที่สุดสำหรับพื้นที่ติดตั้ง ดังรูปที่ 1 ทำการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดเข้ากับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ที่มีขนาดและชนิดเดียวกันดังรูปที่ 1 เพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current : AC) และทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบ Power Grid ทำการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าของระบบ โดยติดตั้งมิเตอร์วัดค่าทางไฟฟ้า นั่นคือ ค่ากระแสไฟฟ้า, ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากำลังงานไฟฟ้าทั้งทางด้าน DC และ AC แล้วเก็บบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 นาทีลง Data Logger ดังรูปที่ 2

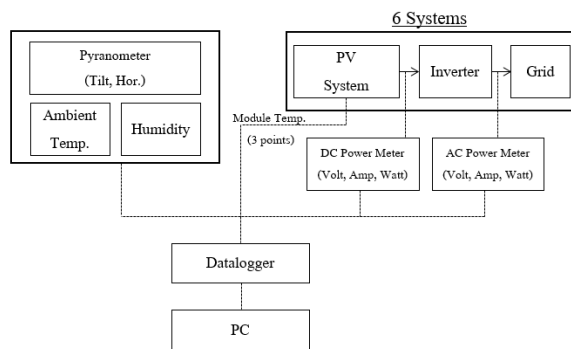
ในส่วนของการเก็บข้อมูลสภาวะแวดล้อมได้ทำการติดตั้ง Pyranometer เพื่อวัดค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ติดตั้ง Sensor สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ และความชื้นบรรยากาศ ติดตั้ง Sensor สำหรับวัดค่าอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเร็ว และทิศทางลม โดยข้อมูลสภาวะแวดล้อมเหล่านี้ ทำการวัดและเก็บบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 นาทีลง Data Logger เช่นเดียวกัน



(ก)

(ข)

รูปที่ 1 (ก)ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่บนหลังคาอาคารจอดรถ และ (ข)อินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งในห้องควบคุม



รูปที่ 2 โค้ดระบบการวัด และเก็บบันทึกข้อมูล

3. การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อ้างอิงตามมาตรฐาน International Electrotechnical Commission : IEC 61724[3] ถึงแม้ว่าจะมีค่าพารามิเตอร์เป็นจำนวนมากที่ใช้ในการคำนวณ แต่จะมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของระบบฯ ที่ติดตั้งกับระบบฯ อื่น ๆ ดังนี้

$$Y_a = \frac{E_{pv(DC)}}{P_{o(installed)}} \quad (1)$$

$$Y_f = \frac{E_{grid(AC)}}{P_{o(installed)}} \quad (2)$$

$$Y_r = \frac{H_i}{G_{STC}} \quad (3)$$

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่

Y_a คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง : Array Yield (kWh/kWp)

Y_f คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง : Final Yield (kWh/kWp)

Y_r คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทางทฤษฎี : Reference Yield (kWh/kWp)

PR คือ ค่าสมรรถนะของระบบ : Performance Ratio (%)

$E_{pv(DC)}$ คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh)

$E_{grid(AC)}$ คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้า (kWh)

P_o (installed) คือ ขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้ง (kWp)

H_i คือ ค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ (kWh/m²)

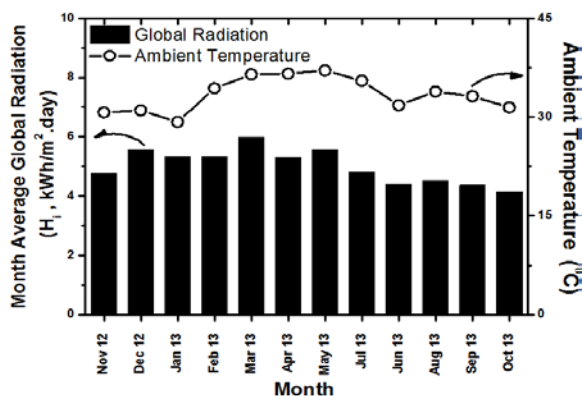
G_{STC} คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ ที่มาตรฐาน STC (1 kW/m²)

4. ผลการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

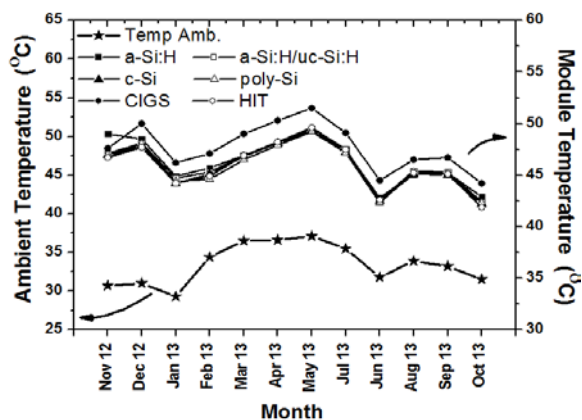
ทำการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้า และสถานะแวดล้อมของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่บนหลังคาถนนจอดรถของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2555 ถึงเดือนตุลาคม 2556 แล้วนำมาวิเคราะห์ คำนวณเพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามสมการในหัวข้อที่ 3

เมื่อพิจารณาข้อมูลสถานะแวดล้อมของระบบดังแสดงในรูปที่ 3 คือค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่ระนาบเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือน พบว่า ค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าสูงที่สุดในเดือนมีนาคม 2556 มีค่าเท่ากับ 5.99 kWh/m².day เนื่องจากเป็นช่วงฤดูร้อน และในเดือนตุลาคม 2556 ค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 4.16 kWh/m².day เนื่องจากอยู่ในช่วงฤดูฝน และค่าเฉลี่ยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์รายปีมีค่าเท่ากับ 5.00 kWh/m².day ซึ่งมีสภาพที่เพียงพอต่อการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานได้ทั้งปี ในส่วนของข้อมูลอุณหภูมิบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือนพบว่าในเดือนพฤษภาคม 2556 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 37.1 °C ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน และในเดือนมกราคม 2556 มีค่าอุณหภูมิบรรยากาศเฉลี่ยต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 29.3 °C ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูหนาว ในขณะที่ค่าอุณหภูมิบรรยากาศเฉลี่ยทั้งปีมีค่าเท่ากับ 33.4 °C ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบที่สถานะมาตรฐาน คือ 25 °C ซึ่งค่าอุณหภูมิบรรยากาศในสถานะการใช้งานจริงที่สูงขึ้นนี้มีผลทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงตามไปด้วยซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ข้อมูลอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 4 จากข้อมูลในรูปที่ 4 พบว่าในเดือนพฤษภาคม 2556 ซึ่งเป็นเดือนที่มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิบรรยากาศสูงที่สุด คือ 37.1 °C ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดมีค่าสูงที่สุดตามไปด้วย เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งปี พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ย

ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 47.7°C เนื่องจากมาจากโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS ประกอบด้วย Glass / Cell / Glass ทำให้ดูดซับและเก็บความร้อนไว้ได้มากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นที่นำมาติดตั้ง ในขณะที่โครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด mono c-Si, poly c-Si และ HIT ประกอบด้วย Glass / Cell / Tedlar ทำให้เก็บความร้อนได้น้อยกว่าโครงสร้างแบบ Glass / Cell / Glass ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้มีค่าต่ำกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS



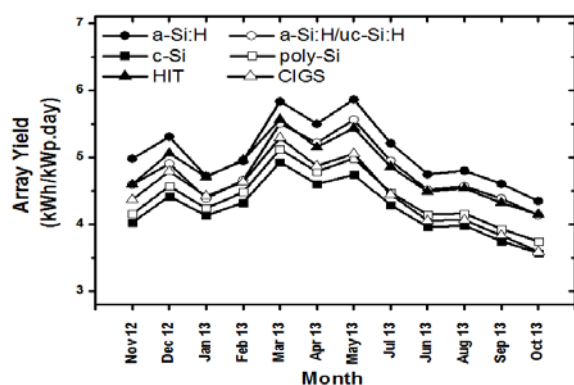
รูปที่ 3 ค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือน



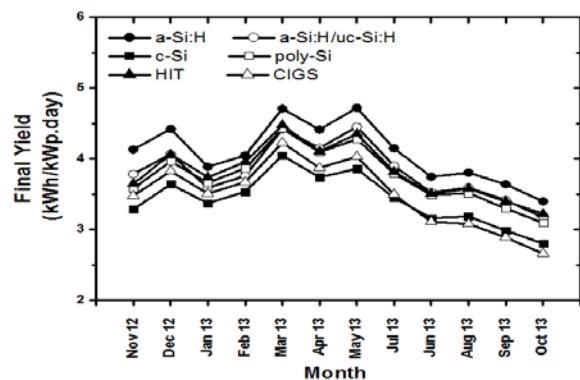
รูปที่ 4 อุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน

ข้อมูลทางไฟฟ้าที่เก็บบันทึกระหว่างช่วงเดือนพฤศจิกายน 2555 ถึง เดือนตุลาคม 2556 ได้นำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าต่าง ๆ ตามสมการที่ (1) ถึง (4) ในรูปที่ 5 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง (Y_a) เฉลี่ยรายเดือน ซึ่งค่า Y_a นี้จะเป็นตัวบอกว่าระบบจะผลิตไฟฟ้า DC ได้ปริมาณเท่าไรต่อการติดตั้งระบบ 1 kWp ภายในระยะเวลา 1 วัน

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า ค่า Y_a ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีค่ามากที่สุดในแต่ละเดือนเมื่อเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ และมีค่ามากที่สุดในช่วงฤดูร้อน คือช่วงเดือนมีนาคม ถึงเดือนพฤษภาคม ส่วนในช่วงฤดูฝน คือช่วงเดือนมิถุนายน ถึงเดือนตุลาคม ค่า Y_a จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ดังรูปที่ 4 และเป็นแนวโน้มเดียวกันกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด mono c-Si ให้ค่า Y_a น้อยที่สุดในแต่ละเดือนเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ

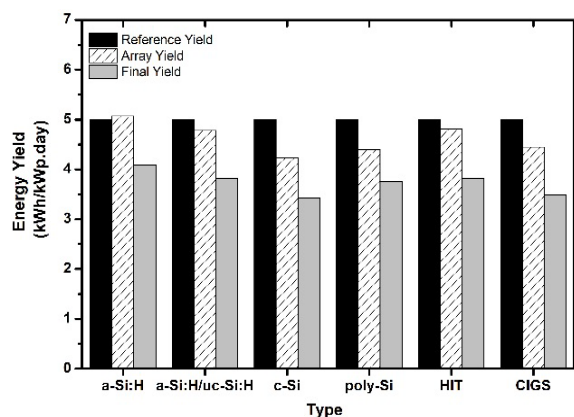


รูปที่ 5 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง (Y_a) เฉลี่ยรายเดือน



รูปที่ 6 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง (Y_f) เฉลี่ยรายเดือน

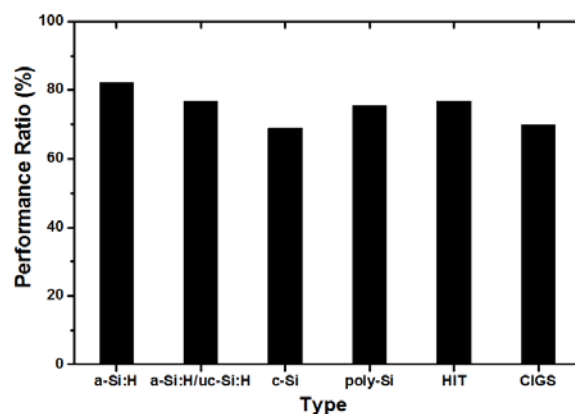
ในรูปที่ 6 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง (Y_f) เฉลี่ยรายเดือน โดยที่ค่า Y_f นี้จะเป็นตัวบอกว่าระบบจะผลิตไฟฟ้า AC ได้ปริมาณเท่าไรต่อการติดตั้งระบบ 1 kWp ภายในระยะเวลา 1 วันจากรูปที่ 6 จะพบว่า ค่า Y_f มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่า Y_a คือ ค่า Y_f ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีค่ามากที่สุด ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด mono c-Si ให้ค่า Y_f น้อยที่สุดในทุกเดือนเมื่อเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ



รูปที่ 7 ค่าผลผลิตทางไฟฟ้า (Yield) ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด (Y_r, Y_a, Y_f) เฉลี่ยรายปี

เมื่อพิจารณารูปที่ 7 ซึ่งแสดงค่าผลผลิตทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด (Y_r, Y_a, Y_f) เฉลี่ยรายปีพบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ให้ค่า Yield สูงที่สุด โดยมีค่า Y_a เท่ากับ 5.07 kWh/kWp.day, Y_f เท่ากับ 4.09 kWh/kWp.day รองลงมาเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT และ a-Si:H/ μ c-Si:H ตามลำดับ ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด c-Si ให้ค่า Yield ต่ำที่สุด โดยมีค่า Y_a เท่ากับ 4.22 kWh/kWp.day, Y_f เท่ากับ 3.42 kWh/kWp.day ซึ่งมีค่าน้อยกว่า Yield ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ประมาณ 16 % ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต่อการผลิตไฟฟ้าซึ่งแสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ (Temperature Coefficient : T_c) ซึ่งค่า T_c นี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดซึ่งมีค่าแตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่จะแสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของกำลังไฟฟ้า (T_c of P_{max}) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 °C โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด mono c-Si มีค่า T_c of P_{max} -0.49 %/°C ซึ่งมีค่าสูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ (คิดลบมาก) เมื่อทำงานภายใต้สภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจึงผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีค่า T_c of P_{max} -0.20 %/°C ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ (คิดลบน้อย) จึงสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุด

การหาค่าสมรรถนะของระบบ (Performance ratio) ทำได้โดยนำข้อมูลทางไฟฟ้ามาคำนวณหาค่า PR ตามสมการที่ (4) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 8

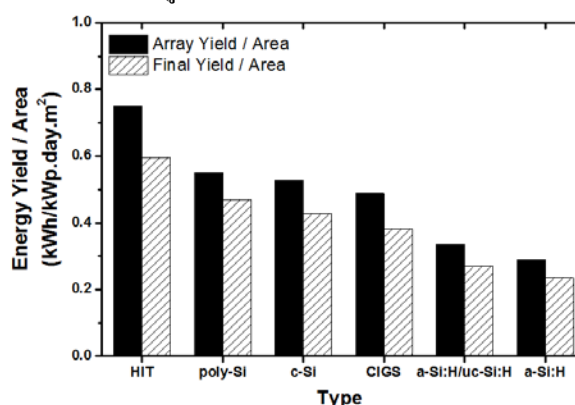


รูปที่ 8 ค่า PR ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดเฉลี่ยรายปี

ค่าสมรรถนะของระบบ (PR) จะเป็นตัวที่บอกถึงคุณลักษณะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ จากรูปที่ 8 พบว่า PR มีค่าสอดคล้องกับค่า Yield โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีค่า PR สูงที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 82.2 % รองลงมาเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT และ a-Si:H/ μ c-Si:H ตามลำดับ ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด mono c-Si ให้ค่า PR ต่ำที่สุด โดยมีค่า PR เท่ากับ 68.9 %

5. ความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

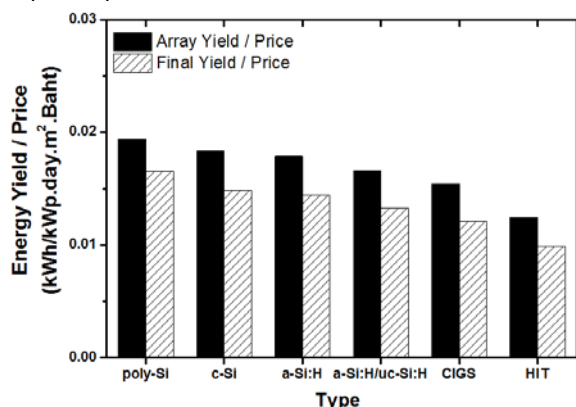
การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคามักมีปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ เรื่องขนาดของพื้นที่ในการติดตั้งที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นเพื่อหาเทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) จะทำโดยพิจารณาจากผลผลิตทางไฟฟ้า (Yield) ต่อพื้นที่การติดตั้งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลผลิตทางไฟฟ้าต่อพื้นที่การติดตั้ง (Yield / Area)

จากรูปที่ 9 พบว่า เมื่อใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบฯ เท่ากันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT จะให้ค่าผลผลิตทางไฟฟ้าต่อพื้นที่สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ $0.6 \text{ kWh/kWp.day.m}^2$ ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ให้ค่าผลผลิตทางไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ $0.23 \text{ kWh/kWp.day.m}^2$ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันประมาณ 61.67 %

อีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญนอกเหนือจากเรื่องพื้นที่ในการติดตั้งที่มีอยู่อย่างจำกัดแล้ว คือปัจจัยเรื่องราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด ซึ่งมีราคาแตกต่างกันตามเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์[4] ในรูปที่ 10 แสดงค่าผลผลิตทางไฟฟ้าที่ได้ต่อพื้นที่การติดตั้งต่อราคาดัชนี คือ เมื่อมีพื้นที่ในการติดตั้งและใช้งบประมาณเท่ากัน แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด poly c-Si จะให้ผลผลิตทางไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อราคามากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ $0.017 \text{ kWh/kWp.day.m}^2$.baht ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT ให้ค่าผลผลิตทางไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อราคาค่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ $0.001 \text{ kWh/kWp.day.m}^2$.baht เนื่องจากราคาปัจจุบันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT มีราคาสูงที่สุดในกลุ่มที่นำมาเปรียบเทียบ



รูปที่ 10 ผลผลิตทางไฟฟ้าต่อพื้นที่การติดตั้งต่อราคา (Yield / Price)

6. สรุป

จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา และทดสอบการทำงานภายใต้สภาวะการใช้งานจริง พร้อมทั้งเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 1 ปี เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 6 ชนิด พบว่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ อุณหภูมิของ

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ จากผลการทดสอบพบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์สูงที่สุด จึงทำให้มีค่า PR ต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่า T_c of P_{max} ต่ำที่สุด (คิดลบน้อย) จะให้ค่า PR ของระบบระบบผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดนั่นก็คือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด mono c-Si ให้ค่า PR ของระบบผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุดในกลุ่มที่นำมาเปรียบเทียบกัน

เมื่อนำผลการประเมินสมรรถนะของระบบฯ มาวิเคราะห์เพื่อหาความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา พบว่า เทคโนโลยีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมสำหรับระบบ Solar Rooftop ในประเทศไทย ณ ปัจจุบัน คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด poly c-Si ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักและใช้งานกันอย่างแพร่หลายทำให้มีราคาถูก แต่ในอนาคตถ้าหากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด HIT มีราคาถูกลงอาจเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจกว่าเนื่องจากให้ค่า Yield / Area สูงที่สุด

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบคุณบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Solar energy research laboratory Silpakorn University, "Solar Radiation Maps from Satellite Data for Thailand", Report, Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2010.
- [2] L. Fara and M. Yamaguchi, "Advanced solar cell materials, Technology, modeling and simulation, Hershey", PA: Engineering Science Reference, 2013.
- [3] International Electrotechnical Commission, "Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis IEC61724", IEC standard, 1998.
- [4] pvXchange GmbH [Online], Available : <http://www.pvxchange.com>, [2014, October].

ตัวประกอบยืดหยุ่นของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้ โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลาย ยึดแน่น-ธรรมดา

Flexibility Factors of Unreinforced Branch Pipe Connections Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Bending Moments for Fixed-Simply End Conditions

ศดิสัย ถิ่นธาร มนต์ศักดิ์ พิมพ์สาร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ตัวประกอบยืดหยุ่นเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่ออุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบจากภายนอก ความไม่แม่นยำของตัวประกอบยืดหยุ่นส่งผลให้เกิดผลลัพธ์ที่ไม่แม่นยำในการคำนวณโมเมนต์ดัดและความเค้นจากการขยายตัวของระบบท่อกำลังจะศึกษาอิทธิพลของความยาวของท่อหลักและท่อแยก (L_1, L_2, L_b) ต่อตัวประกอบยืดหยุ่นและนำเสนอสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยืดหยุ่นต่อตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ ($d/D, D/T, t/T$) ในช่วง $0.333 \leq d/D \leq 1$, $20 \leq D/T \leq 250$ และ $0.333 \leq t/T \leq 3$ ที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดกระทำที่ปลายท่อแยก สำหรับสภาพจุดปลายของท่อหลักยึดแน่น-ธรรมดา โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยคุณสมบัติของการยืดหยุ่นเชิงเส้น ขั้นตอนแรกการดำเนินการสอบเทียบแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบความเค้นผลลัพธ์ของการต่อท่อแยกที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อมูลผลการทดลองที่มีอยู่ จากนั้นศึกษาผลกระทบของความยาวท่อหลัก (L_1, L_2) และท่อแยก (L_b) ต่อตัวประกอบยืดหยุ่น การหาค่าตัวประกอบยืดหยุ่นและสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยืดหยุ่นได้ถูกดำเนินการตามลำดับ จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของความเค้นผลลัพธ์สอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลองเป็นอย่างดี นอกจากนี้ผลลัพธ์จากการคำนวณได้แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อหลักและท่อแยกด้วยสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดามีผลกระทบต่อตัวประกอบยืดหยุ่น

คำสำคัญ : ตัวประกอบยืดหยุ่น, การต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรง, โมเมนต์ดัดในระนาบและนอกระนาบ

Abstract

Flexibility factors are an important parameter in pipe stress analysis, especially, for branch pipe connections subjected to external moments, in-plane and out-of-plane. Inaccuracy of these can influence

to calculated moments which result in inaccurate displacement stress range. The purpose of this paper is to investigate the effects of lengths of the run and branch pipes (L_1, L_2, L_b) on flexibility factors and correlation equations for these flexibility factors on geometry parameters ($d/D, D/T, t/T$) for range $0.333 \leq d/D \leq 1, 20 \leq D/T \leq 250$ and $0.333 \leq t/T \leq 3$ subjected to in-plane and out-of-plane bending moments for fixed-simply end conditions. Finite element method with linear elastic property is employed for stress and flexibility factor evaluation. At first, FEM stress results of run-branch pipe intersection are verified by comparing with the available experimental data, the study on effect of lengths for the run (L_1, L_2) and branch pipes (L_b), the determination of flexibility factors and correlation equations for these flexibility factors was carried out, respectively. The simulated result, the stress distribution trend, shows good agreement with the experimental data. Moreover, the FEA simulations of varying lengths of the run and branch pipes and fixed-simply end conditions, were performed and the calculated results indicate that run and branch pipe lengths have an effect on flexibility factors.

Keywords : Flexibility factor, Branch pipe connections, Run-branch pipe intersection

1. บทนำ

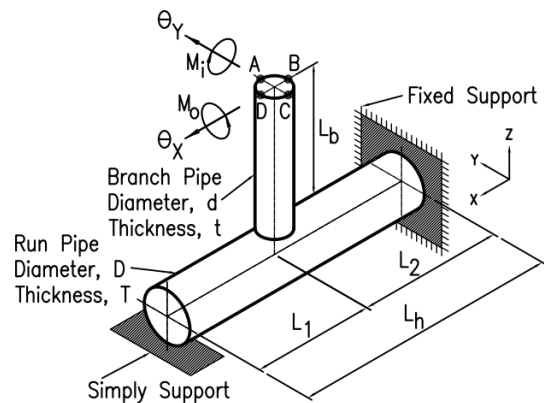
การต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรง (branch connection or unreinforced fabricated) ได้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับการต่อท่อแยก (branch pipe connection) ในระบบท่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานปิโตรเคมีและโรงไฟฟ้าเป็นต้น เมื่อท่อแยก (branch pipe) ได้รับโมเมนต์ดัด (bending moment) เนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนของท่อมากระทำที่ตัวท่อ โมเมนต์ดัดนั้นจะทำให้ท่อแยกเกิดการเสียรูปและค่าความหนาแน่นของความเค้นตรงบริเวณรอยเชื่อมต่อของท่อแยกกับท่อหลัก (run pipe) จะมีค่าสูงขึ้น ตัวประกอบยืดหยุ่น (flexibility factors) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นในระบบท่อในอุตสาหกรรม ซึ่งตัวประกอบยืดหยุ่นมีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่อ (displacement stress range) ความไม่แม่นยำของตัวประกอบยืดหยุ่นสามารถนำไปสู่การคำนวณความเค้นของระบบท่อที่ไม่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามข้อแนะนำของมาตรฐานระบบท่อ ASME B31.3 ตอนที่ 319.3 [1] ได้กำหนดให้ตัวประกอบยืดหยุ่นสำหรับการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงมีค่าเท่ากับ 1 บนสมมุติฐานที่ว่าจุด

เชื่อมต่อเป็นเสมือนจุดแข็งเกร็ง (rigid) จุดเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็งตามคำแนะนำของมาตรฐานในปัจจุบันนั้นสามารถที่จะเกิดความไม่แม่นยำในการคำนวณโมเมนต์ดัดและความเค้นบนท่อแยก WRC Bulletin 329 [2] ได้แสดงตัวอย่างผลของตัวประกอบยืดหยุ่นที่มีอิทธิพลต่อการคำนวณความเค้นของท่อแยกในระบบท่อ

The ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section 3, NB-3687.5 [3] ได้จัดเตรียม 2 สมการสำหรับการหาค่าตัวประกอบยืดหยุ่นที่ $D/T \leq 100$ และ $d/D \leq 0.5$ WRC 297 [4] ได้ให้กราฟสำหรับการหาค่าตัวประกอบยืดหยุ่นสำหรับสภาพจุดปลายธรรมดา-ธรรมดา (simply-simply support) และจำกัดการใช้งานไว้ที่ $d/D \leq 0.5$ Fujimoto และ Soh [5] เสนอสมการของตัวประกอบยืดหยุ่นสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น-ยึดแน่น (fixed-fixed support) ใช้งานที่ $50 \leq D/T \leq 300, 0.5 \leq d/D \leq 0.95$ และ $0.25 \leq t/T \leq 0.95$ Wais [6] ให้สมการตัวประกอบยืดหยุ่นที่ได้จากค่าเฉลี่ยของสภาพจุดปลายยึดแน่น-ปล่อยอิสระ (fixed-free support) กับจุดปลายยึดแน่น-ยึดแน่น ใช้งานในช่วง $7.50 \leq D/T \leq 99, 0.125 \leq d/D \leq 1.0$ และ $7.50 \leq d/t \leq 198$ Wiedera [7] ให้สมการตัวประกอบ

กอบยึดหยุ่นที่อยู่ในช่วงขอบเขต $20 \leq D/T \leq 250$, $0.333 \leq d/D \leq 1.0$ และ $0.333 \leq t/T \leq 3$ ภายใต้สภาพจุดปลายยึดแน่น-ปล่อยอิสระ

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ดำเนินการมาก่อนหน้านี้พบว่ายังไม่มีผลการวิจัยเพื่อศึกษาหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นที่ต่อแยกอยู่ภายใต้โมเมนต์คดในระนาบและนอกระนาบและท่อหลักมีสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา (fixed-simply support) ซึ่งแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการต่อท่อแยกและสภาพจุดปลาย

จุดประสงค์ของการศึกษานี้อยู่บนพื้นฐานการพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการสอบเทียบแบบจำลอง (benchmark study) โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ ด้วยเอลิเมนต์ทรงตัน (solid element) เพื่อหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นและนำเสนอสมการความสัมพันธ์ของสภาพเงื่อนไขดังกล่าวตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1

ช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตในการศึกษานี้ใช้เหมือนกับของ Widera [7] ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 1 รวมทั้ง $L_b = L_1 = L_2 = 14.5$ นิ้ว และ $d/D = t/T = 0.5$, $D/T = 99$ และ $D = 9.9$ นิ้ว สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง โดยที่ L_b คือความยาวท่อแยก L_1 และ L_2 คือระยะทางระหว่างจุดตัดของแกนท่อหลักและท่อแยกกับจุดปลายอิสระหรือธรรมดาและจุดปลายยึดแน่นตามลำดับ d , D และ t , T เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยและความหนาผนังของท่อแยกและท่อหลักตามลำดับ

ตารางที่ 1 ช่วงของตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต

Number of models	t/T	D/T	d/D
14 (a)	0.333, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.333
14 (b)	0.5, 1, 3	20, 60, 100, 150, 250	0.5
12	0.75, 1, 3	20, 60, 100, 150	0.75
3	1	20, 60, 100	1

(a) ยกเว้น $d/D=0.333$ ด้วย $D/T=20$ และ $t/T=3$.

(b) ยกเว้น $d/D=0.5$ ด้วย $D/T=20$ และ $t/T=3$.

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ความเค้นของระบบท่อ ตัวประกอบยึดหยุ่นขององค์ประกอบทั้งหมดในระบบท่อเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทราบค่า จากนิยามพื้นฐานและวิธีการที่ใช้สำหรับการพัฒนาตัวประกอบยึดหยุ่น [8] จากรูปที่ 2 มุมการหมุน (Θ) ของท่อแยกที่จุดปลาย (u) เทียบกับจุดต่อ (w) คือ $\Theta = Md_o / EI_b$ โดยที่ E คือโมดูลัสความยืดหยุ่น I_b คือโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดท่อแยก M เป็นโมเมนต์คดในระนาบหรือนอกระนาบที่กระทำกับท่อแยกและ d_o เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อแยกตามลำดับ ซึ่งในความเป็นจริงมุมการหมุนจะมีค่ามากกว่าในทางทฤษฎีเนื่องจากการเสียรูปของท่อที่บริเวณของการต่อแยก ซึ่งได้นิยามให้เป็นการหมุนของสปริงเสมือน [9] คือ $\Theta = KMd_o / EI_b$ ดังนั้นตัวประกอบยึดหยุ่น (K) ของการต่อท่อแยกมีค่าเป็น

$$K = \Theta EI_b / Md_o \quad (1)$$

เนื่องจาก $\Theta = \Theta_{FEA} - \Theta_{Beam}$ โดยที่ Θ_{FEA} ได้จากผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขณะที่ $\Theta_{Beam} = \Theta_{Run} + \Theta_{Branch}$ โดยที่ Θ_{Run} กับ Θ_{Branch} ได้มาจากการวิเคราะห์แบบคานด้วยวิธีทฤษฎียึดหยุ่น [10] ดังนั้นสมการที่ (1) เขียนใหม่ได้เป็น

$$K = (\Theta_{FEA} - \Theta_{Branch} - \Theta_{Run}) EI_b / Md_o \quad (2)$$

เพื่อที่จะหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นในระนาบ (K_i) และนอกระนาบ (K_o) ต้องแทนค่า Θ_{FEA} , Θ_{Branch} และ Θ_{Run} ลงในสมการที่ (2) และจากที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ตามสมการด้านล่างนี้

สำหรับ K_i เนื่องจากโมเมนต์คดในระนาบ (M_i):

$$\Theta_{FEA,i} = \Theta_Y \quad (3)$$

$$\Theta_{Branch,i} = M_i L_b / EI_b \quad (4)$$

$$\Theta_{Run,i} = \frac{M_i}{4EI_h L_h} \left[(L_h - L_1)(3L_1 - L_h) + \frac{3(L_h^2 - L_1^2)}{L_h^2} \right] \quad (5)$$

โดยที่ Θ_Y วัดที่จุด A และ C ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1

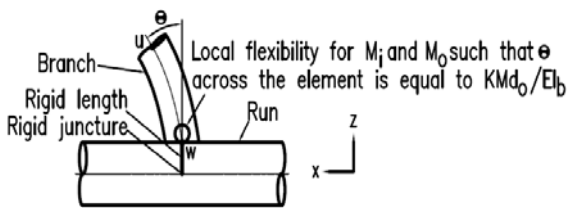
สำหรับ K_o เนื่องจากโมเมนต์คดนอกระนาบ (M_o):

$$\Theta_{FEA,o} = \Theta_X \quad (6)$$

$$\Theta_{Branch,o} = M_o L_b / EI_b \quad (7)$$

$$\Theta_{Run,o} = 1.3M_o L_2 / EI_h \quad (8)$$

โดยที่ Θ_x วัดที่จุด B และ D ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1 เช่นกัน



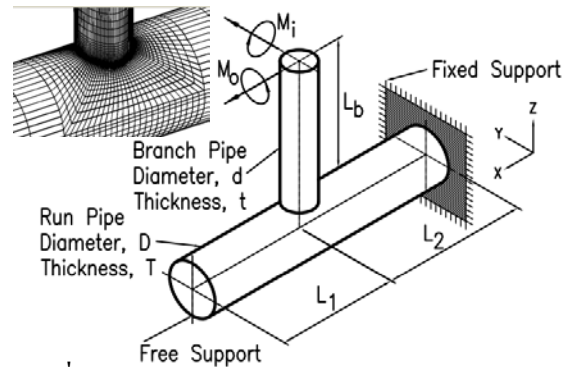
รูปที่ 2 แนวความคิดของตัวประกอบยืดหยุ่น

3. การดำเนินการวิจัยและผลการดำเนินการวิจัย

3.1 การสอบเทียบแบบจำลอง

การสอบเทียบแบบจำลองได้ถูกดำเนินการก่อนที่จะศึกษาพฤติกรรมของตัวประกอบยืดหยุ่น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองของ ORNL-1 [11] เป็นตัวสอบเทียบแบบจำลองโดยใช้ตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตที่ได้กล่าวมาแล้วและเงื่อนไขขอบเขตเหมือนกับปัญหาของ ORNL-1 [11] ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 สภาพจุดปลายยึดแน่น-ปล่อยอิสระ ส่วนจุดปลายของท่อแยกถูกปล่อยอิสระ โดยที่ไม่มีโมเมนต์คดในระนาบและนอกระนาบกระทำขนาด 2400 และ 600 ปอนด์-นิ้ว ตามลำดับ

โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ ชนิดเอลิเมนต์แบบทรงตัน (20-node isoparametric) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E) และอัตราส่วนพัวซอง (ν) มีค่าเท่ากับ 30×10^6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) และ 0.3 ตามลำดับ สำหรับสร้างแบบจำลองและโครงข่ายของจุดต่อ (mesh) ตามข้อแนะนำใน WRC Bulletin 493 [12] สำหรับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรูปทรงกระบอกเชื่อมต่อกับรูปทรงกระบอก ซึ่งกำหนดให้ระยะขอบเขตของการยุบตัว (decay distance region) บนท่อหลักและท่อแยกมีค่าเท่ากับ $3.0\sqrt{RT}$ และ $3.0\sqrt{rt}$ ตามลำดับ ซึ่ง R และ r เป็นรัศมีเฉลี่ยของท่อหลักและท่อแยกตามลำดับ ขนาดความกว้างของระยะห่างระหว่างเอลิเมนต์ในทิศทางตามแนวเส้นรอบวงของทั้งท่อหลักและท่อแยกมีค่า 3.75 องศา ขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมต่อที่บริเวณรอยเชื่อมต้อมีค่า $0.054\sqrt{RT}$ และ $0.108\sqrt{rt}$ ตามลำดับ



รูปที่ 3 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหา

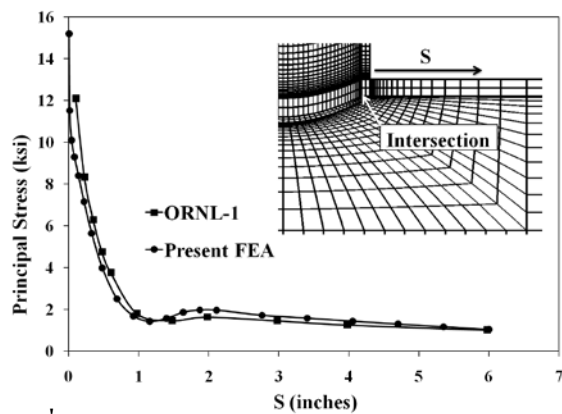
ORNL-1 [11] และรูปแบบโครงข่ายจุดต่อ

โดยที่ขนาดของเอลิเมนต์ได้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าประมาณ $0.5\sqrt{RT}$ ภายในระยะขอบเขตของการยุบตัว และใช้จำนวน 2 เอลิเมนต์ตลอดความหนาผนังของทั้งท่อหลักและท่อแยก โดยให้อัตราส่วนของด้าน (aspect ratio) ที่บริเวณรอยเชื่อมต้อมีค่าน้อยกว่า 5 และขนาดความยาวของเอลิเมนต์ในท่อหลักและท่อแยกในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมต่อที่อยู่ภายนอกระยะขอบเขตของการยุบตัวมีค่ามากกว่า $\sqrt{RT}$ และ $\sqrt{rt}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 (บนซ้าย) และผลการจำลองเปรียบเทียบค่าความเค้นหลักสูงสุดได้แสดงในรูปที่ 4 พบว่าการกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวด้านนอกตามแนวยาวของท่อหลักกับข้อมูลผลการทดลองได้แสดงแนว โนม์ที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี

ตัวประกอบยืดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบสามารถหาได้ด้วยการใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสม จากนั้นสมการความสัมพันธ์สามารถพัฒนาขึ้นได้โดยใช้ค่าตัวประกอบเหล่านั้น

3.2 การหาความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม

เพื่อกำจัดผลกระทบของความยาวของท่อหลักและท่อแยกต่อตัวประกอบยืดหยุ่นด้วยสภาพจุดปลายและภาระดัดที่กล่าวไว้ในจุดประสงค์และแสดงในรูปที่ 1 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามวิธีการสอบเทียบแบบจำลองซึ่งได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ด้วย $d/D = 0.333, 0.5, 0.75$ และ 1 รวมทั้ง $D/T = 100$ และ $t/T = d/D$ โดยให้ $D = 100$ นิ้ว เพื่อหาความยาวของทั้งท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม โดยพิจารณาการเข้าสู่ของ



รูปที่ 4 การกระจายตัวของความเค้นหลักสูงสุดในแนว

ตามยาวของท่อหลักเนื่องจากโมเมนต์ดัดในระนาบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าตัวประกอบยึดหยุ่นทั้งในระนาบและนอกระนาบที่ได้จากสมการที่ (2) ตามตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5 และผลลัพธ์ทั้งหมดได้แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งค่าเหล่านี้จะได้นำมาใช้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่นต่อไป

ตารางที่ 2 ความยาวท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม

สำหรับการวิเคราะห์ตัวประกอบยึดหยุ่นด้วย FEA

d/D	L_b	L_1	L_2	Number of models (*)
0.333	5D	6.5D	7.5D	29
0.5	5.5D	7.5D	8.5D	32
0.75	7D	8.5D	10D	26
1	8.5D	11.5D	11.5D	34

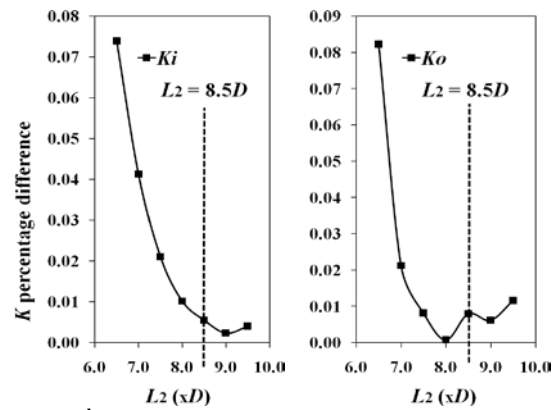
(*) แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์เพื่อพิจารณาการลู่เข้าของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง

3.3 ตัวประกอบยึดหยุ่น

43 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นตามแนวทางก่อนหน้านี้ สำหรับช่วงของตัวแปรที่อยู่ในตารางที่ 1 ด้วยสภาพจุดปลายและภาระตามจุดประสงค์โดยใช้ค่าความยาวของท่อหลักและท่อแยกจากตารางที่ 2 เพื่อหาค่าตัวประกอบยึดหยุ่น ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการที่ (2) ได้แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งค่าตัวประกอบยึดหยุ่นเหล่านี้จะนำไปใช้เพื่อพัฒนาหาสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นต่อไป

3.4 สมการความสัมพันธ์

เพื่อความสะดวกในการนำค่าตัวประกอบยึดหยุ่นไปใช้งาน การพัฒนาหาสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบยึดหยุ่นได้ถูกดำเนินการต่อมาด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นในชุดโปรแกรม R [13] โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3 สมการความสัมพันธ์ที่ได้ถูกแสดงในสมการ (9) และ (10) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ตามช่วง



รูปที่ 5 ความยาวที่เหมาะสมของ L_2 ที่ $d/D = 0.5$

ของตัวแปรที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้

ค่าความผันผวนและค่าความแตกต่างมากที่สุดของ K_i และ K_o ระหว่าง FEA จากตารางที่ 3 กับสมการความสัมพันธ์ที่ (9) และ (10) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งแสดงว่าสมการความสัมพันธ์สอดคล้องกับข้อมูลเป็น

ตารางที่ 3 ตัวประกอบยึดหยุ่น K_i และ K_o ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA)

Model	d/D	D/T	t/T	K_i	K_o
1	0.333	20	0.333	1.921	4.369
2	0.333	20	1	3.020	7.504
3	0.333	60	0.333	5.704	24.230
4	0.333	60	1	9.460	45.836
5	0.333	60	3	18.257	102.388
6	0.333	100	0.333	8.938	52.023
7	0.333	100	1	15.094	103.099
8	0.333	100	3	31.238	249.417
9	0.333	150	0.333	12.504	93.900
10	0.333	150	1	21.387	192.784
11	0.333	150	3	46.001	488.726
12	0.333	250	0.333	18.678	191.077
13	0.333	250	1	32.423	406.826
14	0.333	250	3	71.991	1074.769
15	0.5	20	0.5	2.377	6.665
16	0.5	20	1	3.213	9.337
17	0.5	60	0.5	6.161	34.951
18	0.5	60	1	8.670	53.336
19	0.5	60	3	17.258	121.653
20	0.5	100	0.5	9.250	74.582
21	0.5	100	1	13.148	117.942
22	0.5	100	3	27.641	290.293
23	0.5	150	0.5	12.550	134.434
24	0.5	150	1	17.985	218.777
25	0.5	150	3	38.862	562.191
26	0.5	250	0.5	18.072	269.614
27	0.5	250	1	25.994	449.302
28	0.5	250	3	57.284	1197.779
29	0.75	20	0.75	2.814	7.520
30	0.75	20	1	3.215	8.700
31	0.75	20	3	5.083	13.823
32	0.75	60	0.75	6.413	36.867
33	0.75	60	1	7.470	44.500
34	0.75	60	3	14.459	99.626
35	0.75	100	0.75	9.083	76.944
36	0.75	100	1	10.617	94.314
37	0.75	100	3	21.611	229.660
38	0.75	150	0.75	11.799	133.158
39	0.75	150	1	13.814	164.916
40	0.75	150	3	28.773	419.761
41	1	20	1	4.156	6.418
42	1	60	1	11.137	24.590
43	1	100	1	16.571	40.780

ตารางที่ 4 ความแตกต่างระหว่าง FEA กับสมการ
ความสัมพันธ์

	Variance R^2		Max. difference between FEA and correlation equation	
	Widera [7]	Present	Widera [7]	Present
K_i	99.2%	99.5%	3.7	2.6
K_o	99.9%	99.9%	26.1	25.4

$$K_i = 2.323 \left(\frac{d}{D} \right)^{-0.322} \left(\frac{D}{T} \right)^{0.853} \left(\frac{t}{T} \right)^{0.652} \left[0.631 \left(\frac{d}{D} \right) - 1.333 \left(\frac{d}{D} \right)^2 + 0.844 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right] \quad (9)$$

$$K_o = 1.083 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.240} \left(\frac{D}{T} \right)^{1.538} \left(\frac{t}{T} \right)^{0.842} \left[0.581 \left(\frac{d}{D} \right) - 0.925 \left(\frac{d}{D} \right)^2 + 0.377 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right] \quad (10)$$

อย่างดี โดยมีค่าความผันผวนเข้าใกล้ 1 และค่าความแตกต่างระหว่าง FEA และสมการความสัมพันธ์ที่ได้ศึกษาของ Widera [7] ซึ่งมีสภาพจุดปลายยึดแน่น-ปล่อยอิสระ

4. สรุปผลการดำเนินการวิจัย

จากการวิเคราะห์ตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิตและตัวประกอบยึดหยุ่นด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์คดในระนาบและนอกระนาบสำหรับสภาพจุดปลายยึดแน่น-ธรรมดา สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การกระจายตัวของความเค้นหลักที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง กราฟรูปที่ 4 แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลผลทดลองเป็นอย่างดี

2. ความยาวของท่อหลักและท่อแยกส่งผลกระทบต่อตัวประกอบยึดหยุ่น ดังนั้นความยาวของท่อหลักและท่อแยกที่เหมาะสม ควรดำเนินการวิเคราะห์หามาก่อนที่จะวิเคราะห์ตัวประกอบยึดหยุ่น

3. ตัวประกอบยึดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน D/T และ t/T

4. เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน d/D , D/T และ t/T ต่อตัวประกอบยึดหยุ่น พบว่าอัตราส่วน d/D มีอิทธิพลต่อตัวประกอบยึดหยุ่นค่อนข้างน้อย

5. ตัวประกอบยึดหยุ่นที่ได้จากตารางที่ 3 และสมการความสัมพันธ์ (9) และ (10) สามารถนำไปใช้ประกอบ

การวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนของระบบท่อ ที่มีการต่อท่อแยกแบบไม่เสริมแรงอยู่ในระบบท่อ ตามช่วงของตัวแปรที่กำหนดไว้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ASME Code for Pressure Piping, B31.3, "Chemical Plant & Refinery Piping," 2012.
- [2] E. C. Rodabaugh, "Accuracy of Stress Intensity Factors for Branch Connections," WRC Bulletin 329, 1987.
- [3] ASME Sec.3 Div. 1, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components," 2012.
- [4] J. L. Mershon, "Local Stresses in Cylindrical Shells Due to External Loadings on Nozzles," WRC Bulletin 297, 1984.
- [5] T. Fujimoto and T. Soh, "Flexibility Factors and Stress Indices for Piping Components with $D/T \leq 100$ Subjected to In-Plane or Out-of-Plane Moment," PVP, Vol.110, pp. 374–386, 1988.
- [6] E. A. Wais, "Stress Intensification Factors and Flexibility Factors for Unreinforced Branch Connections," PVP, Vol. 383, 1999.
- [7] G. E. O. Widera, "Flexibility Factors for Branch Pipe Connections Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Moments," PVP, Vol.128, pp.89–94, 2006.
- [8] E. C. Rodabaugh and E. A. Wais, "Standard Flexibility Factor Method," Report 1, WRC Bulletin 463, 2001.
- [9] E. C. Rodabaugh, "Stress Indices and Flexibility Factors for Nozzles in Pressure Vessels and Piping," ORNL/Sub-2913, 1979.
- [10] S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity, 3rd ed., McGraw-Hill, 1970.
- [11] J. M. Corum and R. C. Gwaltney, "Theoretical and Experimental Stress Analysis of ORNL Thin-Shell Cylinder-to-Cylinder Model No.1," ORNL, 1972.
- [12] Widera, G. E. O., and Xue, L., "Guidelines for Modeling Cylinder to Cylinder Intersections," WRC Bulletin 493, 2004.
- [13] <http://cran.r-project.org/>.

ผลของความหยาบผิวที่มีต่อการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรง

Effects of Surface Roughness on Thermo-Elastohydrodynamic Lubrication in Spur Gear

เจษฎา พานิชกรณ์ ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

อีเมล: jesdap@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาผลของความหยาบของผิวฟันเฟืองที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงที่มีการสัมผัสเป็นเส้นในสถานะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน ด้วยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน – ราฟสัน และประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีมัลติกริด แก้สมการเรย์โนลด์ส์ ร่วมกับสมการพลังงานในสถานะไม่คงตัว สมการการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ สมการการความหนืด และสมการความหนาแน่นของฟิล์มสารหล่อลื่น เพื่อหาการกระจายตัวของความดัน ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการทำงานของเฟืองฟันตรง จากการจำลองผลพบว่าความหยาบของผิวฟันเฟืองมีผลต่อความดันฟิล์มสารหล่อลื่น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอย่างรุนแรง เมื่อเฟืองเริ่มสัมผัสกันความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยสุดและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะการสัมผัสของเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเมื่อการขบกันของเฟืองจาก 2 คู่เป็นขบกัน 1 คู่ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยสุดที่ตำแหน่งพิทช์

คำสำคัญ : การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิก, เฟืองฟันตรง, สมการเรย์โนลด์ส์, ระเบียบวิธีมัลติกริด

Abstract

This paper presents the effect of surface roughness to performance characteristics of transient thermal-elastohydrodynamic lubrication (TEHL) in line contact with Newtonian fluids. The time-dependent modified Reynolds equation, energy equation, elasticity equation, viscosity equation and density equation with initial conditions were solved numerically using finite different method, Newton-Raphson method and multigrid multilevel method for an involute spur gear to obtain the film pressure profiles, film thickness profiles and traction coefficient in the contact region. The results show that surface roughness has significant affected on film pressure, film thickness, film temperature and friction coefficient. The film thickness reaches its minimum at approach point. When the line of action increases film thickness increases. The film temperature and friction coefficient were suddenly increase when the transition from two pairs to one pair and vice versa are modeled as a step variation of load. The minimum friction coefficient and film temperature were occurrence at pitch point.

Keywords : Thermo-Elastohydrodynamic lubrication, Spur gear, Reynolds equation, Multigrid method.

1. บทนำ

การส่งถ่ายกำลังที่ต้องการอัตราทดและส่งถ่ายกำลังสูงๆ จะใช้เฟืองเป็นอุปกรณ์หลักในการส่งถ่ายกำลัง แต่พฤติกรรมในการหล่อลื่นของเฟืองมีความยุ่งยากซับซ้อน

มาก เนื่องจากภาวะ ความเร็วที่ผิวและรัศมีความโค้งของฟันเฟือง มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการขบกันของฟันเฟือง รวมทั้งลักษณะของผิวฟันเฟืองที่มองดูเรียบเมื่อขยายด้วยกล้องขยายที่มีกำลังสูงพบว่าผิวของฟันเฟืองจะมีลักษณะ

ขรุขระหรือมีความหยาบของผิว ซึ่งความหยาบของผิวดังกล่าวมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮดรอลิกไดไฮโดร ไดนามิก และก่อให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นในขณะที่ทำงานอย่างมากส่งผลให้อุณหภูมิของสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

Dowson and Higginson[1] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮดรอลิกไดไฮโดรไดนามิกที่มีสัมผัสเป็นเส้นโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข พบว่าฟิล์มสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นบางมาก Al-Samieh[2] ศึกษาการหล่อลื่นแบบฟิล์มบางในสภาวะไม่คงตัว Larsson[3] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของเฟืองฟันตรงที่ทำงานในสภาวะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นอนนิวโตเนียนที่ความหนืดของสารหล่อลื่นเป็นตาม Circular Viscosity Model พบว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งฟันเฟืองเริ่มขบกันและมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะการขบกันของฟันเฟือง Wang[4] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮดรอลิกไดไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงเมื่อสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียนพบว่าความหนาฟิล์มจะมีค่าลดลงแต่อุณหภูมิสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระที่ฟันเฟืองได้รับเพิ่มขึ้น Guangteng [5] ทำการทดลองวัดค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นเมื่อผิวของชิ้นงานเป็นผิวหยาบเปรียบเทียบกับผลจากทางทฤษฎีพบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกัน Wongseedakeaw [6] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮดรอลิกไดไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงเมื่อสารหล่อลื่นเป็นของไหลอนนิวโตเนียนที่เป็นไปตามแบบจำลองของคาร์โอ Wongseedakeaw [7] ศึกษาผลของความหยาบผิวต่อการหล่อลื่นแบบไฮดรอลิกไดไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงพบว่าความหยาบผิวมีผลอย่างรุนแรงกับความดันและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น Lubrecht[8] และ Francisco[9] ได้นำวิธีมีดลกริด มาช่วยลดระยะเวลาในการจำลองผล เนื่องจากการศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮดรอลิกไดไฮโดรไดนามิกในสภาวะไม่คงตัว สมการที่ใช้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงดังนั้นการหาคำตอบมีความยุ่งยาก

บทความนี้ศึกษาผลของความหยาบของผิวฟันเฟืองที่มีต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบเทอร์โมไฮดรอลิกไดไฮโดรไดนามิกในเฟืองฟันตรงที่มีการสัมผัสเป็นเส้นในสภาวะไม่คงตัวด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน เมื่อคิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารหล่อลื่น โดยประยุกต์ใช้ระเบียบผลต่างสืบเนื่องระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสันร่วมกับระเบียบวิธีมีดลกริด

ในการคำนวณหาพฤติกรรมการกระจายตัวของฟิล์มสารหล่อลื่น อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบของผิวฟันเฟือง

2. ทฤษฎีการหล่อลื่น

2.1 ลักษณะทางกายภาพของฟันเฟือง

การทำงานของเฟืองแบบฟันตรงและลักษณะทางกายภาพของฟันเฟืองแสดงดังรูปที่ 1 การขบกันของฟันเฟืองที่ระยะ $\bar{S}$ จากตำแหน่งพิตช์ของเฟืองที่มีรัศมีพิตช์ r_a และ r_b มีมุม pressure angle $\bar{\psi}$ สามารถอธิบายได้ด้วยการสัมผัสกันของทรงกระบอก 2 ตัวที่มีความเร็วในการหมุน ω_a และ ω_b ตามลำดับ ดังนั้นที่ระยะการขบกันต่างๆ ของเฟืองจะได้

$$R_1(\bar{S}) = r_a \sin \bar{\psi} + \bar{S} \text{ และ } R_2(\bar{S}) = r_b \sin \bar{\psi} - \bar{S} \quad (1)$$

ความเร็วที่ผิวของฟันเฟืองที่ขบกัน

$$u_1(\bar{S}) = \omega_a R_1(\bar{S}) \text{ และ } u_2(\bar{S}) = \omega_b R_2(\bar{S}) \quad (2)$$

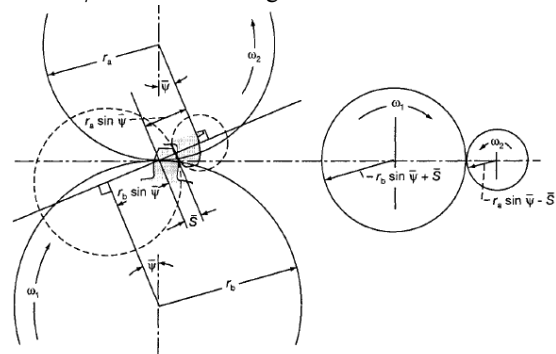
ระยะการขบกันทั้งหมดของฟันเฟือง

$$s = \sqrt{(r_a + a_a)^2 - (r_a \cos \bar{\psi})^2} - r_a \sin \bar{\psi} + \sqrt{(r_b + a_b)^2 - (r_b \cos \bar{\psi})^2} - r_b \sin \bar{\psi} \quad (3)$$

เมื่อ a_a, a_b ค่าแอดเดนดัมของเฟืองขับและเฟืองตาม

r_a, r_b รัศมีวงกลมพิตช์ของเฟืองขับและเฟืองตาม

$\bar{\psi}$ ค่า Pressure angle



รูปที่ 1 ระยะรัศมีวงกลมพิตช์ของเฟืองขับและเฟืองตามของเฟืองแบบฟันตรง

2.2 สมการเรย์โนลด์และสมการพลังงาน

สมการเรย์โนลด์ในสภาวะไม่คงตัวแบบไรมิตที่สัมผัสเป็นเส้น จะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\varepsilon \frac{\partial P}{\partial X} \right) = K \left\{ C_{UT}(t) \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} H) \right\} \quad (4)$$

เมื่อ $\varepsilon = \bar{\rho} H^3 / \bar{\mu}$ และ $K = 12 u_0 \mu_0 R_0^2 / b^3 P_H$

โดยที่เงื่อนไขขอบสำหรับสมการเรย์โนลด์

$$P(X_{inlet}, \bar{t}) = 0, P(X_{exit}, \bar{t}) = (\partial P / \partial X)_{exit} = 0$$

$$P(X, \bar{t}) \geq 0 \quad (X_{inlet} < X < X_{exit})$$

พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสกันของพื้นผิวของฟิล์มสารหล่อลื่นในสภาวะไม่คงตัวในรูปแบบไร้มิติ

$$\begin{aligned} \partial^2 \theta / \partial Z^2 = & K_{T1} (\bar{\rho} H^2 / \bar{k}_p) (\partial \theta / \partial \bar{t} + u^* (\partial \theta / \partial X)) \\ & - K_{T2} (\bar{\mu} / \bar{k}_p) (\partial u^* / \partial \bar{t})^2 \\ & - K_{T3} (\theta H^2 / \bar{k}_p) (\partial P / \partial \bar{t} + u^* (\partial P / \partial X)) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } K_{T1} = \frac{u_0 \rho_0 c_p b^3}{k_0 R_0^2}, \quad K_{T2} = \frac{\mu_0 u_0^2}{k_0 T_0}, \quad K_{T3} = \frac{\beta u_0 b^3 P_H}{k_0 R_0^2}$$

เงื่อนไขขอบสำหรับสมการพลังงาน[10]

$$\begin{aligned} \theta_{1/2} = & 1 \pm \frac{k_0 R_0}{\sqrt{\pi \rho_{1/2} c_{1/2} k_{1/2} b^3 u_0 C_{UT} (1 - S_0 / 2)}} \times \\ & \int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} (\bar{k}_p / H) (\partial \theta / \partial Z)_{Z=0/1} dX' / \sqrt{X - X'} \\ \theta(X_{inlet}, \bar{t}) = & 1 \end{aligned}$$

สมการความหนาฟิล์มขึ้นอยู่กับลักษณะกายภาพของพื้นผิวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพื้นผิวจากความดันของสารหล่อลื่น

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2C_{RT}} + D(X) - \frac{1}{\pi} \int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} P \ln |X - X'| dX' \quad (6)$$

เมื่อ $D(X)$ เป็นความหยาบแบบสุ่ม(Random) ของผิวของพื้นผิว

ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นขึ้นอยู่กับความดันที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ[1]

$$\bar{\rho} = \left(1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right) (1 - \beta T_0 (\theta - 1)) \quad (7)$$

ความหนืดของฟิล์มสารหล่อลื่น เปลี่ยนแปลงตามความดันที่ฟิล์มสารหล่อลื่นและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นในรูปแบบไร้มิติ[11]

$$\bar{\mu} = \exp \left[\frac{(\ln \mu_0 + 9.67) (-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^z)}{-\gamma T_0 (\theta - 1)} \right] \quad (8)$$

ผลกระทบจากความดันที่ฟิล์มสารหล่อลื่นได้รับ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฟิล์มสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงไป[12]

$$\bar{k}_p = 1 + \alpha_{K,1} p / (1 + \alpha_{K,2} p) \quad (9)$$

ภาระที่พื้นผิวจะได้รับจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำผ่านฟิล์มของสารหล่อลื่น

$$\int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} P dX = C_{WT} (\pi / 2) \quad (10)$$

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในการทำงานของพื้นผิวแบบไร้มิติ

$$f = \left(\frac{\mu_0 u_0 R_0}{C_{WT} w_0 b} \right) \int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} \left(\frac{\bar{\mu}_R^* \bar{\mu}_S^*}{H} \right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial Z} \right)_{Z=0} dX \quad (11)$$

3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การหาคำตอบของสมการเรย์โนลด์และสมการพลังงาน ร่วมกับซึ่งเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นสูง เพื่อหาความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่น ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ในสภาวะไม่คงตัว ทำการหาคำตอบซ้ำๆ จนกระทั่ง

$$\sum_{i=0}^N \left| 1 - \frac{P_i^k}{P_i^{k+1}} \right| < 0.0001, \quad \sum_{i=0}^N \left| 1 - \frac{\theta_i^k}{\theta_i^{k+1}} \right| < 0.0001$$

$$\text{และ } \left| 1 - \left[2 / (\pi C_{WT}) \right] \int_{X_{inlet}}^{X_{exit}} P dX \right| < 0.001$$

4. ผลการคำนวณ

คุณสมบัติของพื้นผิวและสารหล่อลื่นที่ใช้ แสดงตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2

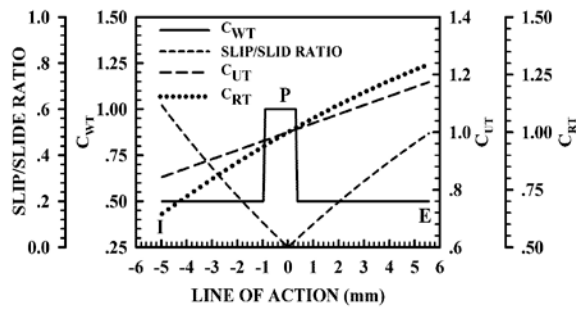
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของพื้นผิว

คุณสมบัติของพื้นผิว	เพื่องขับ	เพื่องตาม
จำนวนพื้นผิว	35	140
โมดูล (มม)	2	
Pressure Angle (องศา)	20	
ความกว้างของพื้นผิว (มม)	20	
Modulus of Elasticity (GPa)	117	
Poisson ratio	0.28	
Thermal conductivity (W/m-K)	55.4	
Specific heat (J/kg-K)	736.8	

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น

คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	SAE-90
Inlet Density (kg/m ³)	892.80
Inlet Viscosity (Pa-s)	0.195
Viscosity-Pressure Index	0.5685
Viscosity-Temperature coefficient (K ⁻¹)	0.05763
Coefficient of thermal expansivity (K ⁻¹)	0.00074
Thermal conductivity (W/m-K)	0.126
Specific heat (J/kg-K)	1870

สภาวะการทำงานของพื้นผิวที่ระยะการขบต่างๆ ในบทความนี้ ขณะที่เพื่องเริ่มขบกันภาระที่เพื่องได้รับแบบไร้มิติ $C_{WT} = 0.5$ แต่ที่ระยะการขบกันของพื้นผิวเปลี่ยนจากการขบกันจาก 2 คู่มามีเป็น 1 คู่มามี ภาระที่พื้นผิวจะได้รับจะเพิ่มแบบทันทีทันใด $C_{WT} = 1.0$ แสดงดังรูปที่ 2

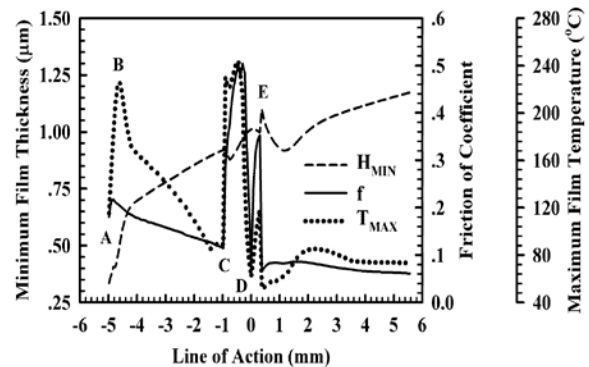


รูปที่ 2 สถานะการทำงานของพื้นเฟืองที่ระยะการขบต่างๆ

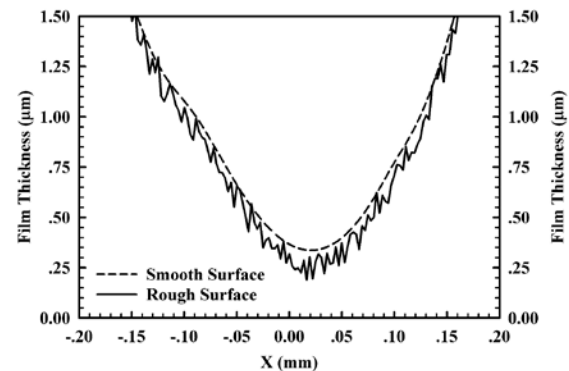
รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ระยะการขบต่างๆ ของเฟืองเมื่อเฟืองรับภาระ 10 kW และทำงานที่ความเร็วรอบ 1000 rpm ที่ค่าความหยาบผิวของพื้นเฟืองเป็นแบบสุ่มโดยมีค่าความหยาบเฉลี่ย (Root mean square), $R_{rms} = 0.10 \mu\text{m}$ พบว่าที่ตำแหน่งพื้นเฟืองเริ่มขบกัน (A) ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยสุด เนื่องจากที่ตำแหน่งดังกล่าวความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นเริ่มก่อตัวจากการกดอัดของผิวพื้นเฟือง ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าน้อยสุด อุณหภูมิสูงสุดของฟิล์มสารหล่อลื่น และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน มีค่าเท่ากับ $0.190 \mu\text{m}$, 115.43°C และ 0.181 ตามลำดับ เมื่อระยะการขบกันของพื้นเฟืองเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่อผ่านจุด B ที่ $\bar{S} = -4.604 \text{ mm}$ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.217 และ 225.92°C ตามลำดับ และมีค่าเพิ่มอีกครั้งเมื่อเฟืองเปลี่ยนจากการขบกัน 2 คู่มาเป็น 1 คู่ ที่ตำแหน่ง C ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงจากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด เนื่องจากผลของการกดอัดของฟิล์มสารหล่อลื่น โดยที่ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.115 ไปเป็น 0.504 และ 88.88°C ไปเป็น 243.79°C ตามลำดับ จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเข้าใกล้ศูนย์และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิบรรยากาศที่ตำแหน่งพิคซ์ (D) เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบการหมุนอย่างเดียว

ที่ตำแหน่งเฟืองเริ่มขบกัน (ตำแหน่ง A) พบว่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นในกรณีผิวของพื้นเฟืองเป็นผิวหยาบเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของความหยาบผิวแบบสุ่ม และมีค่าความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยกว่า

เมื่อพื้นเฟืองเป็นผิวเรียบ โดยที่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดเกิดขึ้นใกล้ๆ จุดกึ่งกลางของการสัมผัสที่ $X = -0.025 \text{ mm}$ ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าเท่ากับ $0.336 \mu\text{m}$ (ผิวเรียบ) และ $0.109 \mu\text{m}$ (ผิวหยาบ) ตามลำดับ เป็นผลเนื่องจากอิทธิพลของการกดอัดของฟิล์มสารหล่อลื่น (Squeeze Effect) แสดงดังรูปที่ 4



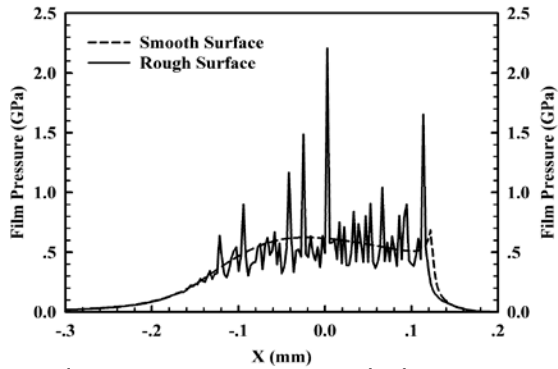
รูปที่ 3 ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุด สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด ที่ระยะการขบต่างๆ ของพื้นเฟือง



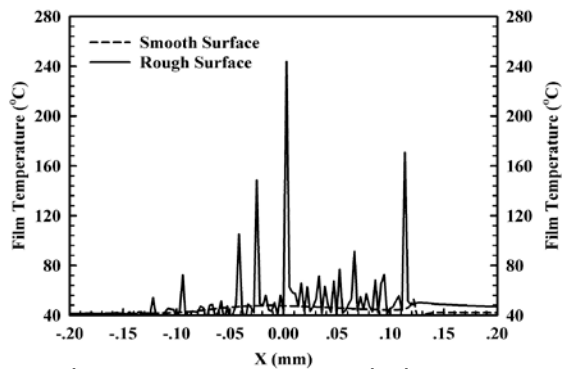
รูปที่ 4 การกระจายตัวของความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งพื้นเฟืองเริ่มขบกัน (ตำแหน่ง A)

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งเฟืองเปลี่ยนจากการขบกัน 2 คู่มาเป็น 1 คู่ (ตำแหน่ง C) พบว่าความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นมีการกวัดแกว่งอย่างรุนแรงเมื่อคิดผลของความหยาบของผิวพื้นเฟือง โดยที่ความดันและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดในกรณีผิวของพื้นเฟืองเป็นเรียบมีค่าเท่ากับ 0.624 GPa และ 47.76°C และผิวหยาบมีค่าเท่ากับ 2.208 GPa และ 243.79°C ตามลำดับ

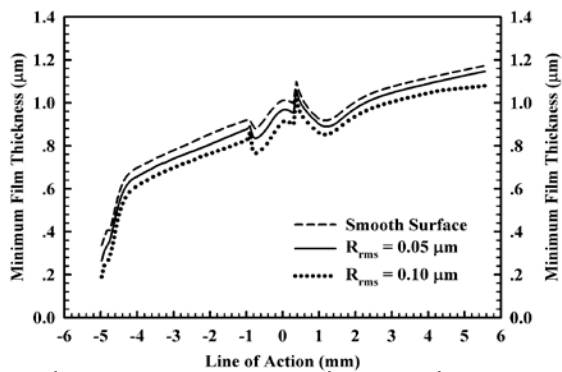
อุณหภูมิของฟิล์มหล่อลื่นสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลง ตลอดระยะการขบกันของพื้นเฟืองเมื่อความหยาบของผิวพื้นเฟืองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 7 รูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 5 ความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งเพื่องเปลี่ยนจากการขบกัน 2 คู่มาเป็น 1 คู่ (ตำแหน่ง C)



รูปที่ 6 อุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่ตำแหน่งเพื่องเปลี่ยนจากการขบกัน 2 คู่มาเป็น 1 คู่ (ตำแหน่ง C)



รูปที่ 7 ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเพื่อง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวของฟันเพื่อง

5. สรุปผล

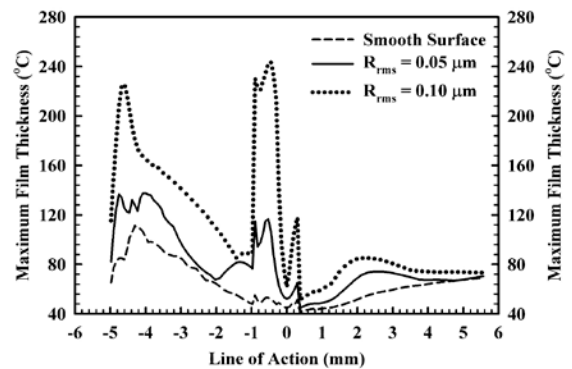
จากการจำลองผลพฤติกรรมหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกในเพื่องฟันตรงเมื่อผิวของฟันเพื่องเป็นผิวหยาบสรุปได้ว่า

5.1 ความหยาบผิวของฟันเพื่องมีผลอย่างรุนแรงต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ความดัน อุณหภูมิและความหนาของฟิล์มสารหล่อลื่น

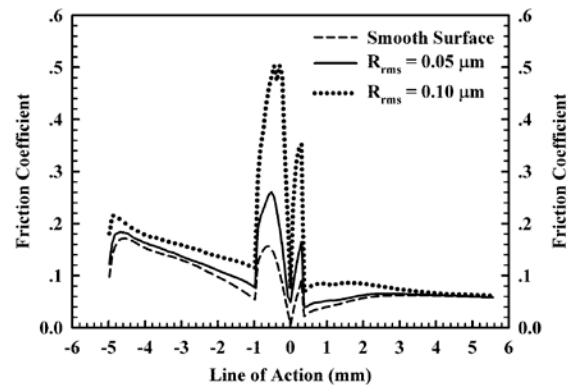
5.2 ความหนาฟิล์มน้อยสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งฟันเพื่องเริ่มขบกัน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอุณหภูมิของ

ฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุด มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเมื่อเพื่องเปลี่ยนจากการขบกัน 2 คู่มาเป็น 1 คู่ แต่มีค่าน้อยสุดที่ตำแหน่งพิคซ์

5.3 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นน้อยสุดมีค่าลดลงเมื่อความหยาบของผิวฟันเพื่องเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 อุณหภูมิฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเพื่อง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวของฟันเพื่อง



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ระยะการขบต่างๆ ของฟันเพื่อง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวของฟันเพื่อง

6. สัญลักษณ์

b Semi-width of Hertzian contact under load, m,

$$b = R_0 (8W_0/\pi)^{1/2}$$

C_{RT} Transient dimensionless curvature sum, $C_{RT} = R_x/R_0$

C_{UT} Transient dimensionless velocity, $C_{UT} = \bar{u}/u_0$

C_{WT} Transient dimensionless load, $C_{WT} = w'_z/w_0$

$E_{1/2}$ Elastic modulus of pinion/gear, Pa

E' Effective elastic modulus, Pa

$$1/E' = 1/2 \left[(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2 \right]$$

f Friction coefficient

h Lubricant film thickness, m

h_0 Rigid central film thickness, m

H	Dimensionless film thickness, $H = h(R_0/b^2)$
H_0	Dimensionless rigid central film thickness $H_0 = h_0(R_0/b^2)$
K	Constant in Reynold equation
κ	Thermal conductivity of lubricant, W/m-K
k_0	Thermal conductivity of lubricant at ambient pressure, W/m-K
$\bar{k}_p$	Dimensionless Thermal conductivity of lubricant, $\bar{k}_p = k/k_0$
K_{T1}	Constant in Energy equation
K_{T2}	Constant in Energy equation
K_{T3}	Constant in Energy equation
p	Film pressure, Pa
P	Dimensionless pressure, $P = p/P_H$
P_H	Maximum Hertzian pressure, Pa $P_H = E'(W_0/2\pi)^{1/2}$
R_0	Pitch circle radius sum, m $1/R_0 = 1/r_a \sin(\bar{\psi}) + 1/r_b \sin(\bar{\psi})$
R_x	Curvature sum, m, $1/R_x = 1/R_1 + 1/R_2$
r_a	Base cycle radius of pinion, m
r_b	Base cycle radius of gear, m
t	Time, s
$\bar{t}$	Dimensionless time, $\bar{t} = (u_0/b)t$
T	Film temperature, K
T_0	Inlet lubricant temperature, K
$T_{1/2}$	Surface temperature of pinion/gear, K
u	Film velocity, m/s
u_1	Pinion teeth surface velocity, m/s
u_2	Gear teeth surface velocity, m/s
$\bar{u}$	Entrainment velocity, m/s, $\bar{u} = (u_1 + u_2)/2$
u_0	Reference velocity, m/s
w'_z	Transient load, N/m
w_0	Reference load, N/m
W_0	Dimensionless reference load, $W'_0 = w_0/E'R_0^2$
x	Coordinate, m
X	Dimensionless coordinate, $X = x/b$
Z_1	Viscosity-Pressure index
θ	Dimensionless film temperature, $\theta = T/T_0$
$\theta_{1/2}$	Dimensionless pinion/gear teeth surface temperature
μ	Equivalent viscosity, Pa-s
μ_0	Inlet viscosity, Pa-s
$\bar{\mu}$	Dimensionless equivalent viscosity, $\bar{\mu} = \mu/\mu_0$
ρ	Density of lubricant, kg/m ³
ρ_0	Inlet density of lubricant, kg/m ³
$\bar{\rho}$	Dimensionless density of lubricant, $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$
$\bar{\psi}$	Pressure angle, degree

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Dowson and G.R. Higginson, "Elastohydrodynamic Lubrication: The Fundamental of Roller and Gear Lubrication", Pergamon, Oxford, 1966.
- [2] R. Larsson, "Transient non-Newtonian elastohydrodynamic lubrication analysis of an involute spur gear", Wear, Vol. 207, pp 67-73, 1997.
- [3] M. Al-Samieh and H. Rahnejat, "Ultra-Thin Lubricating Films Under Transient Conditions", Journal Physics D: Applied Physics, vol.34, pp. 2610-2621, 2001.
- [4] Y. Wang, H. Li, J. Tong and P. Yang, "Transient thermoelastohydrodynamic lubrication analysis of an involute spur gear", Tribology International Vol. 37, pp 773-782, 2004.
- [5] G. Guangteng, P.M. Cann, A.V. Olver and H.A. Spikes, "An experimental study of film thickness between rough surfaces in EHD contacts", Tribology International, Vol 33 pp 183-189, 2000.
- [6] K. Wongseedakeaw, "Performance Characteristics of Elastohydrodynamic Lubrication in Spur Gear with non-Newtonian Lubricant", Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 27, No. 4, pp.43-48, 2010.
- [7] K. Wongseedakeaw, "The Effect of Surface Roughness to Elastohydrodynamic Lubrication in Spur Gear with non-Newtonian Lubricant", KKU Engineering Journal, Vol.38 No.1, pp 43-52, 2011.
- [8] A.A. Lubrecht, W.E. ten Napel and R. Bosma, "Multigrid an Alternative Method for Calculating Film Thickness and Pressure Profiles in Elastohydrodynamically Lubricated Line Contacts", ASME Journal of Tribology, 108, 1986, pp. 551-556.
- [9] A. Francisco, J. Frene and A. Blouin, "Multilevel Solution to Elastohydrodynamic Contact for the Water Lubricated 3D Line Contact", STLE Tribology Transactions, 45, 2002, pp. 110-116.
- [10] J.W. Carslaw and J.C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press, 1959, London.
- [11] C.J.A. Roelands, "Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils", Druk, V.R.B., Groingen, 1996, Netherland.
- [12] S. Wang, C. Cusano and T.F. Conry, "Thermal analysis of elastohydrodynamic lubrication of line contact using the Ree-Eyring fluid model", Journal of Tribology, 113, 1991, pp. 232-244.

การคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบเพื่อเข้าสู่ระบบการขนส่งแบบมิลค์รัน ของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์

Supplier Selection for Milk-run Logistics of an Automotive Parts Manufacturer

นิตยา สมยิ่ง นระเกณท์ พุ่มชูศรี

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอขั้นตอนวิธีการตัดสินใจคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบเพื่อเข้าสู่ระบบการขนส่งแบบมิลค์รันของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ โดยให้ต้นทุนรวมจากการดำเนินการต่ำสุด โดยงานวิจัยเกิดขึ้นเนื่องจากลูกค้าของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์เหล่านี้มีนโยบายให้ลดราคาสินค้าลงทุกปี และแนวคิดของระบบมิลค์รันสามารถช่วยลดต้นทุนในองค์กรลงได้ ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนจึงมีแนวคิดที่จะนำระบบมิลค์รันมาใช้ แต่เนื่องจากลักษณะที่แตกต่างกันของผู้จัดหาวัตถุดิบทำให้การขนส่งเพื่อไปปรับสินค้ากับผู้จัดหาวัตถุดิบบางรายไม่คุ้มค่าต่อการดำเนินการ งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการในการตัดสินใจ 2 วิธี คือ วิธีแจงนับและฮิวริสติกส์ในการหาคำตอบ โดยทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการทั้งสองกับปัญหา 12 รูปแบบที่มีสถานการณ์ที่แตกต่างกัน พบว่าวิธีการที่เสนอทั้ง 2 วิธีสามารถนำไปใช้ได้จริง โดยทั้งสองวิธีมีความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ผลต่างของต้นทุนรวมรายปีประมาณ 0.4 % จากการทดลองพบว่าฮิวริสติกส์ที่เสนอสามารถให้คำตอบที่ดีในสถานการณ์ที่ผู้จัดหาวัตถุดิบมีตำแหน่งที่ตั้งกระจายตัวอย่างสุ่ม ในขณะที่วิธีแจงนับให้คำตอบได้ดีในกรณีที่ผู้จัดหาวัตถุดิบมีตำแหน่งที่ตั้งรวมกันเป็นกลุ่ม

คำสำคัญ : การผลิตในอุตสาหกรรมยานยนต์, การขนส่งแบบมิลค์รัน, การจัดเส้นทางเดินรถ

Abstract

This research presents an algorithm for supplier selection for Milk-run logistics of an automotive parts manufacturer in order to minimize total operating cost per year. The motivation of this research is because these manufacturers' customers usually force them to reduce their commodity price every year. Milk-run systems are well known for reducing operating cost, thus manufacturers are interested in applying this idea into their organizations. However, most manufacturers have a variety of their suppliers' characteristics and it may not be worthwhile to include all of them in the milk-run system. Therefore, this research proposes 2 methods in selecting milk-run suppliers: Total Enumeration and Heuristic method. This research demonstrates the efficiency of the algorithms from the result of applying proposed algorithms in 12 problem instances with different situations. From the result, it shows that both methods are well used in real situations. The overall cost different between total enumeration and heuristic method is 0.4% and we found that heuristic method performs better when suppliers have random location as

compared to clustered locations while total enumeration gives better results when supplier locations are clustered.

Keywords : Automobile Industry, Milk-Run Operation, Vehicle Routing Problem

1. บทนำ

จากสถิติปี 2556 [1] ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตรถยนต์อันดับที่ 9 ของโลก โดยอุตสาหกรรมรถยนต์ [2] ที่มีผู้ประกอบรถยนต์ (Assembler) จำนวนน้อยกว่าผู้ผลิตชิ้นส่วน (Suppliers) เป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้ประกอบรถยนต์มีอำนาจในการควบคุมผู้ผลิตชิ้นส่วน ซึ่งในปัจจุบันผู้ผลิตรถยนต์มีนโยบายที่มุ่งเน้นการลดต้นทุนวัตถุดิบ และการดำเนินการ ทำให้ผู้ผลิตชิ้นส่วนจำเป็นต้องปรับตัวเพื่อรองรับความต้องการของผู้ประกอบรถยนต์เพื่อความอยู่รอดในอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูงนี้

จากการที่ผู้ประกอบรถยนต์ และผู้ผลิตชิ้นส่วนลำดับแรก (First tier) นำระบบดึงมาใช้ในการลดต้นทุนการดำเนินการผลิต โดยเฉพาะต้นทุนการเก็บสินค้า เนื่องจากต้นทุนวัตถุดิบของชิ้นส่วนรถยนต์มีมูลค่าสูง ซึ่งวิธีการลดต้นทุนสินค้าคงคลังที่นิยมใช้คือการไปรับวัตถุดิบจากผู้ผลิตด้วยระบบมิลค์รัน (Milk Run) โดยจัดรถขนส่งไปรับวัตถุดิบจากผู้จัดหาวัตถุดิบเพื่อการผลิตในปริมาณที่ต้องการใช้เท่านั้น

ปัจจุบันผู้ผลิตชิ้นส่วนใช้ระบบการผลิตแบบดึง [3] โดยให้ผู้จัดหาวัตถุดิบทำการขนส่งสินค้ามาให้ ซึ่งผู้จัดหาวัตถุดิบจะกำหนดจำนวนการขนส่งขั้นต่ำที่มีจำนวนการขนส่งไม่สอดคล้องกับความต้องการใช้งาน เนื่องจากความคุ้มทุนในการส่งสินค้าของผู้จัดส่ง ทำให้บริษัทต้องแบกรับภาระในการเก็บสินค้าจึงทำให้เกิดต้นทุนจากการซื้อสินค้ามาเก็บไว้ ส่งผลให้ต้นทุนรวมสูง ดังนั้นการลดต้นทุนการเก็บสินค้าจึงเป็นผลดีต่อบริษัทอย่างยิ่ง

การขนส่งแบบมิลค์รัน เป็นวิธีการขนส่งสินค้ารูปแบบหนึ่งซึ่งทำการเก็บรวบรวมสินค้าจากหลายๆ จุดที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง กันแล้วไปส่งที่ปลายทางเพียงจุดเดียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่บนรถขนส่ง (High Loading Efficiency) โดยในแต่ละจุดที่รถขนส่งต้องไปเก็บสินค้ามีปริมาณ และน้ำหนักสินค้าที่แตกต่างกันตามข้อกำหนด

ของจุดขนส่งแต่ละจุด ซึ่งจะทำให้การขนส่งสินค้าเท่ากับจำนวนที่ต้องการใช้ แต่ทำการขนส่งบ่อยขึ้น ทำให้สามารถลดการเก็บสินค้า สามารถควบคุมเวลาในการขนส่ง ลดจำนวนรถขนส่งที่เข้ามายังโรงงานในแต่ละวัน และที่สำคัญลดต้นทุนการขนส่งเนื่องจากการขนส่งร่วมกันทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่บนรถขนส่ง ลดต้นทุนราคาสินค้าลงเพราะถ้าให้ผู้จัดหาวัตถุดิบส่งสินค้ามาให้ ผู้จัดหาวัตถุดิบได้รวมต้นทุนค่าขนส่งอยู่ในราคาสินค้า ดังนั้นแนวคิดที่จะทำการไปรับวัตถุดิบจากผู้จัดหาวัตถุดิบแบบมิลค์รันจึงก่อให้เกิดประโยชน์ในการจัดการวัตถุดิบ การลดต้นทุนสินค้า และต้นทุนการดำเนินการผลิต

งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับการคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบ เป็นการคัดเลือกบริษัทที่จะทำหน้าที่จัดเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตให้บริษัท โดยเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่ผลิตสินค้าตามที่บริษัทต้องการ และราคาเป็นที่พอใจ ดังงานวิจัยของวิโรจน์ [4] ซึ่งเสนอแนวทางการประเมินความสามารถของผู้จัดหาวัตถุดิบจากเกณฑ์ในด้านคุณภาพสินค้า ราคา และความน่าเชื่อถือของผู้จัดหาวัตถุดิบที่ทางบริษัทได้ติดต่อไว้ แล้วเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่จะให้ทำหน้าที่จัดหาวัตถุดิบให้บริษัท ทำนองเดียวกันกับงานวิจัยของ วรินทร์ และ สิทธิชัย [5] ที่สร้างเกณฑ์ และวิธีการคัดเลือกผู้ขายวัตถุดิบของโรงงานท่อพลาสติก นอกจากนี้ Rezaei Ort [6] Che และ Wang [7] ได้ทำการศึกษาสร้างเกณฑ์ วิธีการประเมิน และจัดกลุ่มผู้จัดหาวัตถุดิบที่มีลักษณะคล้ายกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งแต่ละกลุ่มมีวิธีการที่แตกต่างกัน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนการขนส่ง ดังงานวิจัยของ Chuah และ Yingling [8] ได้ศึกษาการวางแผนจัดเส้นทางรถขนส่งโดยกำหนดความถี่ในการขนส่งตายตัว (fixed daily frequency) และงานวิจัย Ruiz Maroto และ Alcaraz [9] Peterson J.V.H Willem และ Kekre [10] ล้วนแต่เป็นการวางแผนจัดการขนส่งโดยที่รู้ตำแหน่ง และจำนวนของผู้จัดหาวัตถุดิบที่

ต้องวางแผนการขนส่งอยู่แล้ว ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่จะทำการคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่เหมาะสมเข้ามาอยู่ในระบบมิลค์รัน เพื่อวางแผนการขนส่งรายวันที่จะเกิดขึ้นในอนาคตต่อไป

เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่อ้างอิงดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาวิธีการคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่บริษัทจะทำการไปปรับสินค้ามายังโรงงาน งานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษา และคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่บริษัทจะนำเข้าสู่ระบบมิลค์รัน และประมาณการจำนวนรถขนส่งที่ต้องจัดหาและทำสัญญาเช่ารายปีที่ทำให้ประหยัดต้นทุนรวมรายปีสูงสุด และนำผลของการคัดเลือกและเช่ารถดังกล่าวไปวางแผนการขนส่งรายวันเพื่อให้ต้นทุนขนส่งต่ำสุด โดยนำเสนอวิธีหาคำตอบ 2 วิธี คือ วิธีแฉ่งนับ (Total Enumeration) และฮิวริสติก (Heuristic Algorithm) เนื่องจากปัญหาที่พิจารณา คือปัญหาที่ซับซ้อนในระดับ NP-hard ดังนั้น ปัญหาที่นำมาทดสอบจึงเป็นปัญหามิติเล็กที่สามารถหาคำตอบได้ในระยะเวลาอันสั้น

วิธีการดำเนินงานของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1. การคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่บริษัทจะทำการไปปรับวัตถุดิบแบบมิลค์รัน และหาจำนวนรถที่จะทำสัญญาเช่ารายปี ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นการตัดสินใจในระดับรายปี 2. การจัดเส้นทางไปปรับวัตถุดิบรายวันตามแผนการผลิต การตัดสินใจในส่วนนี้เป็นการตัดสินใจในระดับรายวัน ซึ่งปัญหาที่พิจารณาจะถูกจำลองขึ้นมาเพื่อหาคำตอบในขั้นตอนที่ 1 ด้วยวิธีการแฉ่งนับ และฮิวริสติก และนำคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการจัดเส้นทางในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งผลที่ได้ถูกนำมาประเมินเพื่อเปรียบเทียบ และหาประสิทธิภาพของวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาบนปัญหาที่แตกต่างกัน

ในหัวข้อที่ 2 กล่าวถึงวิธีในการหาคำตอบ ซึ่งประกอบด้วยวิธีแฉ่งนับ และฮิวริสติกที่พัฒนาเพื่อคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบ และประมาณรถที่จะทำสัญญาเช่ารายปี รวมถึงการจัดเส้นทางขนส่งรายวันตามแผนการผลิต หัวข้อที่ 3 แสดงผลการทดลอง และหัวข้อที่ 4 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง รวมถึงทิศทางของงานวิจัยในอนาคต

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 ข้อมูลที่นำมาพิจารณาในการหาคำตอบ (Input Data)

ข้อมูลที่นำมาพิจารณาในระบบเพื่อประกอบการตัดสินใจทั้งในส่วนของการคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่บริษัทจะทำการขนส่งเอง และประมาณจำนวนรถขนส่ง และส่วนการจัดเส้นทางขนส่งรายวัน

ตารางที่ 1 ข้อมูลนำเข้าในการหาคำตอบ

การคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบ และประมาณจำนวนรถขนส่ง	การจัดเส้นทางขนส่งรายวัน
- แผนความต้องการวัตถุดิบจากผู้จัดหาวัตถุดิบแต่ละรายในแต่ละเดือน	- ความต้องการสินค้าที่ระบุน้ำหนักและวันที่ต้องการใช้สินค้า
- ข้อมูลจำนวน และน้ำหนักสินค้าที่บริษัทต้องการสินค้าเพื่อผลิตในแต่ละวันโดยเฉลี่ย	- ข้อมูลระยะทาง และเวลาเดินทางระหว่างแต่ละสถานที่ *งานวิจัยนี้กำหนดให้ระยะเวลาเดินทางมีค่าเท่ากับระยะทางหารขนส่ง
- จำนวนการขนส่งขั้นต่ำผู้จัดหาวัตถุดิบส่งสินค้าให้	
- ราคาสินค้ากรณีผู้จัดหาวัตถุดิบส่งสินค้าให้ และบริษัทขนส่งเอง	
- ระยะทางระหว่างแต่ละสถานที่	

2.2 วิธีการคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบเข้าสู่ระบบมิลค์รัน และประมาณจำนวนรถที่จะทำสัญญาเช่ารายปี

จากการที่บริษัทมีผู้จัดหาวัตถุดิบหลายราย จึงต้องมีการเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่บริษัทจะไปปรับสินค้าเพื่อความคุ้มค่าในการขนส่ง และเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ต้องการให้เกิดต้นทุนการดำเนินการที่ต่ำที่สุด ดังสมการที่ (1) ซึ่งต้นทุนการดำเนินการที่พิจารณา คือ ต้นทุนการเก็บสินค้าโดยเฉลี่ยต่อช่วงเวลา ต้นทุนราคาวัตถุดิบ แสดงดังสมการ (2) และ (3) และต้นทุนการขนส่ง

$$T_{kv} = \sum_{j=1}^{12} Tr_{k,jv} + \sum_{j=1}^{12} Inv_{kj} + \sum_{j=1}^{12} RM_{kj} + \sum_{j=1}^{12} Inv_{ij} + \sum_{j=1}^{12} RM_{ij} + VC_{truck} \quad (1)$$

$$Inv_{ij} = \frac{n_i}{2} \times C_i^{Inv} \times D_j \quad (2)$$

$$RM_{ij} = N_{ij} \times C_i^{RM} \quad (3)$$

เมื่อ k คือกลุ่มผู้จัดหาวัตถุดิบที่อยู่ในมิลค์รัน 1 คือกลุ่มผู้จัดหาวัตถุดิบที่ไม่ได้อยู่ในมิลค์รัน j คือเดือน i คือสินค้า v คือจำนวนรถที่เข้า T_k คือต้นทุนรวมรายปีของกลุ่ม k

$Tr_{k,jv}$ คือต้นทุนการขนส่งของเซต k เดือน j รถ v คัน ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนการจ้างรถขนส่งภายนอก และต้นทุนค่าน้ำมัน โดยมีสมมติฐานว่าจะขนส่งสินค้าเท่ากับ

จำนวนที่ต้องการใช้ในแต่ละวัน ซึ่งจะชนมาเก็บไว้ก่อนการใช้งานไม่เกินหนึ่งวัน Inv_{kj} และ Inv_{ij} คือต้นทุนการเก็บสินค้าในเดือน j ของกลุ่ม k และ i กรณีผู้จัดหาวัตถุดิบขนส่งสินค้าให้ ต้นทุนการเก็บสินค้าประมาณมาจากจำนวนการขนส่งแต่ละครั้ง โดยมีสมมติฐานว่าบริษัทมีอัตราการใช้สินค้าคงที่

Inv_{ij} คือต้นทุนการเก็บสินค้า i เดือน j n_i คือจำนวนการขนส่งต่อครั้ง F_{ij} คือความถี่ในการขนส่งในเดือน D_j คือจำนวนวันทำงานในเดือน j และ C_i^{Inv} คือต้นทุนการเก็บสินค้า i ต่อหน่วยต่อช่วงเวลา RM_{kj} และ RM_{ij} คือต้นทุนราคาวัตถุดิบในเดือน j ของเซต k และ i N_{ij} คือ จำนวนสินค้า i ที่ซื้อในเดือน j

C_i^{RM} และ $C_i^{RM'}$ คือราคาสินค้า i ต่อหนึ่งหน่วยซึ่งเป็นราคาก่อน และหลังทำมลครัน และ C_{truck} คือต้นทุนการเช่ารถรายปีต่อคัน

2.2.1 วิธีแจงนับ (Total Enumeration)

ขั้นตอนการหาคำตอบด้วยวิธีแจงนับ แสดงดังต่อไปนี้

1. ระบुकุมการเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่จะเข้าสู่มลครันที่เป็นไปได้ทั้งหมด
2. เลือกหนึ่งกลุ่มมาพิจารณา โดยพิจารณาทีละเดือน พร้อมกับระบุเหตุการณ์ และความน่าจะเป็นในการเกิดแต่ละเหตุการณ์การขนส่งในแต่ละวัน
3. จัดเส้นทางขนส่งด้วยวิธี Nearest Neighbor ของแต่ละเหตุการณ์ และคำนวณต้นทุนค่าน้ำมัน และจำนวนรถขนส่งที่ต้องใช้ในแต่ละเหตุการณ์
4. เลือกจำนวนรถที่จะใช้ และทดลองเปลี่ยนจำนวนรถที่เลือกไปเรื่อยๆ จนถึง v คัน ซึ่ง v คือจำนวนรถสูงสุดโดยมีจำนวนเท่ากับจำนวนผู้จัดหาวัตถุดิบทั้งหมด เพื่อคำนวณต้นทุนการจ้างรถภายนอก (Outsource)
5. คำนวณค่าคาดหมายต้นทุนการขนส่ง (Expected Transportation) ซึ่งประกอบด้วย ค่าน้ำมัน และการจ้างรถขนส่งภายนอก
6. คำนวณต้นทุนรวมในเดือนนั้นๆ ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุน Tr_{kij} , Inv_{ij} และ RM_{ij} โดย $i \in k, i$
7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3. ถึง 6. จนครบ 12 เดือน แล้วคำนวณ T_{kv} ตามสมการ (1) ทำซ้ำจนครบทุกกลุ่มการเลือกผู้จัดหา

วัตถุดิบ และเลือกกลุ่มการเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบที่มีต้นทุนดำเนินการรวมต่ำสุด

2.2.2 อัลกอริธึม (Heuristic Algorithm)

อัลกอริธึมที่พัฒนามีส่วนช่วยให้เลือกเฉพาะบางกลุ่มมาพิจารณา โดยใช้วิธีการ Greedy Search [11] ที่ใช้ในการแก้ปัญหา Knapsack เนื่องจากรูปแบบของปัญหามีลักษณะคล้ายกับปัญหาของงานวิจัย โดยจะมีการคำนวณต้นทุนราคาสินค้า i ที่ประหยัดได้ต่อวัน ดังสมการที่ (4) เทียบกับค่าขนส่งสินค้า i ต่อวัน ดังสมการที่ (5)

$$\text{Margin}_{ij} = \frac{N_{ij} \times (C_i^{RM} - C_i^{RM'})}{D_j} \quad (4)$$

$$\text{Fix}_i^{\text{Tr}} = C^{\text{Tr}} \times W_i \quad (5)$$

เมื่อ Margin_{ij} คือต้นทุนราคาสินค้า i ที่ประหยัดได้ต่อวันของเดือน j Fix_i^{Tr} คือค่าขนส่งสินค้า i ต่อวัน C^{Tr} คือค่าขนส่งต่อน้ำหนัก และ W_i คือน้ำหนักสินค้า i ที่ขนส่งต่อครั้ง โดยค่าขนส่งที่กล่าวถึงนี้หมายถึงค่าเช่ารถเท่านั้น ขั้นตอนของอัลกอริธึมแสดงดังต่อไปนี้

1. พิจารณาผู้จัดหาวัตถุดิบ i ออกจากระบบ ถ้า $\text{Margin}_{ij} < \text{Fix}_i^{\text{Tr}}$ โดยพิจารณาทีละเดือน
2. จัดผู้จัดหาวัตถุดิบที่ผ่านเกณฑ์ข้อ 1. ลงรถ โดยเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบ i ลงรถ เรียงตาม $\text{Margin}_{ij} - \text{Fix}_i^{\text{Tr}}$ สูงสุดลงรถก่อน จัดไปเรื่อยๆ โดยพยายามให้เต็มความจุรถจนกว่าจะไม่สามารถจัดได้อีกเนื่องจากเกินความจุหรือไม่มีผู้จัดหาวัตถุดิบรายอื่นที่สามารถจัดลงรถได้อีก ถ้า $\text{Margin}_{ij} - \text{Fix}_i^{\text{Tr}}$ เท่ากันให้เลือกสินค้าที่มีน้ำหนักบรรทุกน้อยสุดลงรถก่อน
3. คำนวณผลรวมต้นทุนราคาสินค้าที่ประหยัดของรถคันนั้นว่าน้อยกว่าค่าเช่ารถต่อวันหรือไม่ ถ้าน้อยกว่าให้หยุดจัด และยกเลิกการเลือกกลุ่มนั้น
4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1. ถึง 3. จนครบทุกเดือนจะได้กลุ่มการเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบของแต่ละเดือน
5. เลือก 1 กลุ่มของแต่ละเดือนมาเป็นกลุ่มหลัก แล้วนำไปเทียบกับกลุ่มอื่นๆ ทีละกลุ่ม
6. ปรับเปลี่ยนสมาชิกในกลุ่ม โดยนำสมาชิกในกลุ่มที่มาเทียบซึ่งแตกต่างจากกลุ่มหลักเข้า หรือออกจากกลุ่มหลักเพื่อให้กลุ่มนั้นเหมาะสมกับความต้องการสินค้าตลอดทั้งปี ซึ่งพิจารณาทุกเซตการปรับที่เป็นไปได้ และเลือกผู้จัดหา

วัตถุดิบที่มี $\text{Margin}_i - \text{Fix}_i^{\text{Tr}}$ สูงสุด ในขั้นตอนการปรับนี้จะพิจารณาผลต่าง $\text{Margin}_i - \text{Fix}_i^{\text{Tr}}$ ของสินค้า i เป็นรายปี และยังไม่ได้นำเลือกเข้ามาในรถเพื่อให้รถเต็มคันหรือยกเลิกการเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบบางราย หรือบางกลุ่มออก

7. ทำซ้ำข้อ 3. เลือกกลุ่มที่มีผลรวม $\text{Margin}_i - \text{Fix}_i^{\text{Tr}}$ ต่อปีสูงสุดเป็นคำตอบปัจจุบัน

8. นำคำตอบปัจจุบันไปเทียบกับกลุ่มอื่นๆ โดยพิจารณาตามข้อ 6. และ 7. จนครบทุกกลุ่ม สุดท้ายจะได้กลุ่มที่ดีที่สุดจากการปรับ แล้วจึงนำกลุ่มดังกล่าวไปคำนวณหา T_{kv}

2.3 การจัดเส้นทางไปรับวัตถุดิบรายวัน

รายชื่อผู้จัดหาวัตถุดิบที่เลือกทำมิลค์รัน และจำนวนรถขนส่งที่เช่ารายปีถูกนำมาใช้ในการจัดเส้นทางรายวัน ขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทางรายวัน แสดงดังต่อไปนี้

1. เลือกความต้องการขนส่งที่ต้องดำเนินการในวันพรุ่งนี้
2. จัดเส้นทางขนส่งด้วยวิธี Nearest Neighbor โดยน้ำหนักบรรทุกของรถแต่ละคันต้องไม่เกินความจุรถ และไม่เกินเวลาการทำงานในหนึ่งวัน
3. จัดเส้นทางจนทุกความต้องการขนส่งในวันที่พิจารณาถูกจัดเส้นทาง ถ้ายังมีความต้องการขนส่งที่ยังไม่ถูกจัดลง

รถ แต่รถที่บริษัทเตรียมไว้ไม่พอ ให้จัดเส้นทางขนส่งทำซ้ำข้อ 2 ถึง 3 ด้วยรถขนส่งภายนอก

4. คำนวณเวลาที่รถแต่ละคันต้องเริ่มเดินทางออกจากโรงงาน และต้นทุนการขนส่งที่เกิดขึ้น

3. ผลการทดลอง

การทดลองจะทดสอบกับตัวอย่าง 12 ตัวอย่าง มีจำนวนผู้จัดหาวัตถุดิบที่พิจารณา 10 ราย ตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานผู้จัดหาวัตถุดิบมีการกระจายตัวอย่างสุ่ม (Random) และรวมกลุ่มกัน (Cluster) งานวิจัยนี้ได้นำปัญหา C101 และ R101 ของ Solomon [12] มาใช้ทดสอบเพื่อประเมินวิธีการแก้ปัญหาที่ได้นำเสนอไว้ ซึ่งการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองและตัดสินใจคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบ และจำนวนรถขนส่งที่ต้องเช่าด้วยวิธีแจนนับและฮิวริสติกซึ่งเป็นการประเมินระดับรายปี และส่วนที่ 2 จะนำผลคำตอบที่ได้จากการตัดสินใจรายปีของทั้ง 2 วิธี มาทำการจัดเส้นทางรายวันและประเมินผล ในตารางแสดงผลการทดลอง “T” คือ วิธีแจนนับ “H” คือ ฮิวริสติก ในคอลัมภ์ “ผู้จัดหาวัตถุดิบที่เลือก” รหัส “1” หมายถึง เลือก “0” หมายถึง ไม่เลือก เช่น ถ้าพิจารณาผู้จัดหาวัตถุดิบ 5 คน “11110” หมายถึงเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบคนที่ 1 ถึง 4 ไม่เลือกคนที่ 5 เป็นต้น ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง

ตัวอย่าง	ลักษณะปัญหา		การตัดสินใจรายปี						การตัดสินใจรายวัน				เปอร์เซ็นต์ แตกต่าง ต้นทุนราย ปีของ T
	ตำแหน่งที่ตั้ง		ผู้จัดหาวัตถุดิบที่เลือก		จำนวนรถ		ต้นทุนรวมจากการประเมิน		ต้นทุนรวมรายปี		การจ้างรถ ภายนอก/วัน		
	กระจาย	รวมกลุ่มกัน	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	
1	✓		111111110	111111111	2	3	4,280,944	4,343,916	4,251,473	4,254,203	0.32	0.08	0.06
2	✓		1111111000	111111111	1	2	3,860,089	3,883,685	3,839,750	3,800,153	0.29	0.14	1.03
3	✓		111110111	111111111	2	2	5,299,109	5,300,072	5,196,816	5,156,238	0.36	0.18	0.78
4	✓		111110111	111111011	2	2	5,170,709	5,216,083	5,110,329	5,149,210	0.18	0.18	0.76
5	✓		111111111	111111111	2	2	4,409,152	4,409,152	4,339,154	4,339,154	0.28	0.28	0.00
6	✓		1111111100	1111111110	2	2	4,759,746	4,836,900	4,808,229	4,755,042	0.08	0.19	1.11
7		✓	1111111110	111110111	2	2	4,650,194	4,821,859	4,653,137	4,694,173	0.15	0.3	0.88
8		✓	1111111110	1111111001	2	1	3,718,465	3,939,070	3,784,526	3,894,759	0.13	0.53	2.91
9		✓	111111111	111110111	2	2	5,400,225	5,407,983	5,380,555	5,384,943	0.23	0.07	0.08
10		✓	111111111	1111011101	2	2	4,250,366	4,370,746	4,189,536	4,311,977	0.22	0.04	2.92
11		✓	1111111110	111111111	2	2	4,438,130	4,482,376	4,405,650	4,382,260	0.13	0.29	0.53
12		✓	111111111	111011111	2	2	4,793,401	4,843,223	4,831,771	4,893,253	0.03	0.00	1.27
เปอร์เซ็นต์ผลต่างต้นทุนจากวิธีแจนนับและฮิวริสติก(H-T)							1.50		0.41		0.20		0.19
เปอร์เซ็นต์ผลต่างต้นทุนเมื่อผู้จัดหาวัตถุดิบมีตำแหน่งที่ตั้งกระจายตัวอย่างสุ่มจากวิธีแจนนับและฮิวริสติก(H-T)							0.76		0.33		0.25		0.18
เปอร์เซ็นต์ผลต่างต้นทุนเมื่อผู้จัดหาวัตถุดิบมีตำแหน่งที่ตั้งรวมกันเป็นกลุ่มจากวิธีแจนนับและฮิวริสติก(H-T)							2.26		1.16		0.15		0.21

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ผลต่างต้นทุนรวมโดยเฉลี่ยของปัญหา 12 ปัญหาที่ทดลองหาคำตอบด้วยวิธีแฉงนัับและอีวรืสตุคใให้คำตอบที่ใกล้เคียงกันทั้งในการประเมินในระดับรายปีและรายวัน โดยมีผลต่างของต้นทุนในระดับรายปีประมาณ 1.5 % และระดับรายวัน 0.4 % และต้นทุนที่ประเมินในระดับรายปีก็ใกล้เคียงกับต้นทุนรวมรายปีที่เกิดจากการผลิตในแต่ละวัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาคำตอบทั้ง 2 วิธีสามารถนำมาใช้งานได้จริง แต่ถ้านใสถานการณ่ที่มีจำนวนผู้จัดหาวตุคืบหลายรายที่ต้องตัดสินใจอีวรืสตุคใจะสามารถให้คำตอบที่ยอมรับได้และใช้เวลาในการแก้ปัญหาก็สั้นกว่าวิธีแฉงนัับ

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ผลต่างของต้นทุนที่เกิดจากวิธีแฉงนัับและอีวรืสตุคใ กรณีที่โรงงานผู้จัดหาวตุคืบมีการกระจายตัวแบบสุ่ม พบว่าทั้ง 2 วิธี มีผลต่างของต้นทุนประมาณ 0.33 % ซึ่งอีวรืสตุคใให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีแฉงนัับใสถานการณ่ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ทั้งใด้านต้นทุนและจำนวนการจ้างรถขนส่งเฉลี่ยเพียง 0.18 คันใแต่ละวัน แต่ใกรณีที่มีผู้จัดหาวตุคืบมีตำแหน่งที่ตั้งอยู่รวมตัวเป็นกลุ่ม พบว่าวิธีแฉงนัับให้ต้นทุนรวม และจำนวนการจ้างรถขนส่งภายนอกต่ำกว่าอีวรืสตุคใ เนื่องจากอีวรืสตุคใไม่ได้คำนึงถึงลักษณะตำแหน่งที่ตั้งของผู้จัดหาวตุคืบใขั้นตอนการเลือกผู้จัดหาวตุคืบเข้ามาสู่ระบบมืลคัรืน โดยจะทำการเลือกผู้จัดหาวตุคืบตามกำไรสูงสุดที่จะได้รับจากผู้จัดหาวตุคืบแต่ละราย โดยกำไรที่กล่าวถึง ใพิจารณาจากส่วนต่างของกำไรส่วนลดราคาใสคักรณ่ใทำการขนส่งเองกับค่าใช้จ่ายใการขนส่งที่พิจารณาจากน้ำหนัคใการขนส่งใสคัาแต่ละชนิดเท่านั้น ซึ่งใความเป็นจริงควรคำนึงถึงลักษณะตำแหน่งที่ตั้งโรงงานของผู้จัดหาวตุคืบด้วย โดยควรมีการกำหนดเกณฑ์ด้านอื่นที่ไม่ใช่เพียงผลต่างของกำไรกับค่าขนส่งจากน้ำหนัคใสคัาเท่านั้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] National Science and Technology Development Agency. Available URL: <http://www.nstda.or.th/industry/autoparts-industry>, (19 August 2014).
- [2] Thailand Automotive Institute. "Master Plan for

Automotive Industry 2012-2016," Ministry of Industry Thailand, 2012.

- [3] Automotive Intelligence Unit. Available URL: <http://data.thaiauto.or.th/iau3/>, (22 August 2014).
- [4] Virojana Tantibadaro, "Supplier Selection with Data Envelopment Analysis," Engineering Journal, Chulalongkorn University, Vol.4, 2010.
- [5] Warin Keaitnukul and Sittichai Choetchumalaikit, "An Applied Fuzzy Set Theory to Quality Function Deployment for Supplier Selection: A Case Study of Plastics Pipe Factory," Thai Value Chain Management and Logistics Conference, 2008.
- [6] Rezaei J and Ortt R, "Multi-Criteria Supplier Segmentation Using a Fuzzy Preference Relations Based AHP," European Journal of Operational Research, vol.225, pp.75–84, 2013.
- [7] Z.H. Che and H.S. Wang, "A Hybrid Approach for Supplier Cluster Analysis," Computers and Mathematics with Applications, vol.59, pp.745-763, 2010.
- [8] Chuah K.H and Yingling J.C, "Routing for Just-in-Time Supply Pickup and Delivery System," Transportation Science, vol.39, pp.328-339, 2005.
- [9] Ruiz R., Maroto C and Alcaraz J, "A Decision Support System for a Real Vehicle Routing Problem," European Journal of Operation Research, vol.153, pp.593-606, 2004.
- [10] Peterson B, J.V.H Willem and Kekre S, "Flexible Milk-Run for Stochastic Vehicle Routing," Carnegie Mellon University, 2010.
- [11] George B. and Dantzig, "Discrete-Variable Extremum Problems," Operations Research, Vol. 5, No. 2, pp. 266–288, 1957.
- [12] M. Solomon. Available URL: <http://w.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>, (3 October 2014).

ปัจจัยการกัดที่มีผลกระทบต่อผิวสำเร็จของวัสดุผสมไม้พลาสติก

Influence of Milling Factors on Surface Finish of Wood– Plastic Composites

ธนศ รัตนวิไล¹ พิจิตร พิศสุวรรณ¹ สิริญญา จิรสัมปทา¹ ชาตรี หอมเขียว²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทคัดย่อ

ผลกระทบของปัจจัยการกัด ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนและความลึกในการกัดที่มีต่อผิวสำเร็จของวัสดุผสมไม้พลาสติก (Wood-plastic composites; WPCs) ถูกศึกษาโดยใช้เครื่องกัดแนวตั้งและมีดกัดแบบ Fly cutter ค้ามัด ECMP และเม็ดมีดคาร์ไบด์ พบว่าปัจจัยทั้งสามมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระผิวสำเร็จของ WPCs เมื่อระดับพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สำหรับการปฏิสัมพันธ์ทั้งหมดระหว่างปัจจัยพบว่าผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระผิว WPCs จากสมการถดถอยพบว่าความลึกในการกัดมีผลกระทบมากที่สุด ผลต่างระหว่างค่าจากการทดลองและจากสมการมีค่าเฉลี่ย 4.04% ดังนั้นสมการดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมแปรรูปวัสดุผสมไม้พลาสติก

คำสำคัญ : วัสดุผสมไม้พลาสติก การออกแบบการทดลอง ความขรุขระผิว เครื่องกัด

Abstract

The effect of milling factors including spindle speed, feed, and depth of cut influenced on the surface finish of wood-plastic composites (WPCs) was investigated. The experiments were carried out on a vertical milling machine with fly cutter end mill, ECMP handle, and carbide tool. The experiments were found all factors significantly affected the surface finish. An increase of parameter levels in each factor contributed the clear increasing value of surface finish. The interaction between factors also significantly affected the surface finish. Analysis of regression model revealed that depth of cut was the most effect on surface finish. The mean absolute percentage error of surface finish between experiment and prediction was 4.04%. Therefore, the regression model can be effectively applied in WPCs industries.

Keywords : wood-plastic composites, experimental design, surface roughness, milling machine

1. บทนำ

การกัดถือเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญมาก กระบวนการหนึ่งในการขึ้นรูปชิ้นงานให้มีขนาดและ

รูปร่างถูกต้องตามที่ต้องการ ในกระบวนการกัดชิ้นงาน จะเคลื่อนที่เข้าหามัดตัดเพื่อกำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินออก เพื่อให้วัสดุส่วนที่เหลือมีรูปร่างตามที่ต้องการ ปัจจัย

สำคัญที่ส่งผลต่อการตอบสนองในกระบวนการกัดคือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน ความลึก มุมตัด ชิ้นงานที่ต้องตัดเฉือนและรูปร่างของเครื่องมือตัด ผลที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการกัดคือ ขนาดของชิ้นงาน ความขรุขระผิวชิ้นงาน เศษตัดและการสึกหรอของเครื่องมือตัด จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัด พบว่ามีการศึกษาเป็นจำนวนมาก กุศล พร้อมมูลและคณะ [1] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถภาพของการตัดไม้ในการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราโดยใช้เม็ด Polycrystal diamond; PCD ซึ่งพบว่าที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบ/นาที และอัตราการป้อนตัด 8 เมตร/นาที ทำให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากขุยและมีความเรียบผิวดีที่สุด เทียบเท่ากับผิวชิ้นงานที่ผ่านการขัด ต่อมาผู้วิจัยยังได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราแต่เปลี่ยนวัสดุคมตัดเป็นทั้งสแตนเลสไบต์พบว่าที่ความเร็วรอบ 16,000 รอบ/นาที และอัตราการป้อน 12 เมตร/นาที ทำให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากขุยและมีความเรียบผิวดีที่สุด [2] นอกจากนี้สุภสิทธิ์ รอดขวัญและศิริเพ็ญ สุภาดารัตนาวงศ์ [3] ศึกษาอิทธิพลของความเร็วตัด อัตราการป้อน และความลึกในการตัดไม้ยางพาราที่มีผลต่อความเรียบของผิวชิ้นงาน และความลึกของเม็ดตัดทั้งสแตนเลสไบต์ ซึ่งพบว่าพบว่าสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ผิวชิ้นงานดีที่สุด คือที่ความเร็วรอบ 12,000 rpm อัตราการป้อน 180 ipm และความลึก 0.0625 นิ้ว เช่นเดียวกัน Wang และ Chang [4] วิเคราะห์อิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่อความขรุขระผิว และพบว่าการใช้ น้ำยาหล่อเย็น ในการตัดจะช่วยให้ค่าความขรุขระผิวสำเร็จของชิ้นงานลดลงและปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญคือ ความเร็วการตัด การป้อน ส่วนเว้าของเม็ดและมุมหลบ อย่างไรก็ตาม การศึกษาปัจจัยการกัดที่มีผลกระทบต่อผิวสำเร็จของวัสดุผสมไม้พลาสติกยังไม่พบรายงานการวิจัย

วัสดุผสมไม้พลาสติก (Wood-plastic composites; WPCs) ประกอบด้วยเนื้อวัสดุหลักคือผงไม้และพลาสติก ซึ่งวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ถูกนำมาผสมและขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ เช่น การฉีดเข้าเบ้า การอัดร้อนและการอัดรีด

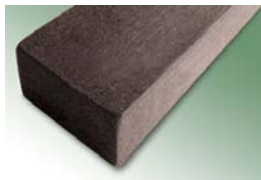
ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ ปัจจุบัน WPCs เข้ามามีบทบาทแทนที่ไม้จากธรรมชาติมากขึ้นในงานเชิงโครงสร้าง เนื่องจากมีสมบัติในการใช้งานที่ดี เช่น ทนทาน แข็งแรง ดูดซึมน้ำน้อยและน้ำหนักเบาตลอดจนราคาถูก นอกจากนี้ยังมีการใช้ในงานวัสดุก่อสร้างเพิ่มมากขึ้นเป็นพิเศษเพราะการให้ความสำคัญเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระแสโลกร้อนและการพิจารณาเรื่องความทนทานในการนำไปใช้งาน จึงทำให้ WPCs เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้นแทนที่วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างแบบเดิมๆ [5] ดังนั้น WPCs จึงถือได้ว่าเป็นวัสดุก่อสร้างที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามในปัจจุบัน WPCs ที่ประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างโดยทั่วไปจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น เช่น ไม้ขนาด 1 นิ้ว $\times$ 2 นิ้ว หรือ 2 นิ้ว $\times$ 4 นิ้ว เป็นต้น ทำให้การนำไปประยุกต์ใช้งานไม่หลากหลายมากนัก การที่จะนำ WPCs ไปใช้ประโยชน์ให้หลากหลายมากขึ้นจำเป็นต้องแปรรูป WPCs ให้มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากไม้พลาสติกทั่วไป และเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานและความต้องการของผู้บริโภคทั้งการลดขนาดหรือการขึ้นรูปให้มีส่วนโค้ง เว้า ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะมีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน ดังนั้นในกระบวนการผลิตหรือการแปรรูป WPCs ให้มีรูปร่างตามที่ต้องการและยังคงให้ผิวสำเร็จที่ดีจึงเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญและจำเป็นต้องศึกษา ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยการกัดที่มีผลกระทบต่อความขรุขระผิว (Ra, ไมโครเมตร) ของ WPCs ได้แก่ ความเร็วรอบ (S, รอบ/นาที) อัตราการป้อน (F, มม./นาที) และความลึกในการกัด (D, มม.) ผลจากการวิจัยครั้งนี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ไม้พลาสติกที่มีผิวชิ้นงานที่ดีและมีคุณภาพจนเกิดการประยุกต์ใช้ WPCs ให้มีความหลากหลายมากขึ้น

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและเครื่องมือในการทดลอง

ชิ้นงานทดสอบ WPCs รุ่น Hybrid wood solid ของบริษัท ไชลูเมท จำกัด (ประเทศไทย) ซึ่งเป็นส่วนผสม

ของผงไม้เนื้อแข็งและพีวีซี โดยมีค่าความเค้นแรงดึง 27 Mpa ค่าร้อยละการยืดของขึ้นทดสอบที่จุดขาด 2 % ค่าความแข็ง 70 shore D อุณหภูมิในการอ่อนตัวของพลาสติก (vicat softening point, VICAT) 88°C และอุณหภูมิการโก่งตัว (heat deflection temperature, HDT) 75°C ชิ้นงานมีพื้นที่หน้าตัด 1 นิ้ว $\times$ 2 นิ้ว (รูป 1(ก)) ใช้มีดกัดแบบ Fly cutter ด้ามมีด ECMP และเม็ดมีดคาร์ไบด์ MPM 120408 ยี่ห้อ Mitsubishi เกรด UTi20T (รูปที่ 1(ข)) ใช้เครื่องกัดแนวตั้งยี่ห้อ Elliott รุ่น Sturdimill 1000 ผลิตในประเทศอังกฤษ (รูปที่ 1(ค)) วัดความขรุขระผิวด้วยเครื่องวัดยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-301 ผลิตในประเทศญี่ปุ่น (รูปที่ 1(ง))



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 1 วัสดุ เครื่องจักรและอุปกรณ์ (ก) ชิ้นงานทดลอง (ข) มีดกัด (ค) เครื่องกัด และ (ง) เครื่องวัดความขรุขระ

2.2 วิธีการทดลอง

ปัจจัยการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และความลึกการกัด โดยมีค่าความขรุขระผิวเป็นตัวแปรตาม โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ชั้น แต่ละชั้นวัด 6 ตำแหน่งในแต่ละสภาวะการกัด แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ (1) ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของแต่ละปัจจัยหลักต่อผิวสำเร็จของ WPCs ด้วย factorial design ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีปัจจัยหลักดังแสดงในตารางที่ 1 และมีเงื่อนไขที่ได้จากการออกแบบการทดลองในตารางที่ 2 และ (2) สร้างสมการทำนายค่าความขรุขระผิวและเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 1 ปัจจัยหลักและพารามิเตอร์ของการทดลอง

ปัจจัย	ต่ำ	กลาง	สูง
ความเร็วรอบ, S (รอบ/นาที)	454	600	845
อัตราการป้อน, F (มม./นาที)	50.8	76.2	101.6
ความลึกการกัด, D (มม.)	0.5	1.0	1.5

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลอง

ลำดับ	S	F	D	Ra (ไมโครเมตร)	
				Mean	S.D.
1	454	50.8	0.5	4.62	0.03
2	845	50.8	1.5	5.66	0.24
3	600	50.8	1	5.45	0.13
4	845	76.2	0.5	4.81	0.04
5	454	101.6	0.5	4.72	0.06
6	845	76.2	1.5	5.80	0.05
7	600	101.6	0.5	5.01	0.03
8	845	76.2	1	5.36	0.03
9	600	76.2	0.5	5.18	0.18
10	845	50.8	1	5.21	0.02
11	454	76.2	1.5	5.43	0.14
12	845	101.6	1	5.50	0.06
13	454	101.6	1	4.85	0.05
14	600	76.2	1.5	6.06	0.10
15	454	50.8	1	4.54	0.12
16	600	50.8	1.5	5.66	0.17
17	600	101.6	1.5	6.42	0.11
18	600	76.2	1	5.68	0.09
19	600	101.6	1	5.94	0.09
20	454	50.8	1.5	5.69	0.10
21	845	101.6	0.5	4.95	0.12
22	845	50.8	0.5	4.69	0.11
23	845	101.6	1.5	6.33	0.05
24	454	76.2	0.5	4.67	0.05
25	600	50.8	0.5	5.19	0.06
26	454	101.6	1.5	5.67	0.10
27	454	76.2	1	4.66	0.05

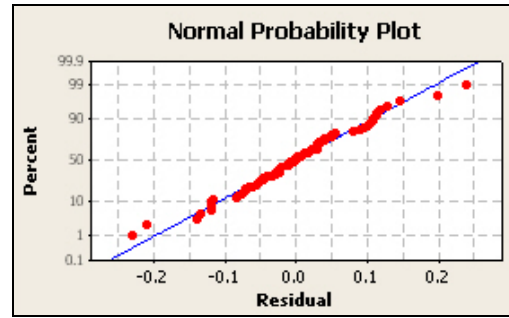
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล

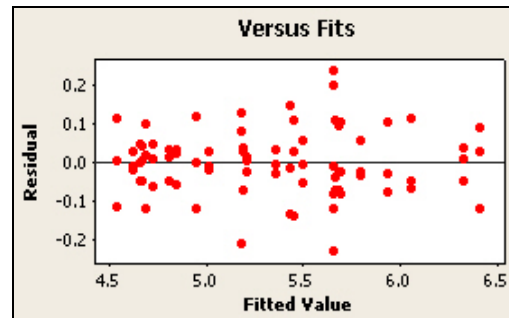
การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลถูกวิเคราะห์ เพื่อยืนยันความพอเพียงและความน่าเชื่อถือของข้อมูล จากการทดลอง รูปที่ 2(ก) แสดงการกระจายที่เป็นปกติ ของข้อมูล เห็นว่าข้อมูลแนบชิดกับเส้นตรง (แสดงเป็น เส้นตรง) และไม่พบค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในการพล็อต [6] ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ รูปที่ 2(ข) แสดงให้เห็นค่า Residuals มีแนวโน้มการกระจายที่ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งถ้า Residuals มีโครงสร้างหรือ แนวโน้มที่แน่ชัดแสดงว่าข้อมูลไม่มีความเหมาะสมต่อ การวิเคราะห์ [6] เช่นเดียวกันค่า Residuals มีการกระจาย รอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูล มีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติ ด้านความเป็นอิสระ ในขณะที่รูปที่ 2(ค) พบว่าทุกจุด ของข้อมูลไม่สามารถคาดการณ์ได้ ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลมีการสุ่มที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ ดังนั้นจากการ วิเคราะห์กราฟทั้ง 3 นี้ สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลจากการ ทดลองมีความพอเพียงและความน่าเชื่อถือ ซึ่งข้อมูลมี การกระจายตัวแบบปกติ มีความเสถียรภาพของข้อมูล และมีความเป็นอิสระต่อกัน

3.2 ผลกระทบของปัจจัยการกีดต่อความขรุขระผิว

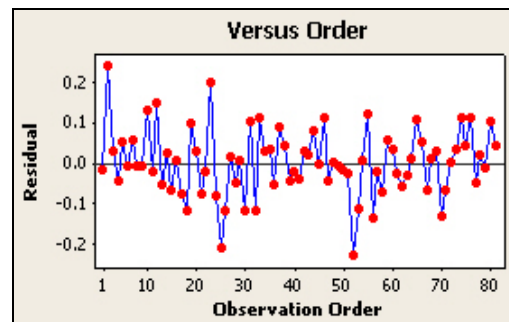
ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางที่ 4) พบว่า R^2 เท่ากับ 97.61% แสดงว่าค่าความขรุขระผิวมีผลกระทบ จากปัจจัยความเร็วรอบ อัตราการป้อนและความลึกการ ตัดสูงถึง 97.61% ส่วนอีก 2.39% เป็นผลจากปัจจัยอื่นที่ ไม่สามารถอธิบายได้ เช่นเดียวกัน Adjusted R^2 มีค่า 96.46% ซึ่งต่ำกว่า R^2 เล็กน้อย แสดงว่าจำนวนข้อมูลใน การทดลองมีเพียงพอ เมื่อวิเคราะห์ ANOVA (Analysis of variance) ที่ระดับนัยสำคัญ 5% ($\alpha=0.05$) โดยมี สมมติฐานหลักคือ ปัจจัยการกีดมีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าผลกระทบของปัจจัยหลัก (S, F, D) ให้ค่า P-value = 0.00 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก สรุปได้ว่าความเร็วรอบ อัตราการป้อนและความลึกการ ตัดมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระผิว เช่นเดียวกันเมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ ระหว่างปัจจัยต่อความขรุขระผิว ได้แก่ S*F S*D และ F*D พบว่าค่า P-value = 0.00 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2 การตรวจสอบข้อมูล (ก) การกระจายแบบปกติ (ข) ความเสถียรและ (ค) ความเป็นอิสระ

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความขรุขระผิว

แหล่งความแปรปรวน	F-test	P-value
S	270.76	0.00
F	59.65	0.00
D	653.65	0.00
S*F	6.02	0.00
S*D	27.72	0.00
F*D	11.96	0.00
S*F*D	7.01	0.00
$R^2 = 97.61\%$, Adjusted $R^2 = 96.46\%$		

สมมติฐานหลัก สรุปได้ว่าผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ ทั้งหมดระหว่างปัจจัยมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อ ความขรุขระผิว นอกจากนี้ผลกระทบของการ

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อความขรุขระผิว ($S \times F \times D$) มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระผิว เช่นกัน

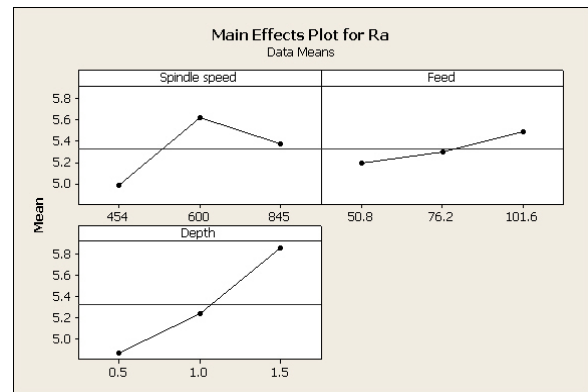
รูปที่ 3 แสดงผลกระทบของระดับพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยหลักต่อความขรุขระผิว พบว่าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 454 เป็น 600 รอบ/นาที ส่งผลให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบที่ใช้ในการตัดสูงขึ้นทำให้ความร้อนบริเวณการตัดชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นตาม [7] ส่งผลให้พลาสติกที่เป็นเนื้อหลักของวัสดุผสมเกิดการหลอมเหลวจึงทำให้ความขรุขระผิวจากผงไม้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 845 รอบ/นาที ทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลงต่ำกว่าที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาทีเล็กน้อย ในส่วนของอัตราการป้อนพบว่า เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้นจาก 50.8 เป็น 76.2 และ 101.6 มม./นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงตามอัตราการป้อนที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับความลึกการตัดส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความลึกการตัดจาก 0.5 เป็น 1.0 และ 1.5 มม. เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนและความลึกการตัดเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราการเอาน้ำออกเพิ่มมากขึ้นตามและส่งผลให้อัตราของการเสียนรูปแบบพลาสติกเพิ่มมากขึ้นด้วย [8] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความร้อนในบริเวณการตัดสูงขึ้นและเกิดการหลอมเหลวของพลาสติกที่สูงตามอัตราการป้อนและความลึกการตัด นอกจากนี้ยังพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อความขรุขระผิวของผิว ได้แก่ $S \times F$, $S \times D$ และ $F \times D$ (รูปที่ 4) ส่งผลให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ของปัจจัยเหล่านี้เพิ่มขึ้น

3.3 การวิเคราะห์สมการถดถอย

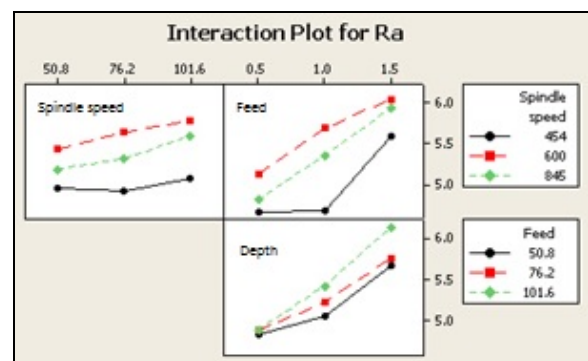
สมการถดถอยที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยการกัด WPCs ต่อความขรุขระผิวถูกแสดงในสมการที่ (1)

$$Ra = 4.01096 + 0.000778234S + 0.00203842F + 1.00122D - 6.69862e-006S \times F - 0.000989581S \times D - 0.0043961F \times D + 1.96605e-005S \times F \times D \quad (1)$$

จากสมการถดถอยพบว่าสัมประสิทธิ์ของทุกปัจจัยหลักมีค่าเป็นบวก หมายถึงพารามิเตอร์ของทุกปัจจัยเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้อง



รูปที่ 3 ผลกระทบแต่ละปัจจัยต่อความขรุขระผิว



รูปที่ 4. ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อความขรุขระผิว

คล่องกับการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ ขณะที่ความลึกการตัดมีผลกระทบต่อความขรุขระผิว WPCs มากที่สุด รองลงมาเป็นอัตราการป้อนและความเร็วรอบตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณของผลกระทบสอดคล้องกับที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้สมการที่ (1) ยังใช้ทำนายความขรุขระผิวที่มีผลกระทบจากปัจจัยการกัด โดยการสุ่มสถานะการกัดให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดคือช่วงความเร็วรอบ 454-845 รอบ/นาที ช่วงอัตราการป้อน 50.8-101.6 มม./นาที และช่วงความลึกการตัด 0.5-1.5 มม. ได้ 9 เงื่อนไขสำหรับการทำนายค่า (ตารางที่ 5) ใช้การหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (mean absolute percentage error : MAPE) ดังสมการที่ 2

$$\%MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right| \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ A_i และ F_i คือค่าความขรุขระผิว (ไมโครเมตร) จากการทดลองและจากสมการที่ (1) ตามลำดับ n คือจำนวนสถานะการทดลอง (ครั้ง) พบว่าผลต่างระหว่างค่าจากการทดลองและจากสมการที่ (1) มีค่าเฉลี่ย 4.04%

ตารางที่ 5 ค่าความขรุขระผิวจากการทดลองและสมการ

ลำดับ	S	F	D	Ra,e	Ra,p	Δ
1	600	101.6	0.5	5	4.86	0.14
2	845	76.2	1.0	5.39	5.49	-0.1
3	454	50.8	1.5	5.8	5.38	0.42
4	845	50.8	1.0	5.23	5.34	-0.11
5	600	76.2	1.5	5.99	5.78	0.21
6	454	101.6	0.5	4.73	4.78	-0.05
7	454	76.2	1.5	5.3	5.63	-0.33
8	600	101.6	1.0	5.91	5.45	0.46
9	845	50.8	0.5	4.71	4.89	-0.18
MAPE						4.04%

โดยที่ Ra,e และ Ra,p คือความขรุขระผิวจากการทดลองและจากสมการ (ไมโครเมตร) ตามลำดับและ Δ คือผลต่างความขรุขระผิวของการทดลองและจากสมการ

4. สรุป

ปัจจัยการกัดได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนและความลึก มีผลกระทบต่อความขรุขระผิวสำเร็จของ WPCs อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อระดับพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ผลกระทบของการปฏิสัมพันธ์ทั้งหมดระหว่างปัจจัยมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระผิวเช่นกัน จากสมการถดถอยพบว่าความลึกมีผลกระทบต่อความขรุขระผิวมากที่สุด รองลงมาเป็นอัตราการป้อนและความเร็วรอบตามลำดับ ในการประยุกต์ใช้สมการถดถอยนั้นต้องเลือกใช้ใบมีดแบบเดียวกันกับการทดลองนี้ รวมถึงใช้ความเร็วรอบ อัตราการป้อนมีดและความลึกในช่วงที่กำหนด หากใช้ค่าที่สูงขึ้นอาจส่งผลต่อผิวสำเร็จที่ได้เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของพลาสติกสุดท้ายพบว่าสมการถดถอยที่ได้สามารถทำนายความขรุขระผิว แตกต่างจากค่าทดลองจริงมีค่าเฉลี่ย 4.04%

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณทีมวิจัยเทคโนโลยีไม้อย่างพาราและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ENG-54-27-11-0137-S)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Prommul, P. Kaewtatip, S. Suwankut, T. Arlai, "Finding the optimal condition of wood cutting using PCD tool", Proceedings of the 16th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand; 2002 Oct 14-16; Phuket, Thailand.
- [2] T. Arlai, P. Kaewtatip, K. Prommul, "Influence of factors in cutting of rubberwood using tungsten carbide", Proceedings of the 17th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, 2003 Oct 15-17, Prachinburi, Thailand.
- [3] R. Supasit, and S. Siripen, "An Investigation of the Effect of Cutting Parameters on Surface Quality and Tool Wear in Parawood Machining Process", Proceedings of the 18th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand; 2004 Oct 18-20; Khonkaen, Thailand.
- [4] M. Y. Wang and H. Y. Chang, "Experimental study of surface roughness in slot end milling AL2014-T6", International Journal of Machine Tools and Manufacturing, vol. 44(1), pp. 51-57, 2004.
- [5] P.M. Smith and M. P. Wolcott, "Opportunities for wood/natural fiber-plastic composites (WPCs) in residential and industrial applications", Forest Products Journal, vol. 56(3), pp. 4-11, 2006.
- [6] D. C. Montgomery, "Design and analysis of experiments", 7th ed. John Wiley & Sons, Inc.; 2009.
- [7] K. V. B. S. Kalyan Kumar and S. K. Choudhury, "Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments", Journal of Materials Processing Technology, vol. 203, pp. 95-101, 2008.
- [8] D. I. Lalwani, N. K. Mehta, P. K. Jain, "Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel", Journal of Materials Processing Technology, vol. 206, pp. 167-179, 2008.

ผลกระทบของอุณหภูมิและประเภทน้ำต่อสมบัติการดูดซับน้ำของ วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา

Effect of Temperatures and Water Types on Water Absorption of Rubberwood Flour-Polypropylene Composites

ชาตรี หอมเขียว^{1*} ธเนศ รัตนวิไล² สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์¹ วรพงศ์ บุญช่วยแทน¹

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ (Materials Processing Technology Research Unit)

* Corresponding Author, E-mail: chatree.h@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของอุณหภูมิและประเภทของน้ำต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพารา ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเป็นชิ้นงานตัวอย่างกระทำโดยการใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ และจากการทดลองพบว่า การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไม้ที่เติมเป็นส่วนผสมและตามเวลาการแช่น้ำที่ยาวนานขึ้น ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำสูงที่สุด คือ 3.91 % และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 25 ถึง 65 °C มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบ นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราที่แช่น้ำทะเลอ่าวไทยมีอัตราการดูดซับน้ำที่ต่ำกว่าการแช่น้ำประปา เช่นเดียวกับการลดลงที่สูงกว่าของค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดเกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบที่ถูกแช่น้ำประปา ซึ่งลดลง 21.9 % และ 37.9 % ตามลำดับ

คำสำคัญ : วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ผงไม้ยางพารา การดูดซับน้ำ อุณหภูมิ

Abstract

This article presents an effect of temperatures and water types on water absorption of recycled polypropylene (rPP) composites reinforced with rubberwood flour (RWF). The composite materials were produced into sample panels by using a twin-screw extruder. According to the test results, water absorption (WA) of the composites increased with RWF content and immersion time. The WA content is highest about 3.91%. An increase of the water temperature levels from 25 to 65 °C significantly increased the WA of the composites. The composites soaked in Thailand Gulf water had smaller water absorption than in tap water. Likewise, reduction in flexural strength and modulus of the composites after immersing in Thailand Gulf water is lower than in tap water, decreasing 21.9% and 37.9%, respectively.

Keywords : Wood-plastic composites, rubberwood flour, water absorption, temperature

1. บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-plastic composites; WPCs) เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่กำลังเติบโตเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ ก่อสร้าง เรือ อีเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค การบิน และอวกาศ [1] เนื่องจากมีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับไม้จากธรรมชาติ เช่น ต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ ความทนทานและต้านทานเชื้อราสูง ความเสถียรทางด้านรูปร่างสูง ดูดซับน้ำน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถนำมารีไซเคิลได้เช่นเดียวกับวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกทั่วไป [1, 2] ดังนั้นแนวโน้มของการประยุกต์ใช้วัสดุชนิดนี้ในอนาคตจะเพิ่มสูงขึ้น

การประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติกำลังได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมวัสดุเชิงประกอบพลาสติก เนื่องจากมีข้อดีจำนวนมาก เช่น สามารถรีไซเคิลได้ ราคาถูก ไม่ส่งผลให้เครื่องจักรเกิดการสึกหรอ และบริโภคพลังงานต่ำในการขึ้นรูป เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน [1, 3] นอกจากนี้ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีทรัพยากรทางธรรมชาติเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะทรัพยากรที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ เช่น แกลบข้าว ใบมะพร้าว ทะลายปาล์มน้ำมัน และขี้เลื่อยไม้ยางพารา เป็นต้น ต้นยางพาราถือได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เพราะให้ผลผลิตเป็นน้ำยางพาราเพื่อการแปรรูปและการส่งออก อย่างไรก็ตามเมื่อต้นยางมีอายุประมาณ 25 ปี จะถูกตัดเพราะให้ผลผลิตที่ไม่คุ้มค่าต่อการปลูกต่อไป ดังนั้นจึงเกิดขี้เลื่อยจากการตัดในกระบวนการต่างๆ จำนวนมาก และขี้เลื่อยเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้พลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ Homkhiew และคณะ [4] ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา และพบว่าค่ามอดูลัสการดัดและค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงตามปริมาณผงไม้ที่เติมเป็นส่วนผสม Rimdusit และคณะ [5] ศึกษาผลกระทบของขนาดผงไม้ยางพาราต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าขนาดผงไม้ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบมีขนาดประมาณ 200-300 μm

การใช้เส้นใยธรรมชาติมีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ แต่ธรรมชาติของเส้นใยเป็นวัสดุที่มีความสามารถดูดซับน้ำสูง ทำให้มีผลกระทบทางลบต่อสมรรถนะของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ [6] ซึ่งจะจำกัดความสามารถการประยุกต์ใช้งานของวัสดุเชิงประกอบ เช่นเดียวกันอุณหภูมิและประเภทของน้ำถือเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบ เพราะน้ำแต่ละประเภทมีองค์ประกอบและความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถการแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างวัสดุเชิงประกอบไม่เท่ากัน ดังนั้นผลกระทบของอุณหภูมิและประเภทน้ำต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบจำเป็นต้องศึกษาเมื่อมีการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบขึ้นมาใหม่ วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือ ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและประเภทของน้ำต่อสมบัติการดูดซับน้ำ และสมบัติการคัดของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพารา

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

ผงไม้จากต้นยางพารา (Rubberwood flour; RWF) ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในเมทริกซ์พลาสติก ซึ่งผงไม้เหล่านี้ได้รับมาจากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราในจังหวัดสงขลา (ประเทศไทย) และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (Recycled polypropylene; rPP)เกรด WT170 ถูกนำมาใช้ในการวิจัย ซึ่งจัดซื้อจากบริษัท วิทยาอินเตอร์เทรด จำกัด (ประเทศไทย) นอกจากนี้สารคู่ควบคือ Maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผงไม้และเมทริกซ์พลาสติก ซึ่งจัดซื้อจากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด (USA) สารหล่อลื่นที่ใช้เพิ่มความสามารถในการผลิตคือ พาราฟินแว็กซ์ ซึ่งจัดซื้อจากบริษัท Nippon Seiro จำกัด (Japan) และสารต้านทานรังสียูวีที่เลือกใช้คือ Hindered amine light stabilizer (HALS) มีชื่อการค้า MEUV008 ซึ่งได้รับจากบริษัท ทีเอช คลัลเลอร์ จำกัด (ประเทศไทย)

2.2 การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง

ก่อนนำผงไม้ยางพาราไปใช้เป็นส่วนผสม ผงไม้เหล่านี้ถูกร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 180

μm และถูกอบในเตาอบที่อุณหภูมิ $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นในผงไม้ จากนั้นนำพอลิโพรพิลีน ผงไม้ยางพารา สารกักเก็บ สารหล่อลื่น และสารต้านทานรังสียูวีตามอัตราส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 1 ใส่ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (รุ่น SHJ-36 จากบริษัท เอ็นแมช จำกัด ประเทศไทย) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง $130\text{--}190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเร็วของเกลียวหนอนที่หมุน 50 รอบต่อนาที หลังจากนั้นวัสดุเชิงประกอบถูกอัดผ่านหัวขึ้นรูปขนาด $9\text{ มม.} \times 22\text{ มม.}$ และระบายความร้อนในอากาศ

ตารางที่ 1 สูตรวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

Sample code	rPP (%)	RWF (%)	MAPP (%)
rPP70RF25	70	25	3
rPP60RF35	60	35	3
rPP50RF45	50	45	3

หมายเหตุ: ทุกสูตรมีการผสมสารหล่อลื่น 1 % และสารต้านทานรังสียูวี 1%

2.3 การทดสอบการดูดซับน้ำ

การทดสอบการดูดซับน้ำเป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D570-88 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด $4.8\text{ มม.} \times 13\text{ มม.} \times 26\text{ มม.}$ ก่อนการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างถูกอบที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นในชิ้นงาน และชั่งน้ำหนักทันทีด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม และวัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่มีความละเอียด 0.01 มม. จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่ในน้ำประปา (Tap water) และน้ำทะเลอ่าวไทย (Thailand Gulf water) ที่อุณหภูมิ 25, 35, 45, 55 และ $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ หลังจากครบเวลา 2 และ 24 ชั่วโมง ชิ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำ ถูกซับน้ำด้วยกระดาษทิชชู และถูกชั่งน้ำหนักทันทีเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก ในแต่ละสูตรและเงื่อนไขการทดลองมีการทดสอบซ้ำ 5 ตัวอย่าง

2.4 การทดสอบสมบัติการดัด

การทดสอบดัดเป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด (Three-point flexure test) โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ค้อนสตรอน รุ่น 5582 (Massachusetts, USA) และปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D790-92 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด $4.8\text{ มม.} \times 13\text{ มม.} \times 100\text{ มม.}$ ระยะห่างของบารองรับชิ้นงาน (Span) มีระยะ 80 มม. ความเร็วที่ใช้ทดสอบคือ 2 มม.ต่อนาที และทดสอบในอุณหภูมิ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้ก่อนการแช่

น้ำชิ้นงานตัวอย่างถูกอบที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบดัดเพื่อวัดค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสการดัด และค่าความเครียดสูงสุด ของชิ้นงาน หลังจากถูกแช่น้ำเป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 สัปดาห์ เนื่องจากเมื่อชิ้นงานถูกแช่นานกว่า 6 สัปดาห์ การลดลงในค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสไม่มีนัยสำคัญ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองและสูตรมีการทดสอบซ้ำ 5 ตัวอย่าง

2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยา

การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ถูกกระทำโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น Quanta 400 (Oregon, USA) ก่อนการส่องด้วย SEM ชิ้นงานถูกอบที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และถูกเคลือบด้วยทองคำบริเวณผิวหน้าที่แตกหัก

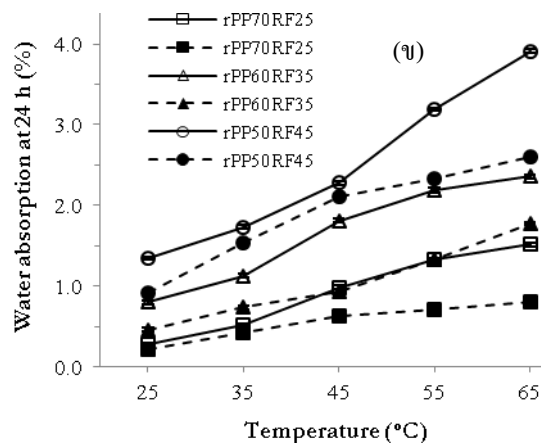
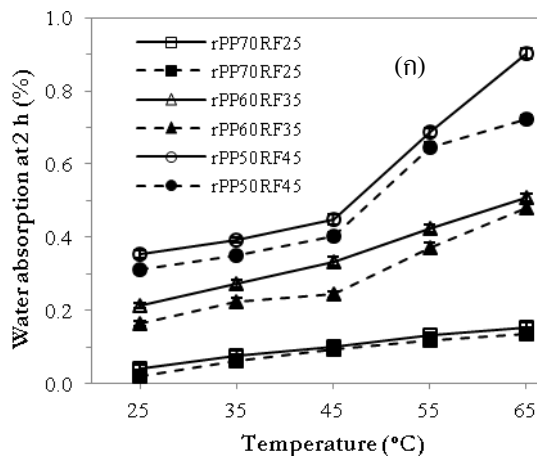
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมบัติการดูดซับน้ำ

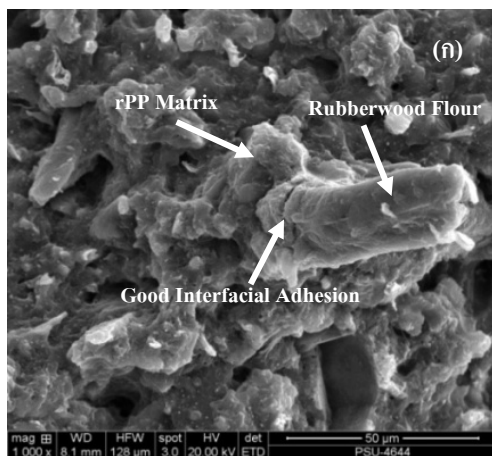
การดูดซับน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ [7] ผลทดสอบการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราแสดงในรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) ซึ่งเป็นผลการแช่น้ำระยะเวลา 2 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ โดยทั่วไปการเติมผงไม้เป็นส่วนผสมวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น และในงานวิจัยนี้เช่นกันพบว่า เมื่อเติมผงไม้เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นทำให้วัสดุเชิงประกอบดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มขึ้นของ Free OH groups ในเซลลูโลสของไม้ ซึ่งขั้วของ Free OH groups เหล่านี้ทำปฏิกิริยากับขั้วโมเลกุลน้ำ ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น [8, 9] เช่นเดียวกับการยึดเกาะภายในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบมีผลต่อการดูดซับน้ำอีกด้วย วัสดุที่มีการกระจายตัวของผงไม้ในเมทริกซ์พลาสติกสม่ำเสมอและมีการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์กับผงไม้ที่แน่นหนา มีความสามารถดูดซับน้ำที่ต่ำจากเหตุผลนี้พิสูจน์ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยาดังแสดงในรูปที่ 2 รูป 2(ก) แสดงโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบที่เติมผงไม้ 25% ซึ่งพบว่ามีรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างเพียงเล็กน้อยและมีการยึดเกาะระหว่างพลาสติก

กับผงไม้ที่แน่นหนาแน่นกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติมผงไม้ 45% ดังแสดงในรูป 2(ข) นอกจากนี้พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุถูกแช่นานขึ้น โดยทั่วไปการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งผงไม้ดูดซับน้ำจนอิ่มตัว [9]

รูปที่ 1(ก) และ 1(ข) แสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบเช่นกันหลังจากถูกแช่



รูปที่ 1 ผลกระทบของอุณหภูมิและประเภทน้ำต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราหลังจากถูกแช่น้ำเป็นระยะเวลา (ก) 2 ชั่วโมง และ (ข) 24 ชั่วโมง



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่เติมผงไม้ยางพารา (ก) 25% และ (ข) 45% ที่กำลังขยาย 1000×

3.2 ผลกระทบของประเภทน้ำต่อสมบัติการดูดซับน้ำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ส่วนใหญ่ถูกประยุกต์ใช้งานในสภาวะน้ำจืดและน้ำทะเล และผลกระทบของประเภทน้ำเหล่านี้ต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราถูกแสดงในรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) วัสดุเชิงประกอบ

น้ำเป็นระยะเวลา 2 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งพบว่า การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 65 °C สิ่งนี้เป็นเพราะโมเลกุลของเมทริกซ์พลาสติกเกิดการขยายตัวขึ้น เมื่อพลาสติกอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นโมเลกุลของน้ำจึงสามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เป็นผงไม้ได้ง่ายขึ้น

ที่ถูกแช่ในน้ำประปาแสดงการดูดซับน้ำที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ถูกแช่ในน้ำทะเลอ่าวไทย สิ่งนี้เป็นเพราะความหนาแน่นของน้ำทะเลอ่าวไทย (1.018 g/cm³) มีค่าสูงกว่าน้ำประปา (1.001 g/cm³) เช่นเดียวกัน Najafi และ Kordkheili [10] รายงานว่า ความหนาแน่นของ Persian Gulf water (1.024 g/cm³) และ Caspian Sea water

(1.015 g/cm^3) มีค่าสูงกว่าน้ำกลั่น (1.000 g/cm^3) ดังนั้น น้ำประปาซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าจึงสามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบได้ดีกว่าน้ำทะเล ส่งผลให้มีการดูดซับน้ำที่สูงกว่า นอกจากนี้ในรูปที่ 1(ข) พบด้วยว่าที่อุณหภูมิ 25°C ประเภทน้ำมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่เติมผงไม้อ 25% สิ่งนี้เป็นไปได้ว่าความสามารถแทรกซึมของน้ำทั้งสองชนิดเข้าสู่โครงสร้างวัสดุเชิงประกอบไม่แตกต่างกันที่อุณหภูมิและปริมาณผงไม้อต่ำ อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิและปริมาณผงไม้อสูง พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่แช่ในน้ำประปาดูดซับน้ำสูงกว่าที่แช่ในน้ำทะเลอย่างชัดเจน เพราะวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณผงไม้อสูงกว่าสามารถดูดซับน้ำที่มีความหนาแน่นต่ำได้ง่ายและรวดเร็วกว่า โดยเฉพาะเมื่อโครงสร้างเกิดการขยายตัวหรือบวมเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ

3.3 ผลการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบต่อสมบัติการตัด

การวิเคราะห์การลดลงของค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้อย่างพาราถูกแสดงในรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ ซึ่งวัสดุถูกแช่ในน้ำประปาและน้ำทะเลอาวไทยเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ วัสดุเชิงประกอบที่แช่ในน้ำทะเลมีการลดลงของค่าความแข็งแรงดัดและมอดูลัสน้อยกว่าที่แช่ในน้ำประปาตามเวลาการแช่น้ำที่ยาวนานขึ้น เพราะน้ำประปาสามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบได้ง่ายกว่าน้ำทะเลอาวไทย เมื่อโมเลกุลของน้ำแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างวัสดุเชิงประกอบ ผงไม้อยู่ภายในโครงสร้างเกิดการขยายตัว แต่เมทริกซ์พลาสติกไม่ขยายตัว ส่งผลให้เมทริกซ์ที่ห่อหุ้มผงไม้อเกิดการแตกร้าวภายในโครงสร้าง ทำให้สูญเสียความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างผงไม้อและเมทริกซ์ [11, 12] ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบที่ดูดซับน้ำสูงกว่าจึงมีการสูญเสียความสามารถการยึดเกาะระหว่างวัสดุที่สูงกว่า

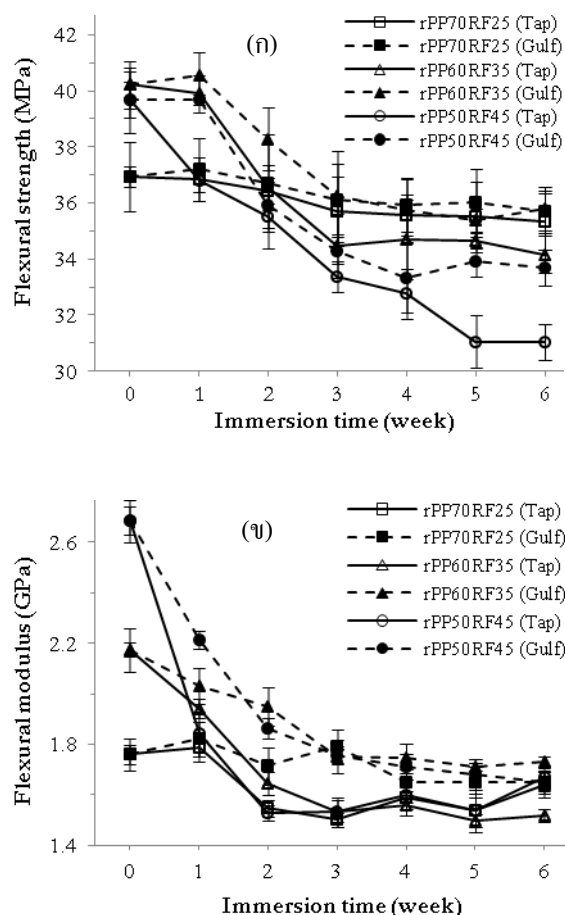
นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบลดลงตามอัตราและเวลาการดูดซับน้ำทั้งในน้ำประปาและน้ำทะเลอาวไทย และวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่มีการเติมผงไม้อในปริมาณที่สูง (35% และ 45%) มีการลดลงของค่าทั้งสองอย่างชัดเจน สิ่งนี้เป็นเพราะวัสดุเชิงประกอบมีความสามารถดูดซับน้ำที่สูงขึ้น

และโมเลกุลของน้ำลดความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างผงไม้อและเมทริกซ์พลาสติก [11] เช่นเดียวกันหลังจากวัสดุเชิงประกอบถูกแช่น้ำเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ ค่าความแข็งแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบที่เติมผงไม้อ 35% และ 45% ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากนั้นเกิดการคงที่ เนื่องจากแนวการแตกร้าวหรือกลไกการแตกร้าวของโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบ [13] เช่นเดียวกันค่ามอดูลัสถูกพบด้วยว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญหลังจากวัสดุเชิงประกอบถูกแช่น้ำเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นคงที่หลังจากถูกแช่น้ำเป็นเวลา 2 และ 3 สัปดาห์ สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เติมผงไม้อ 35% และ 45% ตามลำดับ สิ่งนี้เกิดจากเมื่อผงไม้อเปียกจะเกิดการอ่อนตัว ส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบลดลง [12] ในทางตรงกันข้าม รูปที่ 4 แสดงการเพิ่มขึ้นในค่าความเครียดสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบตามปริมาณผงไม้อที่เติม เวลา และการดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้น ในช่วง 3 สัปดาห์แรก ค่าความเครียดสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากนั้นคงที่เพราะผงไม้อในโครงสร้างเกิดการอ่อนตัวเมื่อเปียกน้ำ [12]

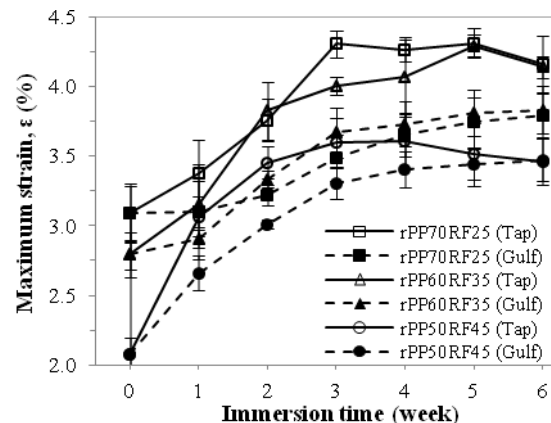
4. สรุป

ผลกระทบของอุณหภูมิและประเภทน้ำต่อสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้อย่างพาราถูกศึกษา ซึ่งพบว่าวัสดุเชิงประกอบมีการเปลี่ยนแปลงในสมบัติทางกายภาพและทางกล เนื่องจากการดูดซับน้ำ วัสดุเชิงประกอบดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไม้อที่เติมเป็นส่วนผสมและเวลาที่แช่น้ำ เพราะผงไม้อดูดซับโมเลกุลน้ำ ขณะที่พลาสติกแทบจะไม่ดูดซับน้ำ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 25 ถึง 65°C ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ น้ำ เนื่องจากการขยายตัวของโมเลกุลพลาสติก และวัสดุเชิงประกอบที่แช่ในน้ำทะเลอาวไทยดูดซับน้ำต่ำกว่าที่แช่ในน้ำประปา เพราะน้ำทะเลอาวไทยมีความหนาแน่นที่สูงกว่าน้ำประปา ส่งผลให้ความสามารถการแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างวัสดุเชิงประกอบเป็นไปได้ยากกว่า เช่นเดียวกันวัสดุเชิงประกอบที่แช่ในน้ำทะเลมีการลดลงของค่าความแข็งแรงดัดและมอดูลัสต่ำกว่าวัสดุที่แช่ในน้ำประปา เนื่องจากการดูดซับน้ำที่ต่ำกว่า นอกจากนี้พบด้วยว่า ค่าความแข็งแรงดัดและมอดูลัสลดลงตามปริมาณการดูดซับ

น้ำ แต่ทว่าค่าความเครียดสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามเวลาการแช่น้ำ สุดท้ายข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวิจัยนี้จะ เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาสมรรถนะทางวิศวกรรมของ วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ และการประยุกต์ใช้วัสดุ เชิงประกอบในสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร



รูปที่ 3 ผลกระทบของเวลาการแช่น้ำต่อ (ก) ค่าความแข็งแรงดัด และ (ข) ค่ามอดูลัสการดัดของวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณผงไม้ยางพารา ต่างๆ



รูปที่ 4 ผลกระทบของเวลาการแช่น้ำต่อค่าความเครียดสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณผงไม้ยางพาราต่างๆ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Homkhiew, "Development and Applications of Natural Fiber/Thermoplastic Composites for Industrial," *Journal of Industrial Technology*, Vol. 10, pp. 97-110, 2014.
- [2] C. Clemons, "Wood-Plastic Composites in the United States," *Forest Products Journal*, Vol. 52, pp. 10-18, 2002.
- [3] Y. Xie, C.A.S. Hill, Z. Xiao, H. Militz, "Silane Coupling Agents Used for Natural Fiber/Polymer Composites: A Review," *Composites: Part A*, Vol. 41, pp. 806-819, 2010.
- [4] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, W. Thongruang, "Composites from Recycled Polypropylene and Rubberwood Flour: Effects of Composition on Mechanical Properties," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 28, pp. 179-194, 2015.
- [5] S. Rimdusit, W. Smittakorn, S. Jittarom, S. Tiptipakorn, "Highly Filled Polypropylene Rubber Wood Flour Composites," *Engineering Journal*, Vol. 15, pp. 17-30, 2011.
- [6] D.D. Stokke, D.J. Gardner, "Fundamental Aspects of Wood as a Component of Thermoplastic Composites," *Journal of Vinyl and Additive Technology*, Vol. 9, pp. 96-104, 2003.
- [7] T. Ratanawilai, P. Lekanukit, S. Urapantamas, "Effect of Rubberwood and Palm Oil Content on the Properties of Wood-Polyvinyl Chloride Composites," *Journal of Thermoplastic Compos Mater*, Vol. 27, pp. 719-730, 2014.
- [8] K.B. Adhikary, S. Pang, M.P. Staiger, "Long-Term Moisture Absorption and Thickness Swelling Behaviour of Recycled Thermoplastics Reinforced with Pinus Radiata," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 142, pp. 190-198, 2008.
- [9] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, "Optimal Proportions of Composites from Polypropylene and Rubberwood Flour after Water Immersion Using Experimental Design," *KKU Research Journal*, Vol. 19, pp. 780-793, 2014.
- [10] S.K. Najafi, H.Y. Kordkheili, "Effect of Sea Water on Water Absorption and Flexural Properties of Wood-Polypropylene Composites," *European Journal of Wood and Wood Products*, Vol. 69, pp. 553-556, 2011.
- [11] T.T. Law, Z.A.M. Ishak, "Water Absorption and Dimensional Stability of Short Kenaf Fiber-Filled Polypropylene Composites Treated with Maleated Polypropylene," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 120, pp. 563-572, 2011.
- [12] S. Tamrakar, R.A. Lopez-Anido, "Water Absorption of Wood Polypropylene Composite Sheet Piles and its Influence on Mechanical Properties," *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 3977-3988, 2011.
- [13] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, W. Thongruang, "Long-Term Water Absorption and Dimensional Stability of Composites from Recycled Polypropylene and Rubberwood Flour," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, DOI: 10.1177/0892705713518789.

การศึกษารูปแบบป้ายทะเบียนรถยนต์ รถบรรทุกและจักรยานยนต์ ที่ เหมาะแก่การจดจำ เพื่อรองรับการเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน

Study on Pattern of License Plate of Car, Trucks and Motorcycles for Visual Recognition, to Support the AEC.

สุพจน์ ศรีนิล แหลมทอง เหล่าคงถาวร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การเปิดประชาคมเศรษฐกิจอาเซียนในปลายปี พ.ศ. 2558 จะมีผลทำให้มีรถวิ่งข้ามแดนระหว่างประเทศสมาชิกจำนวนมาก ดังนั้นการปรับปรุงระบบเลขทะเบียนรถให้มีความเป็นสากลจึงมีความสำคัญ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบป้ายทะเบียน 5 แบบที่พัฒนาให้มีหมวดหมู่ภาษาอังกฤษ รหัสพื้นที่ และรหัสประเทศ เพื่อรองรับการเปิดประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน โดยทำการทดสอบการอ่านออกได้และการจดจำหมายเลขทะเบียน มีจำนวนผู้สังเกต 37 สังเกตรถที่ติดป้ายทะเบียนจำลองแต่ละแบบ วิ่งด้วยความเร็ว 40-45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า ป้ายทะเบียนรถยนต์ ที่มีการขยายขนาดความกว้างและความยาวเพิ่มขึ้น ให้ค่าการอ่านได้และการจดจำเลขทะเบียนดีที่สุด ป้ายทะเบียนรถบรรทุก และ รถจักรยานยนต์ ที่มีขนาดป้ายทะเบียนเท่าเดิม เมื่อมีการเพิ่มระบบเลขทะเบียนภาษาอังกฤษเข้าไปแล้ว ให้ค่าการอ่านได้และการจดจำเลขทะเบียนอยู่ในระดับดีมาก

คำสำคัญ : ป้ายทะเบียน, ยานพาหนะ, ระบบเลขทะเบียน, ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน

Abstract

The Asian Economic Community, AEC, will begin at the end of year. Thailand is one of AEC member, needs to prepare many aspects to support AEC. When AEC starts, it influences to increase transportation running across border between adjacent countries. So license plate which is needed for car recognition must be easily understood for all countries member. Thai license plate must be necessarily developed to be international pattern. By these reasons, the objectives of this research are to study 5 patterns of license plate which are included English prefix, area code and country code to support AEC participation. The study was done by legibility and recognition testing for 5 license plates. The car mounted with each patterned license plates passed through 37 observers by 40-45 kilometers/hour. Results of this study show that license plate no.3 which is wider and longer size, allows best legibility and recognition. The license plate of trucks and motorcycles with the same size as current license plate also allow best legibility and recognition even though are added English prefix, area code and country code.

Keywords : License plate, Vehicles, Legibility, AEC.

1. บทนำ

การเปิดประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (Asian Economic Community, AEC) ในปลายปี พ.ศ. 2558 มีผลทำให้มีรถจากประเทศไทย และ ประเทศในกลุ่มสมาชิก AEC วิ่งข้ามแดนจำนวนมาก ดังนั้นป้ายทะเบียนที่มีคุณภาพและมีความเป็นสากล จึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อปริมาณการสัญจรและการขนส่งที่จะเกิดขึ้นมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจต่อไป ดังนั้นป้ายทะเบียนของยานพาหนะจึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับการสัญจรข้ามพรมแดนที่จะเกิดขึ้นนี้ เพราะป้ายทะเบียนถูกใช้ในการระบุตัวยานพาหนะ และผู้เป็นเจ้าของยานพาหนะ ทั้งในเรื่องของการทำธุรกรรมทางกฎหมาย การระบุผู้กระทำผิดโดยใช้ยานพาหนะ และอุบัติเหตุ

ในอนาคตป้ายทะเบียนรถของประเทศไทย ต้องถูกปรับให้มีความเป็นสากล แต่ขณะเดียวกันก็ยังคงคงความเป็นเอกลักษณ์ของความเป็นไทย ซึ่งในปัจจุบันป้ายทะเบียนรถของประเทศไทย ใช้ระบบเลขทะเบียน 2 ตัวนำหน้าตัวเลข 4 ตัว ในกรณีที่มีการเพิ่มข้อมูลบนป้ายทะเบียนรถเพื่อให้มีความเป็นสากลจะมีผลต่อการอ่านออกได้ และการจดจำอย่างไร สุพจน์ ศรีนิล และ คณะ [1] ได้ทำการศึกษาการอ่านได้และการจดจำหมายเลขทะเบียนรถชนิดแบบต่างๆ ที่มีการเพิ่มอักษรภาษาอังกฤษ แต่ยังไม่ได้มีงานศึกษาใดที่ศึกษาถึงผลการอ่านได้ และการจดจำป้ายทะเบียนของป้ายทะเบียนรถบรรทุกและรถจักรยานยนต์

2. วัตถุประสงค์

เพื่อการจดจำของป้ายทะเบียนของรถชนิด รถบรรทุก และ รถจักรยานยนต์ ที่มีการเพิ่มข้อความภาษาอังกฤษเข้าไปเพื่อรองรับการเปิด AEC

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ความเป็นมาของแผ่นป้ายทะเบียนรถ

ป้ายทะเบียนแผ่นแรกเกิดขึ้นที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในฟิลาเดเฟีย ค.ศ.1850 สำหรับใช้กับรถม้าลาก โดยมีข้อกำหนดเพียงว่าจะต้องเป็นตัวเลขที่มีความสูงไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว ซึ่งตัวเลขเหล่านี้มีไว้สำหรับระบุเพื่อรายงานเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการจับที่ที่ไม่เหมาะสม

ในปี ค.ศ. 1901 นิวเจอร์ซีย์ ได้กลายเป็นรัฐแรกที่มีการกำหนดให้แสดงเลขทะเบียนบนยานพาหนะ ในปี ค.ศ. 1903 แมซซาชูเซต ได้เป็นรัฐแรกในการใช้แผ่นป้ายทะเบียนแบบกว้าง และรัฐอื่นได้ใช้ตามมา แต่ก็ยังมีรูปแบบที่แตกต่างกัน จนกระทั่งปี ค.ศ. 1956 ผู้ผลิตรถยนต์ได้ร้องขอให้ใช้แผ่นป้ายทะเบียนขนาด 12"x6" เพื่อให้สอดคล้องและสามารถติดตั้งได้กับรถยนต์ที่ผลิต

3.2 ประวัติป้ายทะเบียนรถในประเทศไทย [2]

ป้ายทะเบียนรถเกิดขึ้นพร้อมกับกฎหมายว่าด้วยรถยนต์ฉบับแรก คือ พระราชบัญญัติรถยนต์โกสินทร์ศก. 128 (พ.ศ. 2452) ซึ่งตรงกับสมัยรัชกาลที่ 5 โดยมีเจตนารมณ์เพื่อต้องการควบคุมรถ และทราบว่าเป็นเจ้าของรถ และเพื่อประโยชน์ในการจัดเก็บภาษี ถึงแม้ว่าจะมีป้ายทะเบียนรถเกิดขึ้นตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 5 แต่ตามหลักฐานได้มีการออกกฎหมายของกระทรวงครั้งแรกเริ่มมีป้ายทะเบียนรถตั้งแต่ปี พ.ศ. 2510 โดยรูปแบบเป็นแบบ กท. เรียงตั้ง มีหมวดตัวอักษร และตัวเลขอยู่ในแผ่นป้ายขนาดมาตรฐานกว้าง 11 ซม. ยาว 39 ซม. พื้นหลังเป็นสีดำน ต่อมาในปี พ.ศ. 2518 มีการเปลี่ยนจากรูปแบบ กท. เรียงตั้งเป็นแบบเรียงตามแนวนอน มีการเปลี่ยนขนาดแผ่นป้ายเป็นกว้าง 15 ซม. ยาว 30 ซม. และพื้นหลังเป็นสีขาว ในปี พ.ศ. 2526 กระทรวงมหาดไทยได้ดำเนินการเปลี่ยนจากตราโล่เป็นตัวย่อ ขส อย่างที่เราเห็นกันในปัจจุบัน และได้มีการเปลี่ยนงานรับผิดชอบดูแลป้ายทะเบียนรถจากกระทรวงมหาดไทยมาเป็นของกระทรวงคมนาคม ในปี พ.ศ. 2531 ซึ่งรูปแบบทะเบียนรถยังคงเหมือนเดิมทุกประการ การเปลี่ยนแปลงครั้งสำคัญเริ่มขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2539 โดยมีการเพิ่มจำนวนตัวอักษรเป็น 2 ตัว เช่น กก-9999 รวมทั้งเปลี่ยนขนาดแผ่นป้ายให้ยาวขึ้น จากขนาดยาว 30 ซม. เป็นยาว 34 ซม. เนื่องจากมีการเพิ่มตัวอักษรขึ้นมาอีก 1 ตัว ต่อมา มีการแก้ไขชื่อจังหวัดจากชื่อเดิม เช่น กรุงเทพมหานคร เป็น กทม จังหวัดเชียงใหม่ เป็น ชม ใน ปี พ.ศ. 2540 แต่ใช้ได้เพียง 1 ปี ก็ต้องกลับมาใช้ชื่อจังหวัดแบบเดิม เนื่องจากมีปัญหาในด้านการมองเห็น เช่น ตัวอักษรตัวเล็ก ไปบ้าง มองเห็นไม่ชัดบ้าง และบางที่ไม่ทราบตัวอักษรย่ออันเป็นตัวย่อของจังหวัดใด

3.3 การศึกษารูปแบบแผ่นป้ายทะเบียน

Al-Haboubi [3] ได้ศึกษาเรื่องการออกแบบแผ่นป้ายทะเบียนของประเทศซาอุดีอาระเบีย ซึ่งเดิมใช้ป้ายทะเบียนแบบ ตัวเลข 7 หลัก ที่แสดงถึงจำนวนรถยนต์ที่จดทะเบียน ซึ่งยากต่อการอ่าน และการจดจำได้ในเวลาอันสั้น อย่างเช่น ในกรณีเกิดอุบัติเหตุชนแล้วหนี ในการศึกษาได้นำเสนอให้ใช้ ระบบป้ายทะเบียนแบบ 3 ตัวอักษร และ 3 ตัวเลข โดยระบบนี้จะทำให้ได้แผ่นป้ายทะเบียนเกือบ 20 ล้านหมายเลข ซึ่งจะครอบคลุมถึงจำนวนรถที่จะจดทะเบียนได้ถึงปี 2012 โดยทำการทดสอบการจดจำหมายเลขทะเบียนรถ กับ ผู้เข้าร่วมทดสอบที่เป็นชาย วุฒิ ปริญญาตรี จำนวน 60 คน โดยใช้คอมพิวเตอร์แสดงหมายเลขบนแผ่นป้ายทะเบียนแบบสุ่ม และระยะเวลาแสดงภาพป้ายทะเบียนเท่ากับ 1, 2 และ 3 วินาที หรือเท่ากับรถวิ่งด้วยความเร็ว 105 kph, 53 kph และ 35 kph ตามลำดับ โดยอักษรบนแผ่นป้ายทะเบียนเป็นอักษรภาษาอังกฤษหมด (แม้ว่าภาษาประจำชาติจะเป็นภาษาอารบิก โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่า คนซาอุดีอาระเบียทุกคนเรียนภาษาอังกฤษตั้งแต่อายุ 12 ปี ดังนั้นภาษาไม่ใช่อุปสรรคในการอ่าน) จากการศึกษาพบว่า แผ่นป้ายทะเบียนแบบ \$\$\$### มีประสิทธิภาพการจดจำได้ดีกว่าแบบ ##### และผู้วิจัยยังได้แนะนำสีพื้นหลังที่เหมาะสมของแผ่นป้ายทะเบียนของรถแต่ละประเภทด้วย

ตารางที่ 1. ระบบทะเบียนรถที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยของ Al-Haboubi. [3]

ระบบทะเบียน	รูปแบบระบบทะเบียน	จำนวนเลขทะเบียน
1st	#####	999,999
2nd	\$\$###	729,000
3rd	\$\$\$##	1,968,000
4th	\$\$\$###	19,683,000

3.4 ปัจจัยของมนุษย์ต่อการอ่านออกได้และการจดจำข้อความ

Grandjean [4] ได้แนะนำขนาดของตัวอักษรและช่องว่างระหว่างตัวอักษรที่ช่วยให้ง่ายต่อการอ่านข้อความ ดังสมการ (1) ถึง (4)

$$W = 2/3H \quad (1)$$

$$D_1 = 1/5H \quad (2)$$

$$D_2 = 2/3H \quad (3)$$

$$SW = 1/6 H \quad (4)$$

โดย W = ความกว้างตัวอักษร, H = ความสูงตัวอักษร, SW = ความหนาของเส้นตัวอักษร, D1 = ระยะห่างระหว่างตัวอักษร D2 = ระยะห่างระหว่างกลุ่มตัวอักษร

Sanders and McCormick [5] ได้แนะนำสมการเกี่ยวกับระยะการมองเห็นที่สัมพันธ์กับขนาดความหนาของเส้นตัวอักษรดังสมการ (5)

$$VA = 3438 SW/D \quad (5)$$

โดย VA = มุมมอง (Visual Angle) มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับการมองเห็นระดับปกติ D = ระยะมองห่างตัวอักษรที่ทำให้ SW ของตัวอักษรสามารถอ่านออกได้ ทั้ง SW และ D มีหน่วยเดียวกัน

Travis et al.[6] ได้ยืนยันว่าสีของตัวหนังสือและสีของพื้นหลัง สามารถผสมผสานกันได้หลากหลายรูปแบบ ตราบเท่าที่รูปแบบนั้นยังคงความสว่างที่เพียงพอและมีการตัดการของสีตัวอักษรและพื้นหลังที่เพียงพอต่อการอ่านออกได้

4. วิธีการศึกษา

4.1 ศึกษางานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับ ประวัติป้ายทะเบียนรถ การออกแบบป้ายทะเบียน ปัจจัยของมนุษย์ที่มีผลต่อการอ่านออกได้ของข้อความ

4.2 จัดทำจำลองแผ่นป้ายทะเบียน ตามรูปแบบ ขนาดแผ่นป้าย ตัวอักษร ระบบเลขทะเบียน ตามที่ได้ศึกษาสำหรับติดป้ายทะเบียนด้านหน้าและด้านหลังรถ

4.3 ให้รถทดสอบทำการติดป้ายทะเบียนที่ศึกษาแต่ละแบบขับผ่านผู้สังเกตป้ายทะเบียน ด้วยความเร็ว 40-45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จำนวน 1 เทียว(เพื่อจำลองสถานการณ์การจดจำป้ายทะเบียนของผู้สังเกตในบริเวณที่เกิดเหตุ ที่รถจะมีการถูกระงับความเร็วจนกระทั่งเกือบหยุดนิ่ง เพื่อที่จะตัดสินใจว่าจะจอดลงไปดูเหตุการณ์ให้ความช่วยเหลือ หรือ ขับรถเพื่อหลบหนี ซึ่งความเร็วนี้เทียบเคียงได้กับความเร็วขณะออกตัวรถ) โดยผู้สังเกตหมายเลขทะเบียนรถ ประกอบด้วย ตัวอักษร ตัวเลขทะเบียน และจังหวัด ทั้งภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษเท่าที่สังเกตได้ ลงในแบบฟอร์ม ประกอบด้วยป้ายทะเบียน 5 แบบดังนี้

- ป้ายทะเบียนที่ศึกษาแบบที่ 1

ป้ายทะเบียนรถยนต์ขนาด 150x385 mm. หมายเลขทะเบียน 9ขม 9870 พระนครศรีอยุธยา 15TH A61

- ป้ายทะเบียนที่ศึกษาแบบที่ 2

ป้ายทะเบียนรถยนต์ขนาด 150x400 mm. หมายเลขทะเบียน 9ภูษ A11 TH01 9278 พระนครศรีอยุธยา

- ป้ายทะเบียนที่ศึกษาแบบที่ 3

ป้ายทะเบียนรถยนต์ขนาด 160x400 mm. หมายเลขทะเบียน 5ฒฎ P94 TH01 5986 กรุงเทพมหานคร

- ป้ายทะเบียนที่ศึกษาแบบที่ 4

ป้ายทะเบียนรถบรรทุกขนาด 220x400 mm. หมายเลขทะเบียน 88A 9988 กรุงเทพมหานคร THAILAND 01

- ป้ายทะเบียนที่ศึกษาแบบที่ 5

ป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ขนาด 185x220 mm. หมายเลขทะเบียน ภูฒช 999 กรุงเทพมหานคร CM99 TH01

ซึ่งรูปแบบป้ายทะเบียนที่ศึกษา (แสดงดังรูปที่ 2) เพื่อศึกษาการพัฒนาระบบทะเบียนรองรับ AEC โดยแบบที่ 1, 2 และ 3 เป็นป้ายทะเบียนรถยนต์ แบบที่ 4 เป็นป้ายทะเบียนรถบรรทุก แบบที่ 5 เป็นป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ โดยป้ายทะเบียนทั้ง 5 แบบ เป็นระบบตัวอักษรผสมตัวเลข แบบเดียวกับระบบทะเบียนรถในปัจจุบัน โดยแบ่งเลขทะเบียนบนป้ายทะเบียนเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก (Prefix) เป็นตัวอักษรอย่างเดียว (เฉพาะรถจักรยานยนต์) หรือ ตัวอักษรผสมตัวเลข เรียกว่า “หมวดอักษร” และกลุ่มหลัง (Suffix) เป็นตัวเลขอย่างเดียว ซึ่งระบบเลขทะเบียนของไทย เลขทะเบียนทั้ง Prefix และ Suffix นี้ “ไม่ได้มีความหมายอะไร” นอกจากการลำดับตามการจัดทะเบียนยานพาหนะ



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 1. รูปแบบป้ายทะเบียนที่ทำการศึกษา (ตามมาตราส่วน)

(a) แบบที่ 1 (b) แบบที่ 2 (c) แบบที่ 3 (d) แบบที่ 4 (e) แบบที่ 5

ระบบทะเบียนที่ศึกษา แบบ 1, 2, และ 3 ใช้ Prefix เป็นตัวเลข 1 ตัวตามด้วยตัวอักษร 2 ตัว จากประกาศกรมขนส่งทางบก [8] Prefix แบบนี้จะมีทั้งหมด 1,778 หมวด เมื่อนำมารวมกับ Suffix ที่เป็นเลข 4 ตัว จะได้จำนวนหมายเลขทะเบียนทั้งหมด 16,002,000 หมายเลข

หมายเลขป้ายทะเบียนที่ศึกษา 5 แบบ อักษรไทยในกลุ่ม Prefix ได้ถูกแปลงให้เป็นภาษาอังกฤษที่สอดคล้องกัน โดยใช้ข้อกำหนดการเทียบหมวดอักษรไทยไปเป็นหมวดอักษรภาษาอังกฤษ รวมทั้งรหัสจังหวัด ตามประกาศของกรมขนส่งทางบก [7] เพื่อให้สอดคล้องตามความตกลงระหว่างประเทศว่าด้วยการขนส่งข้ามพรมแดนในอนุภูมิภาคกลุ่มแม่น้ำโขง (GMS) โดยเลขทะเบียนภาษาอังกฤษ ส่วน TH01 เป็นรหัสประเทศไทย ตาม ISO 3166-1 จากการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่กรมขนส่งทางบก [9] ให้ความเห็นว่าหากใช้สัญลักษณ์ธงชาติไทยแทนรหัสประเทศ จะทำให้ต้นทุนผลิตป้ายทะเบียนสูงขึ้น เพราะต้องพิมพ์เป็นสี และอาจไม่เหมาะสมกรณีที่เข้าต้องก้าวข้ามธงชาติเวลาขึ้น-ลง ท้ายรถกระบะ

4.4 ป้ายทะเบียนรถยนต์ที่ทำการศึกษามี 3 ขนาด แบบที่ 1 คือขนาดเท่ากับป้ายทะเบียนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แบบที่ 2 มีการเพิ่มความยาวป้ายมากขึ้นแต่ความกว้างคงเดิม และแบบที่ 3 มีการขยายความยาวและความกว้างเพิ่มขึ้น โดยทั้ง 3 แบบ ได้ติดตั้งทั้งด้านหน้าและด้านท้ายรถยนต์

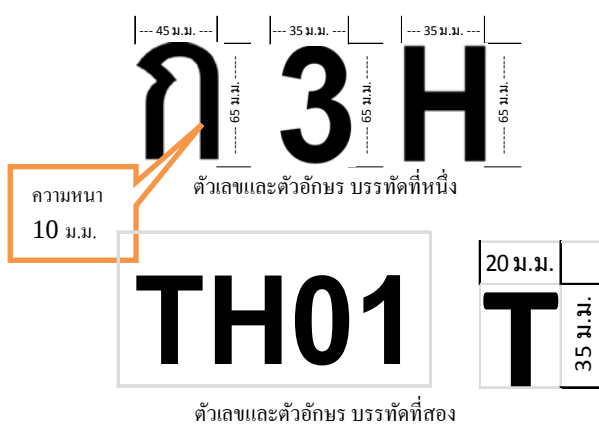
เลขทะเบียนแบ่งเป็นสองบรรทัด แต่มีลักษณะให้ความสำคัญใน บรรทัดที่หนึ่ง ซึ่งมีรูปแบบดังนี้ (ดูรูปที่ 2) บรรทัดที่หนึ่ง ตัวเลขและตัวอักษร ให้จัดเป็นรอยคูณ ของหมายเลขทะเบียนซึ่งมีขนาด ตัวเลขในบรรทัด ให้สูงไม่น้อยกว่า 65 มิลลิเมตร และกว้างไม่น้อยกว่า 35 มิลลิเมตร และกว้างไม่น้อยกว่า 45 มิลลิเมตร ตัวอักษรหนา 10 มิลลิเมตร ตัวอย่างเช่น 1กค1234

ชื่อจังหวัด	รหัสจังหวัด	ชื่อจังหวัด	รหัสจังหวัด	ชื่อจังหวัด	รหัสจังหวัด
กรุงเทพมหานคร	01	หนองบัวลำภู	401	เพชรบูรณ์	66
ชัยนาท	10	บึงกาฬ	402	นครสวรรค์	67
สิงห์บุรี	11	หนองคาย	40	อุทัยธานี	68
ลพบุรี	12	เลย	41	สุพรรณบุรี	70
อ่างทอง	13	อุดรธานี	42	กาญจนบุรี	71
สระบุรี	14	นครพนม	43	นครปฐม	72
พระนครศรีอยุธยา	15	สกลนคร	44	ราชบุรี	73
ปทุมธานี	16	ขอนแก่น	45	สมุทรสาคร	74
นนทบุรี	17	กาฬสินธุ์	46	สมุทรสงคราม	75
สมุทรปราการ	18	มหาสารคาม	47	เพชรบุรี	76
นครนายก	20	ร้อยเอ็ด	48	ประจวบคีรีขันธ์	77

รูปที่ 2. ตัวอย่างรหัสจังหวัด ตามประกาศกรมขนส่งทางบก [8]

บรรทัดที่สอง เป็นรหัสประเทศตามมาตรฐาน ISO 3166 ตามด้วยตัวเลขรหัสเมือง และรหัสป้ายทะเบียนรถด้วยตัวอักษรสากลภาษาอังกฤษมีขนาด กว้าง 20 มิลลิเมตร X สูง 35 มิลลิเมตร ตัวอย่างเช่น TH01 M99 จากนั้นตามด้วยชื่อจังหวัด

4.5 ผู้สังเกตเป็น นักศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 3 จำนวน 37 คน โดยทำการทดสอบในช่วงเวลา 13:30-16:30 ของวันเสาร์ที่ 18 มกราคม 2557 บนถนนคุณหญิงเลี่ยม เขตลาดกระบัง (ดูรูปที่ 6) ซึ่งเป็นถนนกว้าง 4 เลน



รูปที่ 3. รูปแบบขนาดตัวเลขและตัวอักษร (สำหรับรถยนต์)

แต่มีรถวิ่งน้อย มีความระยะทางตรงประมาณ 2 กิโลเมตร จึงเหมาะแก่การทดสอบการอ่านออกได้และการจดจำหมายเลขทะเบียนรถ รถติดป้ายทะเบียนที่ศึกษาแต่ละแบบวิ่งในฝั่งเดียวกับผู้สังเกตในเลนซ้ายสุด จำนวน 1 เที้ยว สำหรับป้ายทะเบียนแต่ละแบบ ผู้สังเกตจดหมายเลขทะเบียนรถที่สังเกตได้ลงในแบบฟอร์ม



รูปที่ 4. ถนนคุณหญิงเลี่ยม เขตลาดกระบัง ที่ใช้สำหรับทดสอบ

4.6 ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลทดสอบการจดจำ

หมายเลขทะเบียนทั้ง 5 แบบในรูปค่าร้อยละค่าความผิดพลาดของการอ่านออกได้และการจดจำ และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบป้ายทะเบียนแต่ละแบบ

4.7 สรุปผลการศึกษา

5. ผลการวิจัย

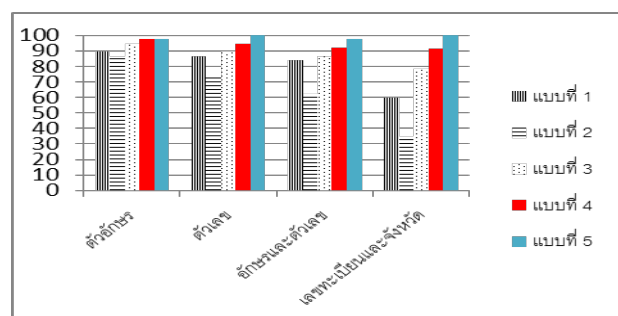
ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงค่าความถี่ของการจดจำเลขทะเบียนแต่ละแบบ โดยแบ่งเป็น แต่ละส่วนของหมายเลขทะเบียน การระบุหมายเลขทะเบียนได้ และการระบุตัวรถได้

ตารางที่ 2. ผลการทดสอบการมองเห็นและจดจำหมายเลขทะเบียนรถ

รูปแบบ ป้าย ทะเบียน	จำนวนคนที่จดจำเลขทะเบียน (คน)							
	เลขทะเบียน						เลขทะเบียนและ จังหวัด	
	ตัวอักษร		ตัวเลข		อักษรและตัวเลข		จำนวน	%
	จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%		
แบบที่ 1	33	89.19	32	86.49	31	83.78	22	59.46
แบบที่ 2	32	86.49	27	72.97	23	62.16	13	35.14
แบบที่ 3	35	94.59	33	89.19	32	86.49	29	78.38
แบบที่ 4	36	97.30	35	94.59	34	91.89	36	91.30
แบบที่ 5	36	97.30	37	100.00	36	97.30	37	100.00
N =	37							

6. วิเคราะห์ผลการศึกษา

จากตารางที่ 2 สามารถเขียนแผนภูมิแท่งได้ดังรูปที่ 5 และสามารถวิเคราะห์รายละเอียดได้ดังประเด็นต่อไปนี้



รูปที่ 5. ผลการทดสอบและการมองเห็นจดจำหมายเลขทะเบียน

1. จากกราฟรูป 5 พบว่า สำหรับรถยนต์ ป้ายทะเบียนที่ศึกษาแบบที่ 3 ให้ผลการสังเกตและการจดจำดีที่สุด โดยผู้สังเกตสามารถจดจำป้ายทะเบียนได้สมบูรณ์มาก ถึง 78.38% ซึ่งมากกว่าป้ายทะเบียนรถยนต์ที่ศึกษาแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 โดยแบบที่ 2 ให้การจดจำหมายเลขทะเบียนน้อยที่สุด

2. ป้ายทะเบียนแบบที่ 1 และ แบบที่ 3 แม้ว่าจะมีรูปแบบการจัดระบบเลขทะเบียนเหมือนกัน แต่ป้ายทะเบียนแบบที่ 3 มีขนาดของป้ายทะเบียนใหญ่กว่า จึงทำให้มีช่องว่างระหว่างเลขทะเบียนมากกว่า ทำให้สามารถสังเกตและจดจำเลขทะเบียนได้ง่ายกว่า

3. ป้ายทะเบียนรถยนต์แบบที่ 2 แม้ว่าจะมีขนาดความยาวป้ายทะเบียนมากกว่าแบบที่ 1 แต่การนำรหัสภาษาอังกฤษไปไว้ด้านข้างด้านซ้าย ทำให้การสังเกตและจดจำป้ายทะเบียนได้ประสิทธิภาพน้อยที่สุด

4. สำหรับ ป้ายทะเบียนรถบรรทุก และ รถจักรยานยนต์ (รูปแบบที่ 4 และ 5 ตามลำดับ) ให้ผลทดสอบการจดจำได้อยู่ในเกณฑ์ดีมาก (> 85%) คือ ผู้สังเกตสามารถจดจำหมายเลขทะเบียนได้มากถึง 91.30% และ 100.00% ตามลำดับ เนื่องจากตัวหนังสือ บนป้ายมีความชัดเจน ดูและจดจำได้ง่าย ซึ่งป้ายทะเบียนรถบรรทุก ปัจจุบันก็ใช้รูปแบบคล้ายกันแบบนี้ เพียงแต่ต้องเพิ่มอักษรภาษาอังกฤษเข้าไปในส่วน Prefix

5. ป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ แม้จะมีการเพิ่มระบบทะเบียนภาษาอังกฤษเข้าไป ก็ยังให้ประสิทธิภาพในการระบุเลขทะเบียนสูงอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดระบบทะเบียนมีความชัดเจน ทำให้อ่านและสังเกตได้ง่าย

7. สรุปผลการศึกษา

สามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

1. ป้ายทะเบียนรถยนต์แบบที่ 3 ที่มีขนาด 160x400 mm. ใหญ่กว่าป้ายทะเบียนปัจจุบัน เมื่อมีการเพิ่มระบบเลขทะเบียนภาษาอังกฤษเข้าไป ทำให้ประสิทธิภาพการอ่านได้และจดจำเลขทะเบียนดีกว่าขนาดป้ายทะเบียนปัจจุบัน (แบบที่ 1) และแบบที่ 2 และมีค่าเกือบ 80%

2. ป้ายทะเบียนรถบรรทุก ซึ่งเป็นขนาดปัจจุบัน เมื่อมีการเพิ่มอักษรภาษาอังกฤษเข้าไปแล้ว ให้ค่าการอ่านได้

และจดจำเลขทะเบียนอยู่ในเกณฑ์ดีมาก (มากกว่า 85%) ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ป้ายทะเบียนรถจักรยานยนต์ ที่มีขนาดเท่ากับปัจจุบัน เมื่อมีการเพิ่มรหัสทะเบียนภาษาอังกฤษเข้าไปแล้ว ให้ค่าการอ่านได้และการจดจำเลขทะเบียนดีมาก

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอธิบดีและเจ้าหน้าที่ทุกคนในกรมการขนส่งทางบก อาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Srinil, L. Laokongtavorn, and S. Kwanpruek, "Study on License Plates Legibility and Recollection," The 19th National Convention on Civil Engineering, pp.421-427, May 2014.
- [2] T. Jongpeepian, "History of 'License Plates' Format, Can Use For 100 Years When Changed," Website: jorpor.com, 18 January 2010.
- [3] Al-Haboubi, M. H., Designing a License Plate, Applied Ergonomics, Vol 30, pp.421-428, 1999.
- [4] E. Grandjean, "Fitting The Task to the Man," Taylor & Francis, London, 1988.
- [5] M.S. Sanders, McCormick, E.J., "Human Factors in Engineering and Design," McGraw-Hill, Singapore, 1992.
- [6] Travis, D.S., Bowles, S., Seton, J., Peppe, R., "Reading from color displays: a psychophysical model," Human Factors, Vol.32(2), pp.147-156, 1990.
- [7] Interview Mrs. S. Wittayanun, Head of Working Capital Section for the making of license plate, and Mrs. S. Somsup, Head of Inventory and License Plates, Department of Land Transport, 31 July 2013.

การศึกษาพฤติกรรมของผู้โดยสารในการเลือกใช้ระบบขนส่ง สาธารณะในเขตเมือง: กรณีศึกษาเทศบาลนครนครศรีธรรมราช

A Study of Passenger Mode Choice Behavior of Urban Public Transport System: A Case Study of Nakhon Si Thammarat Municipality

ปิติ จันทร์ไทย

สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

Email address: pchantruthai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้อธิบายถึงพฤติกรรมของผู้โดยสารในการตัดสินใจเลือกระบบขนส่งสาธารณะเพื่อใช้เดินทางในพื้นที่เทศบาลนครนครศรีธรรมราช รถสองแถวเป็นระบบขนส่งสาธารณะเพียงประเภทเดียวที่ให้บริการในพื้นที่ศึกษา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในการเลือกรูปแบบการเดินทาง และเพื่อเสนอแนวทางในการจัดการระบบขนส่งสาธารณะในเขตเมือง การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามโดยใช้แบบจำลอง *Binary Logistic Regression* ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองมีความเหมาะสมค่า *Likelihood Ratio Test* มีค่า $\chi^2 = 44.536$ ค่า *p-value* $= .0132 < .05$ และค่า $\rho^2 = .2723$ ตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการรถสองแถวในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราช ได้แก่ สถานภาพ (X_3) รายได้ครอบครัวเฉลี่ยต่อเดือน (X_8) จำนวนรถจักรยานยนต์ในครัวเรือน (X_{14}) ไม่มียานพาหนะส่วนตัวในครัวเรือน (X_{17}) และค่าใช้จ่ายในการเดินทางรวม (X_{37}) ข้อเสนอแนะการจัดการระบบขนส่งสาธารณะ ภาครัฐควรมีการตรวจสอบสภาพรถสองแถวประจำปีและอบรมให้ความรู้การให้บริการแก่ผู้ขับขี่รถโดยสารสองแถว ภาครัฐควรมีนโยบายที่ชัดเจนในการพัฒนาระบบขนส่งมวลชนสาธารณะร่วมกับภาคเอกชน เจ้าหน้าที่ตำรวจต้องเข้มงวดและจับกุมผู้ขับขี่รถสองแถวที่ขอมให้มีการโหนท้าย และควรเพิ่มทางเลือกการให้บริการรถเมล์เล็กบนเส้นทางหลักในเขตเมือง

คำสำคัญ : ระบบการขนส่งสาธารณะในเมือง, มูลค่าเวลาในการเดินทาง, ไปนรี โลจิสติกส์รีเกรสชัน

Abstract

This paper describes passenger behavior decision to select public transport system for travel in Nakhon Si Thammarat Municipality. Song-Tail is the only one mode of public transport services in the study area. The purposes of this study were to find the factors effecting preference decision to select choice mode and recommendation to urban public transport system management. The Questionnaires data were analyzed using binary logistic regression modeling. The result of study showed the model fit due to *Likelihood Ratio Test* showed $\chi^2 = 44.536$, *p-value* $= .0132 < .05$ and $\rho^2 = .2723$. The

statistical significance variables that were the factors effecting preference to travel by Song-Tail in Nakhon Si Thammarat Municipality comprised status (X_3), the average household income (X_8), motorcycle ownership per household (X_{14}), no vehicle ownership per household (X_{17}) and total travel cost (X_{37}). Recommendations for public transport management comprise Provincial land transport office should be annual car inspection of Song-Tail and training the drivers for passenger service. Local government should have a clear policy on the development of public transit systems in conjunction with the private sector. Police officers must enforce with the strict law and arrest the Song-Tail's driver who allow to the passenger stand at the end of car rear. Local government should have more alternative for public transport system services which small bus is the choice mode for the passenger services on the main routes in the city.

Keywords : Urban public transport system, Value of time, Binary logistic regression

1. บทนำ

เทศบาลนครนครศรีธรรมราชจัดเป็นเทศบาลนครขนาดใหญ่อันดับที่ 9 รองจากเทศบาลนครนนทบุรี เทศบาลนครนครราชสีมา เทศบาลนครเชียงใหม่ เทศบาลนครหาดใหญ่ เทศบาลนครอุดรธานี เทศบาลนครปากเกร็ด เทศบาลนครขอนแก่น และเทศบาลนครอุบลราชธานี ตามลำดับ [1] ในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2547 ถึง 2556 จำนวนรถยนต์นั่งส่วนบุคคลไม่เกิน 7 คนที่จดทะเบียนใหม่ในจังหวัดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือ มีจำนวนรถยนต์นั่งส่วนบุคคลไม่เกิน 7 คนเพิ่มขึ้น 4.2 เท่า ในช่วงเวลา 8 ปี นับจากปี พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2554 และเพิ่มเป็น 7 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับปี พ.ศ. 2555 เนื่องจากนโยบายค่าน้ำมันรถยนต์คันแรกที่เริ่มในเดือนกันยายน พ.ศ. 2554 [2]

จำนวนยานพาหนะส่วนบุคคลที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมาตลอดย่อมสะท้อนได้ว่าผู้เลือกที่จะเดินทางโดยยานพาหนะส่วนตัวมากกว่าระบบขนส่งสาธารณะ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากปัญหาในการให้บริการของระบบขนส่งสาธารณะ เช่น เส้นทางเดินรถไม่ครอบคลุมพื้นที่ความต้องการ ปัญหาตารางเวลาในการเดินรถที่ไม่แน่นอน การให้บริการที่ไม่ได้มาตรฐาน รวมถึงระบบการให้บริการที่ดำเนินการโดยเอกชนซึ่งมุ่งเน้นผลกำไรมากกว่าการให้บริการเชิงสังคม ปัญหาเหล่านี้นำมาซึ่งการตัดสินใจให้

ผู้เดินทางเลือกใช้ระบบขนส่งส่วนบุคคลมากกว่าระบบขนส่งสาธารณะ

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในการเลือกรูปแบบการเดินทาง
2. เพื่อนำเสนอแนวทางในการจัดการระบบขนส่งสาธารณะในเขตเมือง

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำมาจากแหล่งข้อมูล 2 ประเภท ได้แก่ ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) และ ทุติยภูมิ (Secondary Data)

แบบจำลอง Binary logistic regression ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์การตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางในเขตพื้นที่เมือง [3] โดยมีรูปแบบตามสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 3 ดังนี้

$$P_{iq} = \frac{e^{V_{iq}}}{\sum_{j=1}^k e^{V_{jq}}} \quad (1)$$

$$V_{iq} = \sum \beta_{jk} X_{ikqj} \quad (2)$$

$$Y = \ln \left[\frac{P_{(Y=1)}}{P_{(Y=0)}} \right] = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i \quad (3)$$

โดยที่;

P_{iq} = ความเป็นไปได้ของคนที่ i สำหรับทางเลือก q

Y = 1 เมื่อผู้ตอบแบบสอบถามพึงพอใจ

ระบบขนส่งอื่น

= 0 เมื่อผู้ตอบแบบสอบถามพึงพอใจ

ให้บริการรถสองแถว

V_{iq} = อรรถประโยชน์ความพึงพอใจที่สังเกตได้

X_{ikq} = ตัวแปรอิสระ

β_i = อรรถประโยชน์พารามิเตอร์ของตัวแปรอิสระ

β_o = สัมประสิทธิ์ของค่าคงที่

4. ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระดับความพึงพอใจในการใช้ระบบขนส่งมวลชนสาธารณะในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราช มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1. รวบรวมข้อมูล และทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและสำรวจข้อมูลระบบขนส่งสาธารณะในพื้นที่ศึกษา
3. ออกแบบแบบสอบถามผู้โดยสารที่ใช้รถสองแถว และออกแบบสัมภาษณ์ผู้ขับขีรถสองแถวในพื้นที่ศึกษา

4. วิเคราะห์ความพึงพอใจในการเดินทางด้วยระบบขนส่งสาธารณะ

5. นำผลการวิเคราะห์จากข้อมูลสำรวจภาคสนามและผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง มาจัดทำเป็นข้อเสนอแนะเชิงนโยบายเพื่อนำเสนอแนวทางการจัดการระบบขนส่งมวลชนสาธารณะในพื้นที่ศึกษา

5. ผลการศึกษา

5.1 ระบบขนส่งสาธารณะในพื้นที่ศึกษา

รถโดยสารสาธารณะที่ให้บริการในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราชในปัจจุบันเป็นการดำเนินการของเอกชน โดยได้รับอนุญาตให้ดำเนินการจากทางภาครัฐจากสำนักงานขนส่งจังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งประกอบด้วย การให้บริการรถสองแถว รถแท็กซี่ และรถจักรยานยนต์รับจ้าง เมื่อพิจารณาการให้บริการของระบบขนส่งสาธารณะในรูปแบบรถประจำทางจะมีเพียงการให้บริการของรถสองแถวเพียงอย่างเดียวเท่านั้น (แสดงในรูปที่ 1)

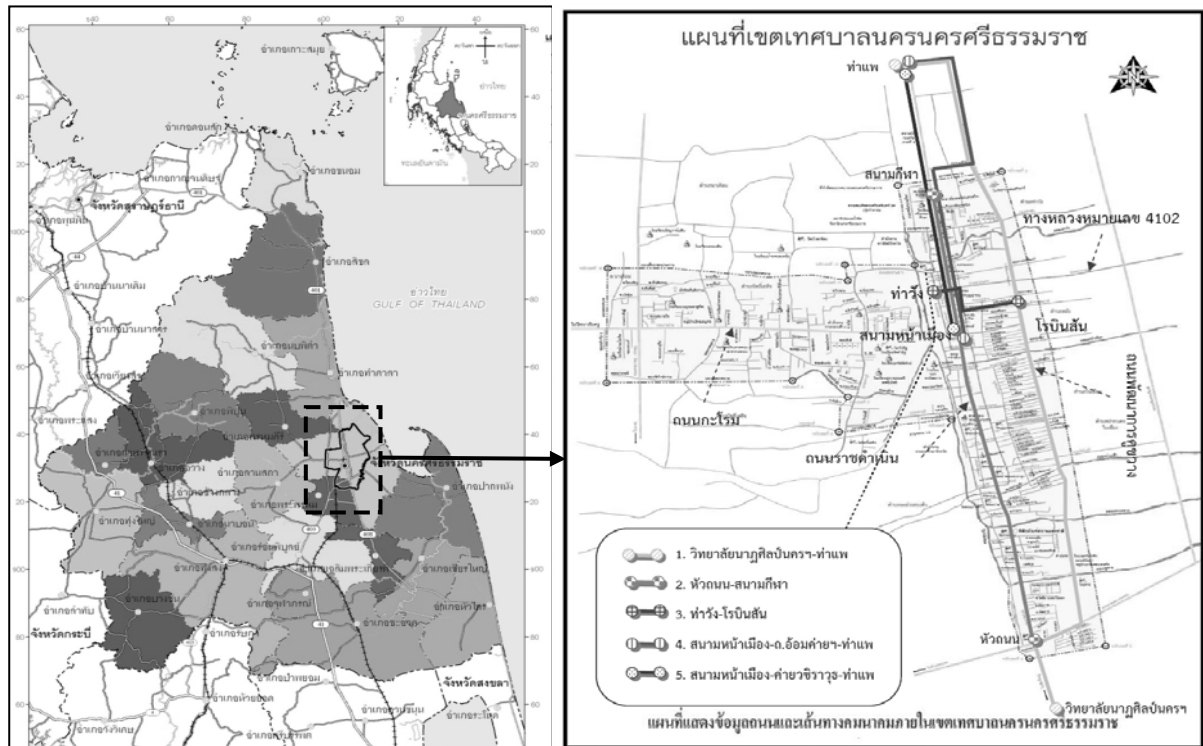
รายละเอียดเส้นทาง ช่วงเวลาให้บริการ ค่าโดยสาร และผู้ประกอบการให้บริการของรถสองแถวในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราช มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1 รูปแบบระบบขนส่งสาธารณะในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราช

ตารางที่ 1 รายละเอียดการให้บริการของรถสองแถวในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราช [4]

ผู้ประกอบการ	เส้นทางให้บริการ (ระยะทาง, กม.)	ช่วงเวลาให้บริการ	ความถี่รถ (นาที/คัน)	ค่าโดยสาร (บาท)	จำนวนรถ (คัน)
บ.นครขนส่ง จก.	นาเกลือ-ท่าแพ-แนวถนนพัฒนาการคูขวาง (36 กม.)	06:00-19:30	10-15	8-15	30-40
สหกรณ์เดินรถนครฯ	หัวถนน-สนามกีฬา-ถนนราชดำเนิน (16 กม.)	05:00-19:00	หมุนเวียน	10	190-435
บ.นครขนส่ง จก.	สถานีรถไฟ-ท่าวัง-โรบินสัน โอเชียน (2 กม.)	08:30-18:00	10	10	26
สหกรณ์เดินรถนครฯ	หน้าเมือง-ท่าแพ-ถนนอ้อมค่าย-ถนนราชดำเนิน (16 กม.)	06:00-20:00	10	10	60-80
สหกรณ์เดินรถนครฯ	หน้าเมือง-ค่ายวิชราวุธผ่านค่าย-ถนนราชดำเนิน (15 กม.)	06:05-20:05	10	10	



รูปที่ 2 เส้นทางเดินรถสองแถวในเขตเทศบาลนครศรีธรรมราช [5]

5.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองพฤติกรรมความพึงพอใจ

แบบจำลอง Binary Logistic Regression ถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป *NLOGIT 4.0* จากจำนวนผู้ตอบแบบสอบถามรวมทั้งสิ้น 255 ชุด และแบบสอบถามจำนวน 44 ชุดจะถูกใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง Binary Logistic Regression

ตัวแปร	ความหมายและเงื่อนไข
$Y =$ $\ln[P/(1-P)]$	ความพึงพอใจในการใช้บริการรถสองแถว; พึงพอใจระบบอื่น (P) = 1, พึงพอใจรถสองแถว ($1-P$) = 0
X_1	เพศ; หญิง = 1, ชาย = 0
X_2	อายุ; ตามจริง
X_3	สถานภาพ; โสด = 1, อื่นๆ = 0
X_4	ระดับการศึกษา; ปริญญาตรี = 1, อื่นๆ = 0
X_5	ที่อยู่; นอกเขตเทศบาล = 1, เขตเทศบาล = 0
X_6	อาชีพ; นักเรียน/นักศึกษา = 1, อื่นๆ = 0
X_7	จำนวนสมาชิก/ครัวเรือน; ตามจริง
X_8	รายได้ครัวเรือน/เดือน; ตามจริง

ตารางที่ 2 (ต่อ)

X_9	จุดเริ่มต้นเดินทาง; บ้าน = 1, อื่นๆ = 0
X_{10}	จุดสิ้นสุดการเดินทาง; ที่ทำงาน = 1, อื่นๆ = 0
X_{11}	วัตถุประสงค์ในการเดินทาง; ไปโรงเรียน = 1, อื่นๆ = 0
X_{12}	จำนวนรถเก๋ง/ครัวเรือน; ตามจริง
X_{13}	จำนวนรถกระบะ/ครัวเรือน; ตามจริง
X_{14}	จำนวนจักรยานยนต์/ครัวเรือน; ตามจริง
X_{15}	ยานพาหนะที่ใช้เดินทาง; รถสองแถว = 1, อื่นๆ = 0
$X_{16} - X_{21}$	เหตุผลที่เลือกยานพาหนะเดินทาง
X_{16}	สะดวก รวดเร็ว; ไม่เลือก = 1, เลือก = 0
X_{17}	ไม่มียานพาหนะส่วนตัว; ไม่เลือก = 1, เลือก = 0
X_{18}	หาที่จอดรถยนต์ไม่ได้; ไม่เลือก = 1, เลือก = 0
X_{19}	ประหยัดค่าใช้จ่ายการเดินทาง; ไม่เลือก = 1, เลือก = 0
X_{20}	มีความปลอดภัยในการเดินทาง; ไม่เลือก = 1, เลือก = 0
X_{21}	เหตุผลอื่นๆ; ไม่เลือก = 1, เลือก = 0
X_{35}	ช่วงเวลาที่ใช้เดินทางบ่อยที่สุด; ตามจริง
X_{36}	ระยะเวลาในการเดินทางรวม; ตามจริง
X_{37}	ค่าใช้จ่ายในการเดินทางรวม; ตามจริง
X_{38}	ท่านใช้รถสองแถวเดินทางในเทศบาลเฉลี่ยต่อสัปดาห์; ตามจริง
X_{39}	เวลาที่ใช้รถสองแถวที่สถานีป้ายหยุดรถ; ตามจริง

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

ตัวแปร	β_i	t-ratio	p-value
Constant	-4.12997021	-1.825	.0680*
X_1	-.30166633	-.500	.6168
X_2	-.04935495	-1.883	.0597
X_3	1.45032879	2.932	.0034*
X_4	.57979744	1.895	.0580
X_5	.88379812	1.247	.2123
X_6	.06756534	.375	.7076
X_7	.29033328	1.098	.2723
X_8	-.36438934	-2.507	.0122*
X_9	-.63273248	-.754	.4507
X_{10}	.36207480	1.134	.2567
X_{11}	-.31861125	-.628	.5300
X_{12}	.91976536	1.925	.0542
X_{13}	-.46649958	-.891	.3731
X_{14}	.81122308	2.307	.0210*
X_{15}	-.13992410	-.622	.5340
X_{16}	.50136276	.655	.5126
X_{17}	1.96699132	2.157	.0310*
X_{18}	-.03730748	-.027	.9784
X_{19}	.51782285	.845	.3982
X_{20}	.31503633	.378	.7055
X_{21}	-.69810208	-.501	.6164
X_{35}	-.06271862	-.233	.8161
X_{36}	-.01919130	-1.046	.2953
X_{37}	.02893057	2.368	.0179*
X_{38}	-.45784507	-1.636	.1019
X_{39}	-.04677037	-.183	.8547
ตัวอย่าง (ชุด)	255		
LL(0)	-81.792		
LL(β)	-59.524		
LR (χ^2)	44.536 ($p < 0.05$)		
ρ^2	.2723		

หมายเหตุ: *ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

ผลการวิเคราะห์พบว่า การทดสอบแบบจำลองโดยวิธี Hosmer & Lemeshow มีค่า $\chi^2 = 3.9248$ และค่า sig. = .8638 > .05 จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองมีความเหมาะสม Likelihood Ratio Test มีค่า $\chi^2 = 44.536$ โดยมีค่า p-value

= .0132 < .05 และค่า $\rho^2 = .2723$ ตัวแปรที่มีนัยสำคัญที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมความพึงพอใจในการใช้บริการรถสองแถวในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราชที่สามารถนำมาจัดให้อยู่ในรูปฟังก์ชันอรรถประโยชน์ ได้แก่ สถานภาพ (X_3) รายได้ครอบครัวเฉลี่ยต่อเดือน (X_8) จำนวนรถจักรยานยนต์ในครัวเรือน (X_{14}) ไม่มียานพาหนะส่วนตัว (X_{17}) และค่าใช้จ่ายในการเดินทางรวม (X_{37}) จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยจำนวนชุดแบบสอบถามที่แยกออกมาจำนวน 44 ชุด พบว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ความถูกต้องของตัวแปรได้ร้อยละ 95.9 แบบจำลองปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการรถสองแถวในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราชสามารถแสดงในรูปแบบสมการอรรถประโยชน์ดังสมการที่ 4

$$Y = -4.130 + 1.45X_3 - .364X_8 + .811X_{14} + 1.967X_{17} + .029X_{37} \quad (4)$$

พิจารณามูลค่าของเวลาในการเดินทาง (Value of Time: VOT) [6] ด้วยรถสองแถวของผู้ตอบแบบสอบถามโดยการเปรียบเทียบค่าอนุพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายในการเดินทางรวม (X_{37}) และระยะเวลาในการเดินทางรวม (X_{36}) ซึ่งค่าที่ได้เป็นมูลค่าเวลาในการเดินทางเฉลี่ยของผู้ตอบแบบสอบถาม ดังแสดงในสมการที่ 5

$$VOT = \frac{\partial X_{37}}{\partial X_{36}} = -\frac{\beta_{36}}{\beta_{37}} \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 มูลค่าของเวลาในการเดินทางเฉลี่ยของผู้ตอบแบบสอบถามที่เดินทางโดยรถสองแถวในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราชมีค่าเท่ากับ 39.60 บาท/ชั่วโมง

5.3 ผลการสัมภาษณ์ผู้ขับขีรถสองแถว

ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ขับขีรถสองแถว พบว่าผู้ตอบสัมภาษณ์ส่วนใหญ่ทราบว่ารถสองแถวมีจำนวนมาก แต่ไม่ต้องการให้ทางภาครัฐเข้าไปควบคุมจัดระเบียบผู้ตอบแบบสัมภาษณ์ส่วนใหญ่มีรายได้เพียงพอจากการขับรถสองแถว และยอมรับว่ามีการจอดรถซ้อนคันโดยให้

เหตุผลว่ามีรถยนต์ส่วนบุคคลจอดที่ป้ายหยุด และผู้ตอบแบบสอบถามยอมให้มีการโน้ตท้ายรถโดยอ้างว่าเป็นความเต็มใจของเด็กนักเรียน

จากการสัมภาษณ์ผู้ขับขีรถสองแถวในกรณีถ้ามีการนำรถเมล์เล็กเข้ามาให้บริการประชาชนในเขตเทศบาล พบว่าผู้ขับขีส่วนมากไม่เห็นด้วย โดยให้เหตุผลที่เกี่ยวกับผลกระทบต่อรายได้ของผู้ขับขีที่จะลดลง และค่าคิวรถในแต่ละเส้นทางที่ได้จ่ายไปคิดละ 15,000 บาท ซึ่งผู้ถูกสัมภาษณ์คิดว่าถ้าภาครัฐจะดำเนินการให้มีการบริการของรถเมล์เล็กในเขตเทศบาล ควรมีการประชุมร่วมกับผู้ขับขีรถสองแถวก่อนดำเนินการ

6. ข้อเสนอแนะการจัดการระบบขนส่งสาธารณะในเมือง

จากข้อมูลการวิเคราะห์จากแบบจำลองเพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้ระบบขนส่งสาธารณะในพื้นที่ศึกษา และข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ขับขีรถสองแถวสามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. หน่วยงานภาครัฐควรมีการตรวจสอบสภาพรถสองแถวเป็นประจำ และควรมีการอบรมให้ความรู้เกี่ยวกับการให้บริการของผู้ขับขีรถโดยสารสองแถว และมีการประเมินผลหลังการอบรม ก่อนอนุญาตให้ดำเนินการต่อทะเบียนรถประจำปี
2. ภาครัฐควรมีนโยบายที่ชัดเจนในการพัฒนาระบบขนส่งมวลชนสาธารณะในเขตเมืองร่วมกับภาคเอกชน เพื่อสร้างความมั่นใจ ความเชื่อถือ และความปลอดภัยให้แก่ผู้โดยสาร
3. เจ้าหน้าที่ตำรวจต้องเข้มงวด และจับกุมผู้ขับขีรถสองแถวที่ยอมให้มีการโน้ตท้ายรถ
4. ภาครัฐโดยหน่วยงานท้องถิ่น สำนักงานขนส่งจังหวัดควรเพิ่มทางเลือกในการให้บริการรถเมล์เล็กโดยให้บริการบนเส้นทางหลักในเขตเมือง โดยควบคุมราคาค่าโดยสารไม่ให้สูงกว่ารถสองแถว ในขณะที่รถสองแถวที่ให้บริการในปัจจุบันควรจัดให้บริการในเส้นทางต่อเชื่อมระหว่างถนนเส้นหลักและส่วนต่อขยายของเมือง และควรขยายการ

ให้บริการต่อเนื่องจากสนามบินถึงเขตรอบต่อเขตเมืองเพื่อให้บริการรถเมล์เล็กเข้าเมือง

7. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาพฤติกรรมของผู้โดยสารในการเลือกระบบขนส่งสาธารณะในการเดินทาง โดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในการเลือกใช้ระบบขนส่งอื่น กับรถสองแถวในการเดินทางในเขตเทศบาลนครนครศรีธรรมราช จากแบบจำลองพบว่า ปัจจัยด้านสถานภาพ รายได้ ครอบครัวเฉลี่ยต่อเดือน จำนวนรถจักรยานยนต์ในครัวเรือน ครอบครัวไม่มียานพาหนะส่วนตัว และปัจจัยค่าใช้จ่ายในการเดินทางรวม มีผลต่อพฤติกรรมการเลือกระบบขนส่ง ผู้ขับขีรถสองแถวมีความกังวลด้านทางเทศบาลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีการจัดการระบบขนส่งสาธารณะ เช่น การจัดให้มีบริการรถเมล์เล็กในเขตเทศบาล ซึ่งข้อกังวลส่วนใหญ่เกี่ยวกับผลกระทบรายได้ที่ลดลง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Local Administration, [Online]. Available: <http://dla.go.th/upload/service/2011/9/156.pdf>. [April 19, 2014].
- [2] Department of Land transport, [Online]. Available: http://ps.dlt.go.th/statistics_web/statistics.html. [April 19, 2014].
- [3] M.E. Ben-Akiva and S. Lermam, Discrete choice analysis, Theory and Application to travel demand. MIT Press. Cambridge, Massachusetts, USA, 1985.
- [4] Nakhon Si Thammarat Department of Land transport, [Online]. Available: <http://nakhonsi.dlt.go.th/adminis1.html>. [April 19, 2014].
- [5] "An Assessment Report of the City Plan Project and the Implementation of Comprehensive City Plan of Nakhon Si Thammarat", Nakhon Si Thammarat Municipality, 2007.
- [6] J. Louviere, D.A. Hensher and J. Swait, Stated choice methods, Analysis and Application, Cambridge University Press, Cambridge, USA, 2010.

ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์

Air Content of Cellular Lightweight Concrete

ธนกร ทวีวุฒิ นท แสงเทียน วิวัฒน์ พัวพัสนานนท์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอการประยุกต์หาปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ 3 วิธี ได้แก่ (1) ใช้โปรแกรม Air Void Analyser (2) วิธีการคำนวณจากปริมาณส่วนผสม และ (3) การหาค่าความพรุนโดยคำนวณหาความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตจาก ASTM C128 โดยผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ที่มีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 800 ถึง 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรใช้อัตราส่วนน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 รวมทั้งหมด 26 สูตร ผลการศึกษาพบว่าปริมาณฟองอากาศที่ได้จากวิธีที่ (1) อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 13.3 ถึง 53.8 วิธีที่ (2) ในช่วงร้อยละ 39.4 ถึง 78.7 และ วิธีที่ (3) ในช่วงร้อยละ 36.7 ถึง 73.1 และ ปริมาตรของปูนซีเมนต์รวมกับทรายพบในช่วงร้อยละ 19.8-59 ของปริมาตรคอนกรีต จากการศึกษาอาจกล่าวได้ว่า ในทางปฏิบัติอาจเลือกใช้วิธีการหาปริมาณฟองอากาศและความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตโดยอาศัยวิธีตาม ASTM C128 และค่าปริมาตรรวมของปูนซีเมนต์กับทรายอาจสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาคุณสมบัติอื่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์

คำสำคัญ : คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ คอนกรีตโฟม ปริมาณฟองอากาศ ความพรุน ความถ่วงจำเพาะ

Abstract

This paper presents the determination of air content in cellular lightweight concrete using 3 methods: (1) Air Void Analyser, (2) calculation based on mix proportions and (3) porosity estimation using ASTM C128 for the determination of concrete specific gravity. Cellular lightweight concretes with unit weight between 800 kg/m^3 to 1800 kg/m^3 using water to cement ratios of 0.45 and 0.55 and sand to cement ratios of 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 and 3:1 in total of 26 designed mixes are produced. The air contents obtained using methods (1), (2) and (3) found in between 13.3 and 53.8 %, from 39.4 to 78.7 % and from 36.7 to 73.1%, respectively. The volume of cement and sand (solid content) found in between 19.8 and 59 percent of concrete volume. From the study, this may be concluded that in practice determination of porosity and concrete specific gravity based on ASTM C128 may be used, and solid content may be used to study the correlation of cellular lightweight concrete properties.

Keywords : cellular lightweight concrete, foam concrete, air content, porosity, specific gravity

1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (Cellular lightweight concrete) หรือ เรียกว่า คอนกรีตโฟม (Foam Concrete) เป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของมอร์ต้า กับโฟมเหลว ที่เตรียมจาก foaming agent ผสมกับน้ำในถังอัดอากาศ แล้วฉีดเข้าไปผสมกับมอร์ต้า โดยไม่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบ โฟมเหลวที่ฉีดเข้าไปก็คือฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตนั่นเอง ความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตขึ้นกับปริมาณฟองโฟมที่ใส่เข้าไป แต่โดยทั่วไปแล้ว เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วจะพบว่าปริมาณฟองอากาศที่ได้มีค่าแตกต่างจากที่ออกแบบไว้ [1-2] ซึ่งหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า อาจมีค่าได้ตั้งแต่ 300 ไปจนถึง 1920 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (20-120 lb/ft³) ใช้สำหรับเป็นวัสดุฉนวนบดล็อก และในงานโครงสร้าง [3-5]

คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าหรือคอนกรีตโฟมนี้ ขึ้นกับคุณสมบัติของโครงสร้างภายใน และส่วนผสมของคอนกรีต [6] ความพรุน หรือ ปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต ส่งผลอย่างมากต่อกำลังรับแรงและความคงทนของคอนกรีต คุณสมบัติการซึมผ่าน การดูดกลืนน้ำ การนำความร้อนและการดูดซับเสียง [7-9] และความพรุนยังใช้เป็นตัวบ่งชี้กำลังรับแรงของคอนกรีต [7-8] ความพรุนของคอนกรีตโฟมที่ผสมวัสดุพอซโซลานหรือ fly ash ที่หน่วยน้ำหนัก 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อาจพบว่ามีความพรุนอยู่ในช่วง 63-30 % [8] การหาความพรุนของคอนกรีตอาจใช้วิธี คำนวณส่วนผสม (Mix Design), Mercury intrusion porosimetry, Vacuum Saturate Apparatus, SEM และ Powder XRD เป็นต้น ซึ่งการทดสอบเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางและวิธีการที่ยุ่งยากซับซ้อน [8-10]

การศึกษานี้นำเสนอการประยุกต์หาปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า 3 วิธี ได้แก่ (1) วิธีการสแกนภาพแล้วนำเข้าโปรแกรมคำนวณ AirVoid Analyser (2) วิธีการคำนวณจากปริมาณส่วนผสม และ (3) การหาค่าความพรุนโดยคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตจาก ASTM C128 โดยผลิต

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 800 ถึง 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 รวมทั้งหมด 26 สูตร

2. กระบวนการผลิต

2.1 การเตรียมวัสดุผสม

(1) ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด (ทราย) และทดสอบหาค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 128 - Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate เพื่อใช้ในการออกแบบปริมาณส่วนผสม ในที่นี้ค่าความถ่วงจำเพาะของทราย อยู่ที่ประมาณ 2.7 และความสามารถในการดูดซึมน้ำมีค่า 1.6 เปอร์เซ็นต์

(2) การเตรียมน้ำยาสังเคราะห์ฟองโฟม

การเตรียมน้ำยาสังเคราะห์ฟองโฟมใช้อัตราส่วนสารสังเคราะห์ฟองโฟมต่อน้ำ คือ 1 ต่อ 30 แล้วทดสอบหาอัตราการขยายตัวของปริมาตรน้ำยาโฟม พบว่ามีค่าประมาณ 26 เท่า และ อัตราการไหลของฟองโฟมเหลว อยู่ที่ประมาณ 6.45 ลิตรต่อวินาที

2.2 การผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ขั้นตอนการผลิตและการทดสอบ มีดังนี้

- (1) เตรียมเครื่องผลิตโฟมเหลว โดยต่อเครื่องอัดอากาศเข้ากับถังรับแรงดันสำหรับผสมน้ำยาสังเคราะห์ฟองโฟม ใช้ น้ำยากับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 30 ใส่ลงในถังรับแรงดัน และปรับแรงดันให้อยู่ในช่วงประมาณ 0.60-0.65 MPa
- (2) ใส่ทรายและปูนซีเมนต์ลงในโม่ผสมคอนกรีต ผสมให้เข้ากัน แล้วใส่น้ำ ใช้เวลาประมาณ 2-3 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ฉีดโฟมเหลวใส่ไปในโม่ปล่อยให้โม่ทำงานประมาณ 1-2 นาที จนเห็นว่าส่วนผสมทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงเทคอนกรีตที่ผลิตเข้าแบบหล่อที่เตรียมไว้ รายละเอียดอัตราส่วนผสม สำหรับการศึกษาี้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสม

สูตร	หน่วย น้ำหนัก (kg/m ³)	s/c	w/c	ปริมาณฟอง โฟม (ร้อยละ)
1	800	0.25	0.45	60.71
2	800	0.25	0.55	58.73
3	800	0.5	0.45	62.52
4	800	0.5	0.55	60.86
5	1000	0.5	0.45	50.89
6	1000	0.5	0.55	48.41
7	1000	1	0.45	53.16
8	1000	1	0.55	51.07
9	1200	1	0.45	43.79
10	1200	1	0.55	41.29
11	1200	2	0.45	46.86
12	1200	2	0.55	44.97
13	1400	1	0.45	34.42
14	1400	1	0.55	31.5
15	1400	2	0.45	38
16	1400	2	0.55	35.8
17	1400	3	0.45	39.97
18	1400	3	0.55	38.22
19	1600	2	0.45	29.14
20	1600	2	0.55	26.63
21	1600	3	0.45	31.4
22	1600	3	0.55	29.39
23	1800	2	0.45	20.28
24	1800	2	0.55	17.46
25	1800	3	0.45	22.82
26	1800	3	0.55	20.56

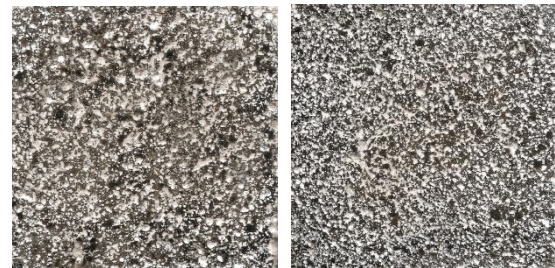
3. วิธีการศึกษา

3.1 การหาปริมาณฟองอากาศโดยใช้โปรแกรม Air

Void Analyzer

ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม Air Void Analyzer เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อหาปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตปกติพัฒนาขึ้น โดย Jeremy Carlson (2005), Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Tech University [11] สำหรับหาปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์กลา การ

เตรียมตัวอย่างดำเนินการโดยตัดตัวอย่างเป็นชิ้นขนาดกว้างประมาณ 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตรและหนา 2 เซนติเมตร สูตรละ 3 ตัวอย่าง และ เตรียมผิวหน้าคอนกรีตด้วยการโรยผงแป้งในช่องว่างอากาศที่ผิวตัวอย่าง แล้วทาสิค้ำบริเวณขอบโพรงอากาศและเนื้อคอนกรีต เพื่อให้เกิดความชัดเจนระหว่างส่วนที่เป็นเนื้อคอนกรีตกับฟองอากาศ จากนั้นสแกนผิวคอนกรีตควรใช้ความละเอียดสูง ในการศึกษานี้ใช้ที่ 2400 DPI แล้วนำเข้าภาพสแกนเพื่อให้โปรแกรมคำนวณหาปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต รูปที่ 1 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับนำเข้าโปรแกรม



รูปที่ 1 ภาพตัวอย่างคอนกรีตสำหรับนำเข้าโปรแกรม

3.2 การหาปริมาณฟองอากาศโดยใช้หลักการ

คำนวณหาค่าความพรุน

อัตราส่วนช่องว่าง หรือ Void Ratio (e) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างทั้งหมดกับปริมาตรของเนื้อคอนกรีต[12]

$$e = \left[\frac{\gamma_w G_{con}}{\gamma_d} \right] - 1 \quad (1)$$

เมื่อ

G_{con} คือ ความถ่วงจำเพาะของคอนกรีต

γ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ ($\gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$)

γ_d คือ ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีต (g/cm^3)

และ ค่าความพรุน (n) คือ เปอร์เซ็นต์ของช่องว่างอากาศที่มีอยู่ในคอนกรีต สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2)$$

โดยในการศึกษานี้จะทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของคอนกรีต (G_{con}) จาก 2 วิธีเพื่อเปรียบเทียบกัน ซึ่งวิธีแรกจะหาค่าจากการคำนวณปริมาณส่วนผสมที่ออกแบบไว้สำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์กลาตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 ส่วนวิธีที่สอง จะใช้วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะอาศัยมาตรฐาน ASTM C128

3.2.1 การหาความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตจากปริมาณส่วนผสมที่ออกแบบ

ความถ่วงจำเพาะของคอนกรีต (G_{con}) หาได้จากการนำปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตที่ออกแบบไว้มาคำนวณ[7] ตามสมการ(3)ข้างล่าง

$$G_{con} = \frac{(Wc \times Gc) + (Ws \times Gs)}{Wc + Ws} \quad (3)$$

เมื่อ

Wc คือ น้ำหนักปูนซีเมนต์ (กิโลกรัม)

Gc คือ ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

Ws คือ น้ำหนักทราย (กิโลกรัม)

Gs คือ ความถ่วงจำเพาะของทราย

3.2.2 การหาความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128

มาตรฐาน ASTM C128 [13] เป็นวิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด ในการศึกษาเห็นว่าด้วยหลักการเดียวกัน น่าจะสมารถนำคอนกรีตมวลเบาที่เป็นผงมาหาค่าความถ่วงจำเพาะได้ การทดลองดำเนินการโดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่แห้งแล้วมาบดให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 เพื่อให้ได้ผงคอนกรีตแล้วนำมาทดลองตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM C128 เพื่อคำนวณความถ่วงจำเพาะปรากฏของคอนกรีต (Apparent Specific Gravity) โดยใช้สมการที่ (4)

$$G_{con} = \frac{Wd}{Wb + Wd - Wa} \quad (4)$$

เมื่อ

G_{con} คือ ความถ่วงจำเพาะปรากฏของคอนกรีตมวล

เบาแบบเซลล์ตามมาตรฐาน ASTM C128

Wd คือ น้ำหนักคอนกรีตอบแห้ง (กรัม)

Wb คือ น้ำหนักขวด+น้ำจนถึงขีดทดลอง (กรัม)

Wa คือ น้ำหนักขวด+น้ำ+คอนกรีต จนถึงขีดทดลอง (กรัม)

4. ผลการศึกษา

4.1 การหาปริมาณฟองอากาศ

ปริมาณฟองอากาศ ที่ได้จาก วิธีที่ (1) โปรแกรม Air Void Analyzer พบว่ามีปริมาณฟองอากาศอยู่ในช่วง ร้อยละ

13.35 ถึง 53.78 วิธีที่ (2) เป็นการหาปริมาณฟองอากาศโดยหลักการหาค่าความพรุน (หัวข้อ 3.2) โดย ค่า Gs คำนวณจาก ปริมาณส่วนผสมที่ออกแบบ หรือ Mix Design วิธีนี้ ให้ค่าปริมาณฟองอากาศในช่วง ร้อยละ 39.38 ถึง 78.73 และ วิธีที่ (3) เป็นการหาปริมาณฟองอากาศโดยหลักการหาค่าความพรุนเช่นกันกับวิธีที่ (2) แต่ ทำการหาค่า Gs โดยใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASTM C128 ซึ่งผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์มีปริมาณฟองอากาศในช่วง ร้อยละ 36.77 ถึง 73.13

รูปที่ 2 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างกับร้อยละปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตที่หาโดยวิธี (1) ใช้โปรแกรม Air Void Analyzer คือ

$$y = -0.0278x + 63.046$$

สมการร้อยละปริมาณฟองอากาศที่หาโดยใช้วิธีการคำนวณ Gs จากปริมาณส่วนผสม (วิธีที่ 2)

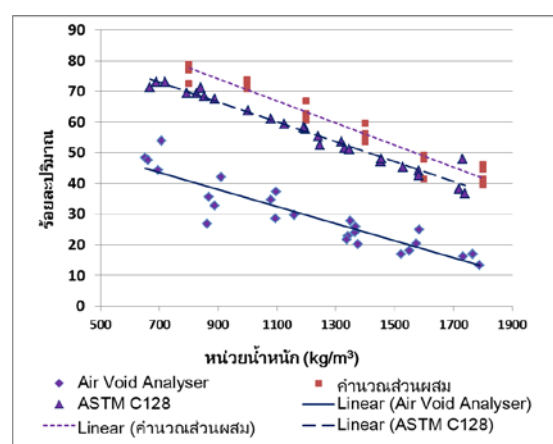
$$y = -0.036x + 106.56$$

การหาปริมาณฟองอากาศโดยหา Gs ตามมาตรฐาน ASTM C128 (วิธีที่ 3)

$$y = -0.0324x + 95.719$$

โดยค่า R^2 ของวิธีที่ (1), (2) และ (3) เท่ากับ 0.84, 0.95 และ 0.96 ตามลำดับ

เมื่อ y คือ ค่าร้อยละปริมาณฟองอากาศ x คือ หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3) และมีค่าระหว่าง 800-1800



รูปที่ 2 หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างกับร้อยละปริมาณฟองอากาศ

สูตรส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ที่พบว่ามีร้อยละปริมาณฟองอากาศต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละวิธีศึกษา แสดงในตารางที่ 2 ข้างล่าง

ตารางที่ 2 สูตรส่วนผสมที่พบว่ามีร้อยละปริมาณ
ฟองอากาศต่ำสุดและสูงสุด

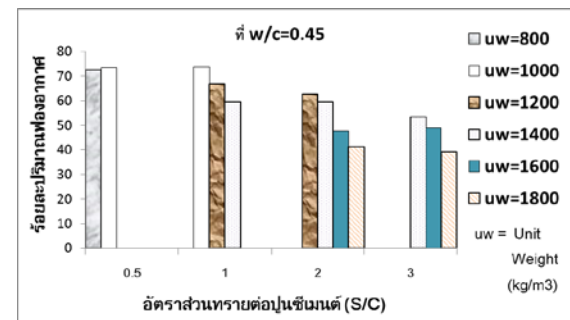
ร้อยละปริมาณฟองอากาศต่ำสุด				
วิธีการ	หน่วย น้ำหนัก	S/C	W/C	Air Content
(1) Analyzer	1800	2	0.45	13.35
(2) Mix Design	1800	3	0.45	39.38
(3) ASTM C128	1800	3	0.45	36.77
ร้อยละปริมาณฟองอากาศสูงสุด				
(1) Analyzer	800	0.25	0.55	53.78
(2) Mix Design	800	0.25	0.45	78.73
(3) ASTM C128	800	0.5	0.55	73.13

การหาปริมาณฟองอากาศโดยใช้โปรแกรม Air Void Analyzer ให้ค่าที่แตกต่างกันมากกับ การหาปริมาณฟองอากาศโดยใช้วิธีคำนวณส่วนผสม (Mix Design) และวิธีตามมาตรฐาน ASTM C128 โดย 2 วิธีหลังนี้ให้ค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันในช่วง ประมาณ 1-5 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นไปได้ว่าโปรแกรม Air Void Analyser เหมาะกับคอนกรีตปกติมากกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ดูล่า เนื่องจากโปรแกรมสามารถแยกแยะส่วนผสมได้อย่างชัดเจนระหว่างมวลรวมกับช่องว่างอากาศ ในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ดูล่านั้นที่ไม่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบและผิวคอนกรีตมีความเปราะบางของโครงสร้างฟองอากาศอย่างมาก โดยเฉพาะตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำ พลังฟองอากาศจะล้นง่าย การเตรียมผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบเป็นระนาบเดียวกันเหมือนกับคอนกรีตปคตินั้นค่อนข้างยากและในการลงสีเพื่อให้เห็นความชัดเจนระหว่างฟองอากาศกับเนื้อคอนกรีตบางส่วนพบว่าสีกลืนกันเป็นสีเทาซึ่งอาจกระทบต่อการประมวลผลของโปรแกรม ส่วนผลการทดสอบที่ได้ (รูปที่ 1)

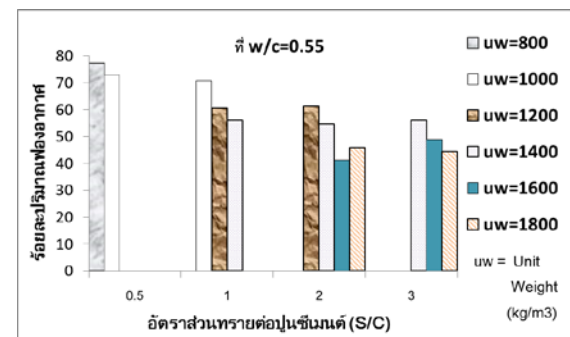
เมื่อพิจารณาปัจจัยอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) ดังในรูปที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบกรณี S/C = 0.5, 1, 2 และ 3 ใช้ W/C = 0.45 ไม่พบว่าการใช้ S/C ต่างกันส่งผลชัดเจนต่อปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต และ ในรูปที่ 4 เป็นกรณีใช้ W/C = 0.55 ก็เช่นเดียวกัน

ผลของปัจจัยของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีใช้ W/C = 0.45 (รูปที่ 3) และ

0.55 (รูปที่ 4) ดูเหมือนว่ากรณีที่ใช้ใช้น้ำมากกว่าให้ค่าปริมาณฟองอากาศต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ไม่พบว่ามีแนวโน้มที่ชัดเจน

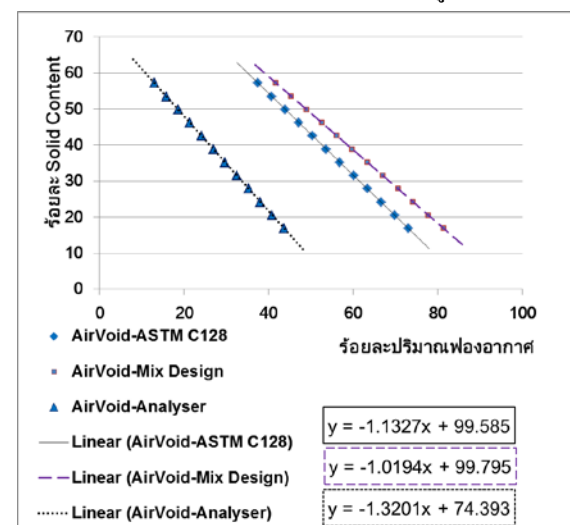


รูปที่ 3 ร้อยละของปริมาณฟองอากาศโดยใช้วิธีคำนวณส่วนผสมที่ S/C = 0.5, 1, 2 และ 3 กรณี W/C = 0.45



รูปที่ 4 ร้อยละของปริมาณฟองอากาศโดยใช้วิธีคำนวณส่วนผสมที่ S/C = 0.5, 1, 2 และ 3 กรณี W/C = 0.55

เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่เป็นของแข็ง ซึ่งก็คือปูนซีเมนต์และทราย หรือ เรียกว่า Solid Content พบว่ามีความสัมพันธ์กับปริมาณฟองอากาศ (Air content) อย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตแปรผกผันกับ Solid Content ดังสมการในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง solid content กับ air content ที่ได้จากทั้ง 3 วิธีการศึกษา

5. วิเคราะห์และสรุป

การศึกษานี้นำเสนอการประยุกต์หาปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์กล่่า โดยใช้ (1) โปรแกรม Air Void Analyser (2) วิธีการคำนวณจากปริมาณส่วนผสม และ (3) การหาค่าความพรุนโดยคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตจาก ASTM C128 และหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศ (Air content) กับปริมาตรของปูนซีเมนต์รวมกับทราย (Solid Content) พบว่า ปริมาณฟองอากาศที่ได้จากวิธีคำนวณส่วนผสมและวิธีตามมาตรฐาน ASTM C128 (วิธีที่ 2 และ 3) ให้ค่าที่ค่อนข้างสอดคล้องหลักการที่ว่าคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตรประกอบด้วยปริมาตรของ Solid Content รวมกับ Air content

ในทางปฏิบัติอาจเลือกใช้วิธีการหา Air Content และความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์กล่่าโดยอาศัยวิธีตาม ASTM C128 และ นอกจากค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตแล้ว Solid Content ก็อาจใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์กล่่าได้ด้วยเช่นกัน ดังตารางที่ 3 นำเสนอสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 สรุปผลการศึกษา

หน่วย น้ำหนัก ออกแบบ (kg/m ³)	ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต			Solid Content (%)
	Airvoid Analyser (%)	Mix Design (%)	ASTM C128 (%)	
800	48.3-53.8	72.5-78.7	69.5-73.1	19.8-22.8
1000	26.7-42	70.8-73.7	67.5-71.1	24.8-28.5
1200	28.6-37.3	60.5-66.8	57.8-63.8	32.8-37.5
1400	20.2-27.8	53.5-59.7	51.2-58.2	38.3-45.9
1600	16.8-24.9	41.2-49	45.2-48	48.6-52.4
1800	13.3-17	39.4-46	36.7-44	54.7-59

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Fouad H. Fouad, "Cellular concrete," J.F.Lamond and J.H.Pielert (eds), In Significance of Tests and Properties of concrete and concrete- making

material, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 561-569, 2006.

- [2] N. Narayanan and K. Ramamurthy, "Structure and properties of aerated concrete: a review," Cement & Concrete Composites, Vol.22, pp.321-329, 2000.
- [3] M.S. Shetty, "Concrete Technology: Theory and Practice," S.CHAND&COMPANY, Ram Nagar, New Delhi, 2000.
- [4] M L. Gambhir, "Concrete Technology: Theory and Practice," 5ed., McGraw Hill Education (India) Private Limited, New Delhi, 2013.
- [5] TIS 2601-2556, Cellular Lightweight Concrete Blocks using Preformed Foam," Thai Industrial Standard Institute, Ministry of Industry, 2556.
- [6] E.K.K. Nambiar and K. Ramamurthy, "Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology," Cement & Concrete Composites, Vol.28, pp.752-760, 2006.
- [7] A. Bouguerra et al., "Effect of Microstructure on the Mechanical and thermal Properties of Lightweight Concrete Prepared from Clay, Cement, and Wood Aggregates," Cement and Concrete Research, Vol.28, No.8, pp1179-1190, 1998.
- [8] E.P.Kearsley and P.J. Wainwright, "Porosity and Permeability of foamed concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp.805-812, 2001.
- [9] E.K.K. Nambiar and K. Ramamurthy, "Air void characterisation of foam concrete," Cement and Concrete Composites, Vol. 37, pp.221-230, 2007.
- [10] N. Narayanan and K. Ramamurthy, "Microstructural investigations on aerated concrete," Cement and Concrete Research, Vol.30 pp.457-464, 2000.
- [11] J. Carlson, "Advancement on the Application of a Flat-Bed Scanner for Hardened Portland Cement Concrete Air Void Analysis," Thesis, Michigan Tech University, 2005.
- [12] R.F.Craig, "Soil Mechanics," Chapman&Hall, 1996.
- [13] ASTM C128-97 Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความฉบับนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความ
อนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความขอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่าน
ด้วยดีในโอกาสต่อไป

ผศ.ดร.มนตรี คำเงิน

ดร.บรรพต ศิริณัฐสมบุญ

รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ดร.ญาณิพร พัชรวโรชิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

ดร.เอกชัย ศิริกิจพานิชกุล

ดร.จิตรภรณ์ วงศาางาม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์

ผศ.ดร.เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์

ดร.จำรัส พิทักษ์ศฤงคาร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

อ.นัฐพร นวกิจรังสรรค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุสมผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชาการนั้นมาประยุกต์ใช้

รูปแบบในการพิมพ์บทความ

บทความที่เสนอการจัดพิมพ์ด้วย **Microsoft Word** (หรือซอฟต์แวร์อื่นที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน) ขนาดกระดาษที่จัดพิมพ์จะเป็นขนาด A4 โดยกำหนดขอบ (Margins) ในการตั้งหน้ากระดาษ (Page Setup) ดังนี้

- ระยะบน (Top Margin) 1" หรือ 2.54 ซม.
- ระยะล่าง (Bottom Margin) 1" หรือ 2.54 ซม.
- กั้นซ้าย (Left Margin) 1" หรือ 2.54 ซม.
- กั้นขวา (Right Margin) 1" หรือ 2.54 ซม.

การแบ่งส่วน (Section) ควรแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรก กำหนด (format) เป็นคอลัมน์เดี่ยว ส่วนที่สอง กำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26" หรือ 0.7 ซม. เนื้อเรื่อง ผู้เขียนและผู้ร่วมงาน สถานที่ทำงาน และบทคัดย่อจะอยู่ในส่วนแรก ส่วนอื่น ๆ ที่เหลือของบทความจะอยู่ในส่วนที่สอง

ขนาดตัวอักษร

รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ **Angsana UPC** สำหรับบทความที่มีภาษาไทยปนกับภาษาอังกฤษ และให้ใช้รูปแบบตัวอักษร **Times New Roman** สำหรับบทความซึ่งเป็นภาษาอังกฤษล้วน ขนาด (Pica Size) ของแบบตัวอักษรแบบ Angsana UPC กำหนดดังนี้ (หากเป็นรูปแบบ Times New Roman ให้ใช้ขนาดของตัวอักษรที่มีความสูงเท่ากัน)

- ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ขนาด 26 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
ขนาด 14 ตัวปกติ
- สถานที่ทำงาน
ขนาด 12 ตัวปกติ
- คำว่า “บทคัดย่อ”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความในบทคัดย่อ และส่วนของเนื้อความทั้งหมด
ขนาด 14 ตัวปกติ
- คำว่า “Abstract”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความใน Abstract
ให้ใช้ Angsana UPC ขนาด 16 ตัวปกติ

- หัวข้อและหมายเลขประจำหัวข้อ
ขนาด 16 ตัวหนา
- หัวข้อย่อยและหมายเลขประจำหัวข้อย่อย
ขนาด 14 ตัวหนา
- คำว่า “กิตติกรรมประกาศ” หรือ “Acknowledgement”
ขนาด 16 ตัวหนา
- คำว่า “เอกสารอ้างอิง” หรือ “Reference”
ขนาด 16 ตัวหนา

การพิมพ์บทความ

ให้ใช้ระยะห่างบรรทัดปกติ (Single space) เมื่อขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้น 1 บรรทัด ในกรณีเมื่อเอกสารจัดพิมพ์ด้วย Times New Roman ทั้งหมด ให้ใช้ระยะห่างบรรทัดเป็นหนึ่งบรรทัด (Single space) หรือ หนึ่งบรรทัดครึ่ง

ชื่อบทความ ชื่อผู้เขียน และสถานที่ทำงาน

ให้จัดพิมพ์ในตำแหน่งกลางหน้ากระดาษ

บทคัดย่อและเนื้อเรื่อง

ให้จัดพิมพ์แบบเต็มขอบ (Left & Right Justified)

คำสำคัญ (Keywords)

ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ได้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

หัวข้อและหมายเลขหัวข้อ

ให้จัดพิมพ์แบบชิดซ้าย (Right Justified)

สมการ หรือ พจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ **Equation Editor** (รวมอยู่ใน Microsoft Word แล้ว) โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับสมการซึ่งอยู่ในวงเล็บเล็ก

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 6 หน้า 2 คอลัมน์ โดยติดต่อขอส่งได้ที่ E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต บทความจะได้รับผลการค้นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และชุดข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

แบบฟอร์มการส่งบทความ

เลขที่อ้างอิง.....

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

.....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

.....

ประเภทบทความ



บทความวิชาการ



บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

.....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย) และ (ภาษาอังกฤษ)

1..... 1.....

2..... 2.....

3..... 3.....

4..... 4.....

5..... 5.....

6..... 6.....

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

.....

เบอร์โทรศัพท์.....

เอกสารประกอบการส่งบทความ

บทความต้นฉบับ 1 ชุด และ

สำเนา 3 ชุด (พร้อมลบชื่อผู้แต่งและที่อยู่)

แบบฟอร์มสั่งซื้อวัสดุสารลาดกระบัง และ สมุดรสมาชิก

ชื่อ.....นามสกุล.....

สถานที่จัดส่งหนังสือ.....

จังหวัด.....รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

สมุดรสมาชิกวัสดุสารลาดกระบัง

- | | |
|--|--|
| ☐ ปี 2553 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2556 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2554 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2557 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2555 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2558 ค่าสมัคร 200 บาท |

หมายเหตุ ปีละ 4 ฉบับ (รวมค่าจัดส่ง)

ต้องการซื้อวัสดุสารลาดกระบัง

- | | |
|---|--|
| ☐ เล่มที่ 1 / 2557 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 1 / 2558 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 2 / 2557 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 2 / 2558 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 3 / 2557 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 3 / 2558 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 4 / 2557 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 4 / 2558 ราคา 100 บาท |
| ☐ อื่น ๆ ปีที่.....ฉบับที่.....ประจำเดือน.....พ.ศ..... | |

รวมรายการทั้งหมด.....รายการ เป็นเงิน.....บาท

ชำระค่าสั่งซื้อโดย

- ☐ เงินสด แผนกตำรา วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....
- ☐ ธนาคารที่ส่งจ่ายในนาม แผนกตำรา
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520 ที่ทำการเคาน์เตอร์บริการเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 00016
- ☐ ผ่านบัญชีออมทรัพย์ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขาซอยเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520
ชื่อบัญชี “แผนกตำราและประชาสัมพันธ์” เลขที่ 088 – 2 15272 – 2

ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานบริหารการวิจัย ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2329-8000 ต่อ 3464, 3465

(ท่านสามารถแฟกซ์ใบสั่งซื้อ และ เอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่เบอร์แฟกซ์ : 0-2329-8317

การจัดส่งหนังสือจะรวดเร็วขึ้น)

Ladkrabang Engineering Journal

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

Contents:

The journal contains research reports, articles concerning development work and research activities carried out by the faculty staff. The objectives are to publicize and promote the research contributions and innovative works in the field of engineering.

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:

Four copies not exceed 6 two-column-pages (one copy with author names, three copies without author names) of either Thai or English manuscript are to be submitted in camera ready form. To ensure that all papers are at the same standard, authors are asked to prepare their manuscripts in computerized format. Microsoft Word for windows[®] is recommended as a text processor. Others associated components such as graphs or figures should be prepared using windows-based packages.

Manuscripts are to be reviewed by at least 3 referees who are specialists in that fields. Comments and suggestions (if any) are summarized before they are passed to authors. Revised form of the manuscripts have to be resubmitted with a copy of the manuscript in a disk file.

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. Choeksuwan 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:

1. Submit two pdf files Manuscript with and without authors / affiliation at the first page.
2. Submit the pdf file of the paper submission form.

At E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

Published by

Faculty 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 of Engineering

Assoc.Prof. Dr.Komsan Maleesee

Editor-in-chief

Assoc.Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

Editorial Staff

Mr.Kamol Wadkhean

Cover Design and Photo Books

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Liaise & Member Relationships

Create Original Artwork & Proofreading

Distributed by

Faculty of Engineering,

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Tel : (662) 329-8317