



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 33 ฉบับที่ 3

กันยายน 2559

บทความวิจัย

1. การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับการวิเคราะห์กระแสฟลัดแบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง 1
ปดินทร วัฒนะรัตน์ สมชาติ จิรวิภากร นิรุธ จิรสวรรณกุล
2. การศึกษากระบวนการสร้างและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเอ็นมอสขนาด 0.5 ไมครอน 8
รังสรรค์ เมืองเหลือ อนุชา เรืองพานิช
3. การวิเคราะห์ความเค้นของแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยวิธีพลศาสตร์มีลติบอดีและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 16
อนุชิต มงคล มนต์ศักดิ์ พิมสาร
4. การวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างแบบรังผึ้งของวัสดุคอมโพสิทไม้มะพร้าว – ซีเมนต์ 24
ปณปวีร์ จงรัตน์ศรีสกุล สมชัย นรเศรษฐ์ไศภณ
5. การออกแบบหัตถ์ดูดอากาศแบบสลิ้อตสำหรับกระบวนการชุบโลหะ 32
ภัทรพันธุ์ ทมาตแก้ว กิรติ สุลักษณ์
6. ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโตนดและแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติของแผ่นใยไม้อัดปลดสารพิษ 39
ชาตรี หอมเขียว วรพงศ์ บุญช่วยแทน วรธนพร ชีวภูมิพงศ์
7. การเลือกรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์เพื่อลดต้นทุนการซ่อมบำรุงรถบรรทุก; กรณีศึกษาการบรรทุกสินค้าเกษตร 47
ชาญชัย เหลาหา ศิขรินทร์ สุขโต
8. ค่าพลังงานความร้อนรายปีและต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ 55
พรนิภา นุโนชา ธวัช สุริวงษ์



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 33 Number 3

September 2016

Research Papers

1. A Comparative Study between ANN and ANFIS for Asymmetrical Fault Current Analysis in
Power Systems 1
B. Wattanarat and S. Jiriwibhakorn
2. Study of Fabrication and Electrical Characteristics of NMOS 0.5 Micron 8
R. Muanghlua and A. Ruangphanit
3. Passenger Car Jack Stress Analysis Using Multi-Body Dynamics and Finite element Methods 16
A. Mongkol and M. Pimsarn
4. Design and Analysis of Wood-Cement Composite Honeycomb Sandwich Structure 24
P. Jongratsrikul and S. Norasethasopon
5. Design of Slot Hood for Plating Process 32
P. Thamatkeng and K. Suluksna
6. Effect of Palmyra Fruit Fiber and Tapioca Starch Contents on Properties of Non-Toxic
Fiberboard 39
C. Homkhiew W. Boonchouytan and W. Cheewawuttipong
7. Economics Model Selection for Truck Maintenance Costs Reduction; Agricultural Truck
Case Study 47
C. Laoha and S. Sukto
8. Annual Energy Yield and Life Cycle Cost (LCC) of a New Prototype of Evacuated Tube
Collector (ETC) 55
P. Nunocha and T. Suriwong

“วิศวกรรมลาดกระบัง”

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เป็นเอกสารรวบรวมรายงาน และบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

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

รูปแบบของบทความ

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

บทความที่น่าสนใจเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

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

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465
โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คมบดี
รศ.ดร.คมสัน มาลีสี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศ.ดร.อิสระชัย งามหุ

กองบรรณาธิการ

นายโกลล วาดเขียน
ออกแบบปกและรูปเล่ม
นางอาทิสดา ขาววิจิตรณ์
ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์
จัดทำต้นฉบับ Artwork
พิสูจน์อักษร

จัดทำจำหน่ายโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางอาทิสดา ขาววิจิตรณ์
โทร. 02-329-8317

กิตติกรรมประกาศ

(ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง

การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan and S. Choomchuay, “The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic,” Ladrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltas, “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 8 หน้า 2 คอลัมน์ ส่วนหน้าที 9 เป็นต้นไป ต้องเสียค่าตีพิมพ์หน้าละ 500 บาท โดยติดต่อส่งได้ที่ E-mail : kmitleng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สรวิทย์ สุจิตตร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนาย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร

สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูง

(THAIST)

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ ANN และ ANFIS สำหรับ การวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลัง

A Comparative Study between ANN and ANFIS for Asymmetrical Fault Current Analysis in Power Systems

บดินทร วัฒนรัตน์ สมชาติ จิรวิภากร นิรุช จิรสวรรณกุล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรที่ตำแหน่งของบัสและสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบมีหลายชั้นซ่อนชนิดที่มีการแพร่ค่าย้อนกลับ (ANN) เปรียบเทียบกับ ระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (ANFIS) โดยทั้งสองระบบจะถูกนำมาเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดกระแสฟอลต์และชนิดของกระแสฟอลต์ ที่มีผลต่อกระแสฟอลต์ สำหรับข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มาจากการจำลองระบบ IEEE 30 บัส และระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผลที่ได้จากระบบดังกล่าวถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จากโปรแกรม PowerWorld ซึ่งผลที่ได้ชี้ให้เห็นให้ข้อสรุปว่า การใช้ ANN สามารถหาคำตอบได้แม่นยำกว่า ANFIS

คำสำคัญ : การวิเคราะห์กระแสฟอลต์, โครงข่ายประสาทเทียม, ระบบอนุมานโครงข่ายปรับตัวได้

Abstract

This paper presents the asymmetrical fault analysis at the location of buses and lines in the power system. Artificial Neural Network typed Multi Layer Neural Networks with Back-Propagation learning algorithm (ANN) is compared with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS). The ANN and ANFIS are used to learn the relationship between fault location and fault type, which effect on fault current. The data used in this study came from IEEE 30-bus and EGAT North-eastern area which calculated by PowerWorld program. The analysis result shows that the ANN obtains more accurate solutions than the ANFIS.

Keywords : Fault current analysis, Artificial Neural Network, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems

1. บทนำ

ในปัจจุบันการศึกษาเรื่องการลัดวงจรเป็นสิ่งจำเป็นในการป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง การเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งอาจเกิดได้จากธรรมชาติ ความผิดพลาดหรือความตั้งใจของมนุษย์ ทุกครั้งที่เกิดการลัดวงจรจะมีกระแสไหลมากผิดปกติ และถ้าไม่มีการป้องกันหรือกำจัดจุดที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบให้เร็วที่สุด จะทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบเสียหายได้ ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน

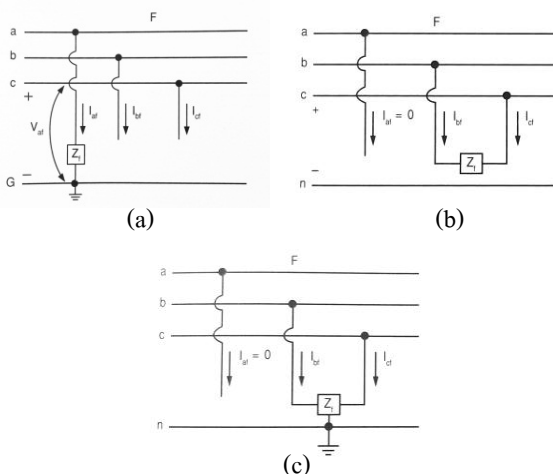
การคำนวณขนาดกระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นไม่ว่ามีความรุนแรงมากน้อยเพียงใด อุปกรณ์ตัดตอนหรืออุปกรณ์ป้องกันจะต้องทำงานได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว และสามารถทนต่อความรุนแรงของการเกิดฟอลต์นั้นได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการคำนวณหากระแสฟอลต์เพื่อใช้ประกอบในการเลือกขนาดและชนิดของอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันนั้นๆ [1] ซึ่งการคำนวณหากระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์เช่น สายส่ง หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ และนำมาคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงเริ่มมีการนำระบบโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีคุณสมบัติในการเรียนรู้และสามารถหาคำตอบของระบบที่มีความซับซ้อนได้ดี มาประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังเช่น นำมาหาคำแหน่งการเกิดฟอลต์ [3] นำมาใช้หาชนิดและรูปแบบของฟอลต์ [4] ใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์แบบสมมาตร [5]

ในบทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการนำเสนอวิธีการนำระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System : ANFIS) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณขนาดกระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของบัสและบนสายส่งที่ตำแหน่งต่างๆ โดยทำการศึกษาจากระบบทดสอบ IEEE 30 bus และระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีจำนวนบัสและความยาวสายส่งมากที่สุด จึงเป็นภาคที่มีสถิติการเกิด

ฟอลต์มากที่สุดในประเทศไทย โดยทำการจำลองด้วยโปรแกรม PowerWorld และได้มีการเปรียบเทียบกระแสฟอลต์ที่ได้จากการคำนวณระหว่างโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) กับระบบอนุมานนิวโรฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (ANFIS)

2. ฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Fault)

การเกิดความผิดปกติหรือ ฟอลต์ (Fault) คือ การเกิดความผิดปกติที่ทำให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตามปกติ ส่วนมากจะเปิดฟอลต์ที่เกิดจากการลัดวงจร (Short Circuit Fault) ซึ่งจำแนกออกได้เป็นสองประเภทคือ ฟอลต์แบบสมมาตร (Symmetrical Fault) และฟอลต์แบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Fault) ซึ่งฟอลต์แบบไม่สมมาตรนั้น มีโอกาสเกิดมากที่สุดถึงร้อยละ 98 โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ ฟอลต์ 1 เฟสลงดิน (Single line to ground fault), ฟอลต์ระหว่างเฟส (Line to line fault) และฟอลต์ 2 เฟสลงดิน (Double line to ground fault) [6]



รูปที่ 1 : (a) การเกิดฟอลต์แบบ 1 เฟสลงดิน (b) การเกิดฟอลต์ระหว่างเฟส (c) การเกิดฟอลต์ 2 เฟสลงดิน

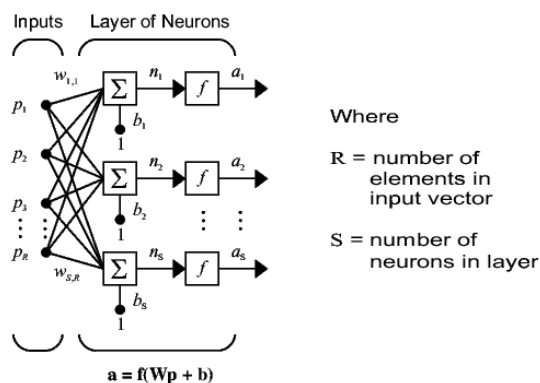
3. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural

Network : ANN)

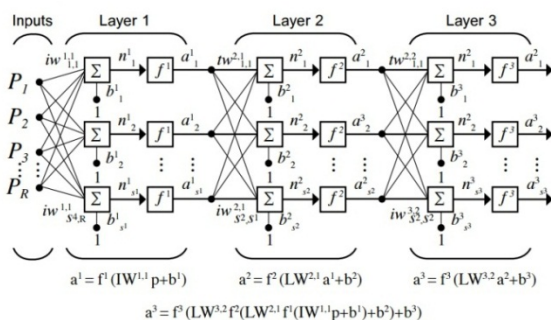
ANN คือ ระบบการคำนวณที่สร้างเลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการคาดคะเนเหตุการณ์จากข้อมูลที่มีอยู่ ANN ประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neural) ซึ่งจำลองมาจากการทำงานของระบบสมองมนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer

Function, f) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight, w) และค่าไบแอส (Bias, b) เป็นเครื่องมือจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาท ดังรูปที่ 1 เซลล์ประสาทหลายส่วนจะถูกเชื่อมต่อกันให้เกิดเป็นลักษณะโครงข่ายเป็นชั้น (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มีมีการเชื่อมต่อกัน

โครงสร้างการเชื่อมต่อโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Networks) ดังรูปที่ 2 ซึ่งโครงสร้างประกอบขึ้นจากการจัดเรียงตัวของเซลล์ประสาทตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป (ไม่นับชั้นอินพุต) โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นจะอยู่ในรูปของการทำงานที่ป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward) และชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต เรียกว่าชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งเป็นตัวเพิ่มความสามารถให้แก่โครงข่ายประสาทเทียม และสามารถมีชั้นซ่อนได้มากกว่า 1 ชั้น จำนวนของชั้นซ่อนและจำนวนของเซลล์ประสาทในแต่ละชั้นมีค่าไม่คงที่ ซึ่งในแต่ละชั้นอาจจะมีจำนวนเซลล์ประสาทที่แตกต่างกัน [2], [9]



รูปที่ 2 : โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว



รูปที่ 3 : โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

4. ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System : ANFIS)

ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference system, ANFIS) เป็นการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งมีข้อดีในเรื่องของการเรียนรู้แต่ไม่สามารถอธิบายถึงการได้มาของการตัดสินใจได้ ร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) ซึ่งมีคุณสมบัติในการให้เหตุผลเชิงมนุษย์ แต่ไม่สามารถเรียนรู้ได้โดยอัตโนมัติ โดยระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของอนุมานฟัซซี่ (Fuzzy Inference) และวิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation) ของโครงข่ายประสาทเทียม [5]

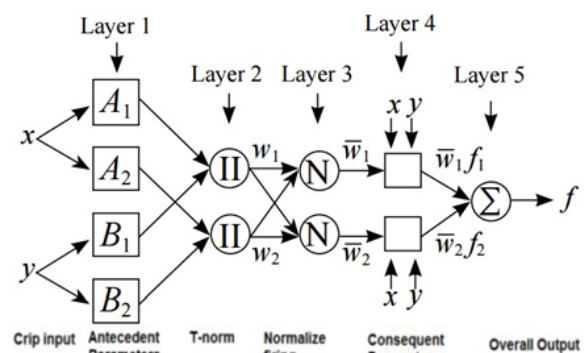
จากรูปที่ 4 เป็นโครงสร้างระบบอนุมานนิเวศฟัซซี่ที่มี 2 อินพุต 1 เอาต์พุต แต่ละอินพุตแบ่งเป็น 2 ฟัซซี่เซต แต่ละเซตประกอบด้วย A_1, A_2 และ B_1, B_2 พารามิเตอร์ของเอาต์พุตเป็น p, q และ r โดยมีกฎจำนวน L กฎ ดังนี้

Rule1: IF x_1 is A_1 and x_2 is B_1 THEN $f_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$

Rule2: IF x_1 is A_2 and x_2 is B_2 THEN $f_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$

⋮

RuleL: IF x_1 is A_L and x_2 is B_L THEN $f_L = p_Lx_1 + q_Lx_2 + r_L$



รูปที่ 4 : โครงสร้างระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ [5]

โดยมีโครงสร้างประกอบไปด้วย 5 ชั้นดังนี้

ชั้นที่ 1 : Antecedent Parameters เป็นการหาค่าฟัซซี่จากอินพุตในรูปแบบ (Crisp input, x) ให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_{A_i} หรือ μ_{B_i} โดยที่

$$O_j^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (1)$$

เมื่อ O_j^1 เป็นค่าความเป็นสมาชิกของ A_i ที่เกิดจากค่า x โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก อาจเป็นฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยม รูปประฆังคว่ำหรือแบบอื่นก็ได้

ขั้นที่ 2: T-norm Operator หรือขั้นกฎของฟัซซี่ (fuzzy rule base) เป็นขั้นทำการเชื่อมโยงค่าฟัซซี่จากแต่ละมิติและส่งค่าผลคูณของฟัซซี่เป็นสัญญาณออก

$$w_j = \mu_{j1}(x_1)\mu_{j2}(x_2) \quad (2)$$

เมื่อ w_j เป็นค่า firing strength จากกฎแต่ละข้อ และ $\mu_{j1}(x_1)$ เป็นค่าฟัซซี่จากมิติที่ i ของกฎข้อที่ j

ขั้นที่ 3: Normalize firing strength หรือขั้นค่าถ่วงน้ำหนัก เป็นการนำค่าฟัซซี่ผลรวมจากข้อตั้งทุกกฎให้เป็นหนึ่งเดียว

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{w_1 + w_2 + \dots + w_L}, \quad j = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

ขั้นที่ 4: Consequent Parameters เป็นขั้นของเอาต์พุตพารามิเตอร์ ซึ่งหาได้จาก

$$\bar{w}_j f_j = \bar{w}_j (p_j x_1 + q_j x_2 + r_{j0}) \quad (4)$$

ขั้นที่ 5: Overall Output เป็นขั้นเอาต์พุตของโครงข่าย โดยการดีฟัซซี่ฟิเคชัน (Defuzzification) ด้วยการรวมสัญญาณเข้ามาทั้งหมด

$$\bar{w}^T f = \sum_{j=1}^L \bar{w}_j f_j \quad (5)$$

เมื่อ $\bar{w}^T = [\bar{w}_1 \bar{w}_2 \dots \bar{w}_L]$ เป็นค่าฟัซซี่ที่ผ่านวิธีอนุมอลไลซ์จากกฎข้อ 1 ถึง L และ $f^T = [f_1 f_2 \dots f_L]$ เป็นส่วนเอาต์พุตของกฎข้อ 1 ถึง L

5. ระบบที่ใช้ในการจำลอง

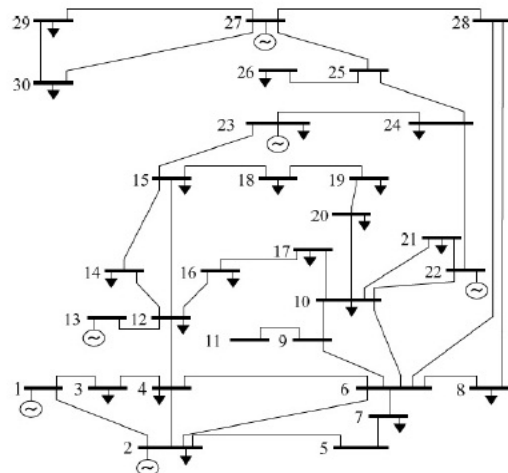
ระบบที่ใช้ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลของกระแสฟอลต์ได้เลือกใช้ระบบไฟฟ้า 2 ระบบ ได้แก่

1. ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส เป็นระบบไฟฟ้ามาตรฐานระดับกลาง ประกอบไปด้วยบัสทั้งสิ้น 30 บัส มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 เครื่อง ดังรูปที่ 5 ใช้โปรแกรม PowerWorld ทำการจำลองระบบ โดยกำหนดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมทั้งระบบ 460 MW ซึ่งเป็นกำลังผลิตสูงสุดในระบบ [10]

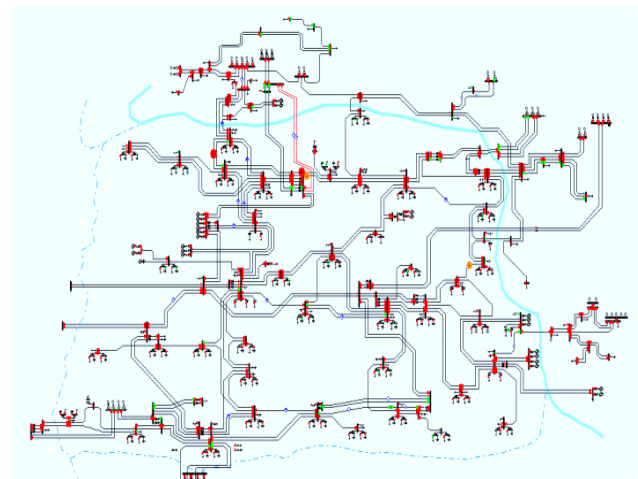
2. ระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ประกอบด้วยบัสที่ระดับแรงดัน 230 kV จำนวน 17 บัส, 115 kV จำนวน

56 บัส, สายส่ง 230 kV 12 วงจร และ 115kV 73 วงจร ดังรูปที่ 6 มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 38 เครื่องและกำหนดกำลังผลิตรวมในพื้นที่ 2,980 MW

ทำการจำลองระบบทดสอบ IEEE 30 บัสและระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. เพื่อหากระแสฟอลต์ที่แบบไม่สมมาตรชนิด Single-line-to ground, Line-to-line และ Double line-to-ground ที่ตำแหน่งของแต่ละบัสทุกบัส และที่ตำแหน่ง 25%, 50% และ 75% ของความยาวสายส่งในแต่ละสายส่ง โดยทำการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ และชนิดของฟอลต์ที่เกิดขึ้น สำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 บัสนั้น มีข้อมูลทั้งหมด 396 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลชุดฝึกสอน 336 ชุด และชุดทดสอบ 60 ชุด ระบบของ กฟผ. มีข้อมูลทั้งหมด 780 ชุด แบ่งเป็นข้อมูลชุดฝึกสอน 640 ชุด และชุดทดสอบ 140 ชุด สำหรับข้อมูลในแต่ละชุดจะประกอบไปด้วย 4 อินพุตและ 1 เอาต์พุต โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1



รูปที่ 5: ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส [10]



รูปที่ 6 : ระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ.

ตารางที่ 1 : แสดงข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต

	ข้อมูลที่ให้	Data Value
INPUT1	หมายเลขบัสใกล้เคียง (Near BUS)	1, 2, 3, ...
INPUT2	หมายเลขบัสไกล (Far BUS)	1, 2, 3... (กรณีเกิดฟอลต์ที่บัสใช้ค่า INPUT1)
INPUT3	ตำแหน่งที่เกิดฟอลต์จากบัสใกล้เคียง	0.25 = ห่างจากบัส 25% 0.50 = ห่างจากบัส 50% 0.75 = ห่างจากบัส 75% 1.00 = เกิดฟอลต์ที่บัส
INPUT4	ชนิดของฟอลต์	2 = SLG fault 3 = L-L fault 4 = DLG fault
OUTPUT	กระแสฟอลต์	kA

6. ผลการจำลอง

6.1 การฝึกสอนและทดสอบระบบ ANN

ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน โดยจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้นซ่อน และชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน เป็นการเลือกมาจากการลองผิดลองถูก (Trial and error)

การพิจารณาความสามารถในการหาคำตอบนั้น สามารถพิจารณาได้จากค่าความผิดพลาด โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าความผิดพลาดรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error : RMSE) ดังสมการที่ 6

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (6)$$

เมื่อ Y_i คือ ค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Power world, $\hat{Y}_i$ คือ ค่าที่ได้จากการทำนายโดยโครงข่าย ANN หรือ ANFIS และ n คือจำนวนข้อมูลฝึกสอนหรือทดสอบ

ในระบบ IEEE 30 บัส ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับที่มี 2 ชั้นซ่อน ชั้นซ่อนที่ 1, ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น Tan-Sigmoid ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt จำนวนรอบการเรียนรู้ 300 epochs โดยค่า Weight Bias เริ่มต้น

จากการสุ่ม ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2 สำหรับระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ค่าย้อนกลับมี 2 ชั้นซ่อน ชั้นซ่อนที่ 1 ชั้นซ่อนที่ 2 และชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน Tan-Sigmoid, Log-sigmoid และ Linear ตามลำดับ ใช้กระบวนการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquardt จำนวนรอบการเรียนรู้ 300 epochs โดยค่า Weight Bias เริ่มต้นจากการสุ่ม ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

ทั้งสองระบบจะกำหนดโครงสร้างของจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1-2 เท่ากับ 11-10 ถึง 20-19 โดยในแต่ละโครงข่ายจะทำการฝึกสอน 20 ครั้งและเลือกครั้งที่ให้ค่าความผิดพลาดของชุดทดสอบที่น้อยที่สุดมาเปรียบเทียบ

6.2 การฝึกสอนและทดสอบระบบ ANFIS

โครงข่ายของ ANFIS เลือกใช้โมเดลฟัซซี่ Sugeno อันดับที่ 1 อินพุตที่ใช้คือตำแหน่งและชนิดของฟอลต์แบบไม่สมมาตร เอาต์พุตคือค่ากระแสฟอลต์

ในระบบ IEEE 30 บัส ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ dsigmf กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid) และจำนวนรอบการคำนวณ 300 epochs ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3 และระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ gbellmf กระบวนการเรียนรู้แบบผสมและจำนวนรอบการคำนวณ 300 epochs ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4

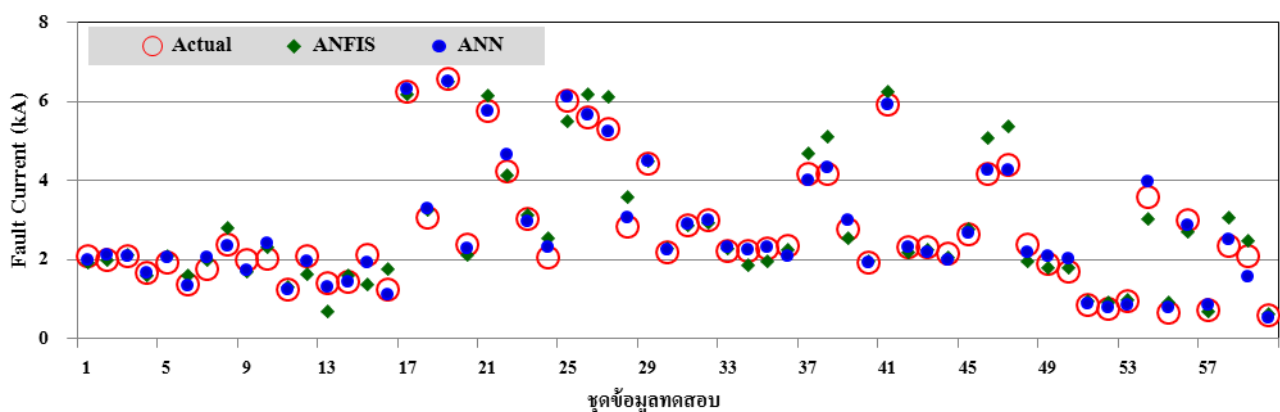
ตารางที่ 2 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงข่ายต่างๆ สำหรับ ANN ของระบบ IEEE 30 บัสและระบบ กฟผ.

จำนวนนิวรอน ในชั้นซ่อนที่ 1-2	Test error (RMSE)	
	IEEE 30 บัส	ระบบ กฟผ.
11-10	0.1964	0.2781
12-11	0.1767	0.2809
13-12	0.1813	0.2525
14-13	0.1803	0.2233
15-14	0.2493	0.2580
16-15	0.2118	0.2960
17-16	0.1714	0.2407
18-17	0.2295	0.2729
19-18	0.2627	0.2662
20-19	0.2277	0.2751

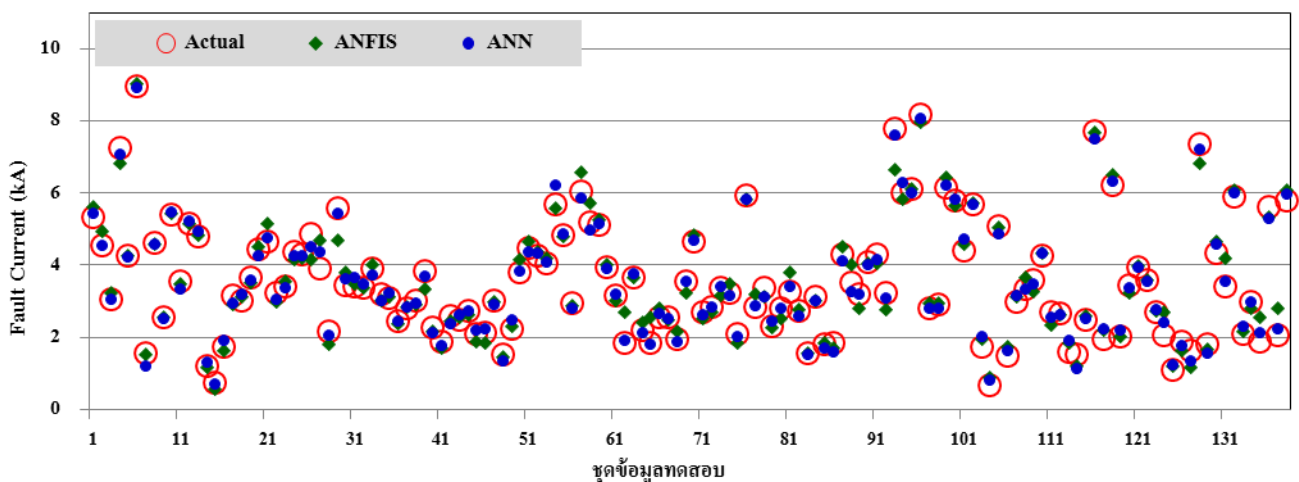
ตารางที่ 3 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ สำหรับ ANFIS ของระบบ IEEE 30 บัส

จำนวนโหนดอินพุต	Test error (RMSE)
3 3 3 4	0.3934
3 4 3 3	0.7180
4 3 3 3	0.7828
3 3 4 4	1.6054
4 4 3 3	1.9097
4 3 4 3	5.0398
3 4 3 4	0.7124

จากตารางที่ 3 ในระบบ IEEE 30 บัส โครงสร้างของ ANFIS ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 เท่ากับ 3 3 3 4 เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดฝึกสอนต่ำที่สุด เมื่อนำค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จาก ANN และ ANFIS มาเปรียบเทียบกับค่าจริงของชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 : เอาท์พุทที่ได้จาก ANN และ ANFIS เปรียบเทียบกับค่าจริงของระบบ IEEE 30 บัส



รูปที่ 8 : เอาท์พุทที่ได้จาก ANN และ ANFIS เปรียบเทียบกับค่าจริงของระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ตารางที่ 4 ค่าความผิดพลาด RMSE ในโครงสร้างต่างๆ สำหรับ ANFIS ของระบบ กฟผ.

จำนวนโหนดอินพุต	Test error (RMSE)
4 3 2 2	0.7328
3 4 2 2	0.6546
4 4 2 2	0.5490
5 4 2 2	0.3771
4 5 2 2	0.4078
5 5 2 2	0.4887

จากตารางที่ 4 ในระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ กฟผ. โครงสร้าง ANFIS ที่มีจำนวนโหนดในชั้นที่ 1 แบบ 5 4 2 2 เป็นโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลในชุดทดสอบต่ำที่สุด เมื่อนำค่ากระแสฟอลต์ที่ได้จาก ANN และ ANFIS มาเปรียบเทียบกับค่าจริงของชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 8

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์กระแสฟอลต์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าโดยใช้ ANN เปรียบเทียบกับ ANFIS ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ใช้สำหรับวิเคราะห์กระแสฟอลต์ด้วยการนำระบบดังกล่าวมาทำนายค่ากระแสฟอลต์แบบไม่สมมาตรแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบไฟฟ้า และได้มีการเปรียบเทียบผลการทำนายที่ได้จากทั้งสองระบบ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้ ANN มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE น้อยกว่าการใช้ ANFIS และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของทั้งสองโครงข่ายที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุดจะพบว่า โครงสร้างของ ANN ที่เหมาะสมนำมาใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ควรประกอบด้วยชั้นซ่อนจำนวน 2 ชั้นซ่อน ในแต่ละชั้นซ่อนควรมีจำนวนโหนดอยู่ในช่วง 12-18 นิวรอน สำหรับโครงสร้างของ ANFIS ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนและขนาดของระบบกำลังไฟฟ้า โดยถ้าเป็นระบบขนาดใหญ่ ควรจะมีจำนวนโหนดของแต่ละชั้นมากกว่า 3 โหนด

เมื่อพิจารณาโครงสร้างและค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ที่น้อยที่สุดจะเห็นได้ว่า ANN จะมีขนาดโครงสร้างและมีความซับซ้อนของระบบโครงข่าย รวมทั้งใช้เวลาในการฝึกสอนมากกว่า ANFIS จึงสามารถให้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อน RMSE น้อยกว่า ดังนั้น ANN จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้วิเคราะห์กระแสฟอลต์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การทำนายกระแสฟอลต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม สามารถนำไปใช้ประเมินถึงความรุนแรงที่จะเกิดขึ้นในระบบกำลังไฟฟ้า เมื่อเกิดฟอลต์ในระบบได้ เพื่อการวางแผนรองรับ และป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบกำลังไฟฟ้า สำหรับการคำนวณกระแสฟอลต์ อาจทำให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้ด้วยการเพิ่มข้อมูลปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อกระแสฟอลต์ เช่น ค่ากำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่ค่าต่างๆ , การจัดรูปแบบข้อมูลตำแหน่งของจุดที่เกิดฟอลต์ ซึ่งเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hadi Saadat, Power System Analysis second edition, McGraw-Hill, Inc, New York, 2004.
- [2] S. Jiriwibhakorn, "Application of Neural Networks in Power Systems," Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 2011.
- [3] J. J. Mora, "Fault Location in Power Distribution Systems using ANFIS Nets and Current Patterns", IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2006.
- [4] M. Tarafdar, "Fault classification and location of power transmission lines using artificial neural network", International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore, Dec, 2007.
- [5] Jang. J.-S.R., "ANFIS : Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.23, pp.665-685, May/June 1993.
- [6] Stephen Marx. And Dean Bender, "An Introduction to Symmetrical Components, System Modeling and Fault Calculation", 30th Annual HAND-ON Relay School, Washington State University, March, 2013.
- [7] C. Jidrchu and S. Jirivipakorn, "Implementation of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference systems in Fault Current Analysis," Kasetsart Engineering Journal, Vol.26, No.84, pp.59-68, April-June, 2013.
- [8] J. W. Hi Hines, Fuzzy and Neural Approaches in Engineering MATLAB Supplement, John Wiley and Sons, New York, 1997.
- [9] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth Mark Beale, "Neural Network Design", Oklahoma State University, 1996.
- [10] [Online] <http://publish.illinois.edu/smartergrid/ieee-30-bus-system>, Information Trust Institute, University of Illinois.
- [11] [Online] <http://www.mathworks.com/help/fuzzy/anfis.html>

การศึกษากระบวนการสร้างและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเอ็น

มอสขนาด 0.5 ไมครอน

Study of Fabrication and Electrical Characteristics of NMOS

0.5 Micron

รังสรรค์ เมืองเหลือ* อนุชา เรืองพานิช**

* ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

** ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

E-mail : rangson.mu@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษากระบวนการสร้างและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดความยาวเกต 0.5 ไมครอน ที่เป็นโพลีซิลิคอนเกตชนิดเอ็น ได้แบ่งการศึกษออกเป็น 3 ขั้นตอน เริ่มตั้งแต่ การจำลองกระบวนการสร้างเอ็นมอสโดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD เพื่อคาดการณ์คุณลักษณะทางไฟฟ้า ด้วยการจำลองค่าปริมาณโดสการยิงฟุ้งประจุสำหรับบ่อแยกชนิดพี, การจำลองปริมาณโดสการยิงฟุ้งประจุสำหรับการปรับแรงดันขีดเริ่ม และการจำลองปริมาณโดสการยิงฟุ้งประจุสำหรับการป้องกันพันธะทรู ที่เงื่อนไขต่างๆ ที่มีผลต่อแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ขั้นตอนที่สอง นำผลจากการจำลองกระบวนการสร้างที่น่าสนใจมาเป็นเงื่อนไขที่ใช้สร้างลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอน หลังจากทำการสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ตามเงื่อนไขที่ออกแบบ ทำการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า ในเงื่อนไขที่บ่อแยกชนิดพี ค่าปริมาณโดส $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ค่าปริมาณโดสการยิงฟุ้งประจุสำหรับการปรับแรงดันขีดเริ่ม $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และค่าปริมาณโดสการยิงฟุ้งประจุสำหรับการป้องกันพันธะทรู $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ โดยเอ็นมอสทรานซิสเตอร์จากแผ่นเงื่อนไขดังกล่าวมีค่าแรงดันขีดเริ่ม 0.70 V ที่ค่ากระแสเดรนย่านอิ่มตัวที่ $V_{DS} = V_{GS} = 3.3 \text{ V}$ เท่ากับ $403 \text{ } \mu\text{A}/\mu\text{m}$ ขั้นตอนสุดท้าย นำแผ่นเงื่อนไขดังกล่าวไปทำการถอดแบบจำลองพารามิเตอร์ระดับ 3 สำหรับให้นักออกแบบวงจรรวมได้นำไปใช้ต่อไปซึ่งเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาด 0.5 ไมครอน ที่สร้างได้นั้นถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดเล็กที่สุดที่เคยสร้างในประเทศไทย

คำสำคัญ : มอสเฟส, ซิมอส, สไปซ์

Abstract

This paper presents a study of the fabrication process and electrical characteristics of 0.5 μm NMOS transistor, n-type Poly silicon gate. There are 3 steps for this study. The first step is fabrication simulation process to predict the electrical properties using Process simulation program, Sentaurus TCAD which is verification program consisting in several conditions of simulation. The goal of the fabrication

simulation process is to study the dose concentration of Ion Implantation for p-well and anti-punch through processes that affects the NMOS transistor threshold voltage. The 2nd step is to apply the interesting condition results from the fabrication simulation process for wafer substrate then proceed electrical properties testing of NMOS transistor according to the design conditions including p-well dose concentration $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ threshold voltage adjustment dose concentration $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ and anti-punch through dose concentration $3.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. As the result, the threshold voltage 0.70 V. with saturated drain current ($V_{DS} = V_{GS} = 3.3 \text{ V}$) $403 \mu\text{A}/\mu\text{m}$. Finally, these conditions will be applied for extracting the parameter model, spice level 3 which is a useful application for IC designers. The succeeded fabrication of the $0.5 \mu\text{m}$ NMOS transistor is the recent technology for the smallest NMOS available in Thailand.

Keywords : MOSFET, CMOS, SPICE

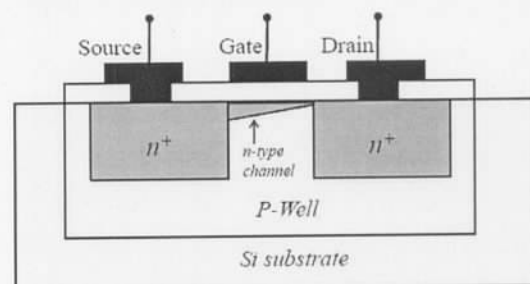
1. บทนำ

มอสเฟต (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) หรือที่เรียกว่า มอสทรานซิสเตอร์ (MOS transistor) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทสนามไฟฟ้าที่ถูกนำไปสร้างเป็นวงจรรวมขนาดใหญ่ (VLSI) เพราะว่ามีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น ขนาดเล็ก โครงสร้างไม่ซับซ้อนง่ายต่อการพัฒนา ใช้พลังงานต่ำแต่ประสิทธิภาพการใช้งานสูง และสามารถพัฒนาขนาดให้เล็กลง ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ขั้นตอนการสร้าง, ออกแบบขั้นตอนวิธีการสร้าง, นำเงื่อนไขและขั้นตอนวิธีการสร้างที่ออกแบบไปจำลอง เพื่อคาดการณ์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของมอสทรานซิสเตอร์ ต่อจากนั้นนำผลที่ได้จากการจำลองมาพิจารณาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโดยทำการสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์และโครงสร้างทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ขึ้นบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ขนาด 6 นิ้ว จากนั้นนำมาทำการวัดทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและถอดแบบจำลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นค่ามาตรฐานสำหรับนักออกแบบวงจรได้ใช้อ้างอิงต่อไป

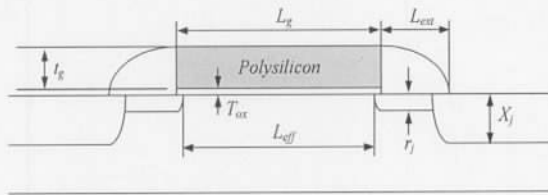
2. การออกแบบ และ กระบวนการสร้าง

2.1 การออกแบบกระบวนการสร้าง

ในการจำลองและออกแบบกระบวนการสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ที่ขนาดความยาวเกต $0.5 \mu\text{m}$ ไมครอน ด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD เพื่อศึกษาขั้นตอนกระบวนการสร้างและโครงสร้างทางจุลภาคของมอส ดังรูปที่ 1 โดยเฉพาะค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ขนาดความกว้างต่อความยาวเกต (W/L), ค่าปริมาณโดสเกิดจากการยิงฟลักซ์จากกระบวนการสร้างบ่อแยกชนิดพี (P-Well), ค่าปริมาณโดสจากการยิงฟลักซ์ประจุสำหรับปรับค่าแรงดันขีดเริ่ม (VTA), ค่าปริมาณโดสจากการยิงฟลักซ์ประจุเพื่อป้องกันการเกิดพันธะทุร (APT) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะถูกปรับเปลี่ยนเพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม



(ก) ภาควัดขวางโครงสร้างเอ็นมอส



(ข) ภาคตัดขวางโครงสร้างมอสแสดงขอบเขตทางกายภาพ

รูปที่ 1 ภาคตัดขวางโครงสร้างมอสในการจำลอง[1]

จากรูปที่ 1(ข) แสดงพารามิเตอร์ทางกายภาพของมอส [2]-[4] เช่น ความยาวเกต (Gate Length, L_g) ความหนาชั้นออกไซด์ (Gate oxide thickness, T_{ox}), ความลึกซอสและเดรน (S/D junction depth, X_j) สำหรับการออกแบบเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางกายภาพจะมีความสัมพันธ์แปรตามความยาวเกตของกฎการออกแบบมอสทรานซิสเตอร์ เช่น ความหนาออกไซด์ ($T_{ox} = 0.018L_g$), ความลึกของ LDD extension ($r_f = 0.3L_g$), ความลึกซอสและเดรน ($X_j = 0.6L_g$), Spacer width ($L_{ext} = 0.3L_g$) และความยาวสุทธิของเกต effect gate ($L_{eff} = 0.6L_g$) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางกายภาพของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ที่ขนาดความยาวเกต 0.5 ไมครอน ดังในตารางที่ 1 การจำลองกระบวนการสร้างได้กำหนดขนาดความยาวเกตมีค่าที่ 0.3, 0.4, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 3.0 และ 20 ไมครอน [5] ตามลำดับ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ทางกายภาพ

Device Structure Parameter	Value
Gate Length, L_g	0.5 μm
Gate oxide thickness, T_{ox}	10 nm
well junction depth	2.0 μm
N^+ Poly silicon thickness, t_g	300 nm
Spacer width	150 nm
LDD junction depth	150 nm
S/D junction depth, X_j	300 nm

ตารางที่ 2 เจือไนที่ปรับเปลี่ยนปริมาณโดส

แผ่นทดสอบ	P-WELL IMPLANT DOSE ที่พลังงานคงที่ 140 keV	VTA IMPLANT DOSE ที่พลังงานคงที่ 70 keV
D01	$6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	No implant
D02		$1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
D03		$1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
D04		$2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
D05	$8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$	No implant
D06		$1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
D07		$1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
D08		$2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
D09	$1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	No implant
D10		$1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
D11		$1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
D12		$2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

2.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์นี้ ถูกดำเนินการที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) [6]-[8] โดยการสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ลงบนฐานรองเริ่มต้นผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดพี ระบาย (100) สภาพความต้านทาน 20 Ohm-cm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเวเฟอร์ขนาด 6 นิ้ว เริ่มแรกจากการสร้างบ่อแยกชนิดพี (P-Well) ด้วยการยิงฝังประจุโบรอน ที่พลังงาน 140 keV ซึ่งในการจำลองได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณโดสที่ 6×10^{11} , 8×10^{11} , และ $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ สำหรับการยิงฝังประจุสำหรับการศึกษาการป้องกันพันธะทรู (APT) จะใช้โบรอนปริมาณโดสที่ 0 , 2×10^{12} และ $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ด้วยพลังงาน 90 keV และการยิงฝังประจุสำหรับการปรับแรงดันขีดเริ่ม (VTA) จะใช้โบรอน ซึ่งในการจำลองได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ โดสมีค่าตั้งแต่ 0 , 1.6×10^{12} , 1.7×10^{12} , 1.8×10^{12} , 1.9×10^{12} และ $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ด้วย

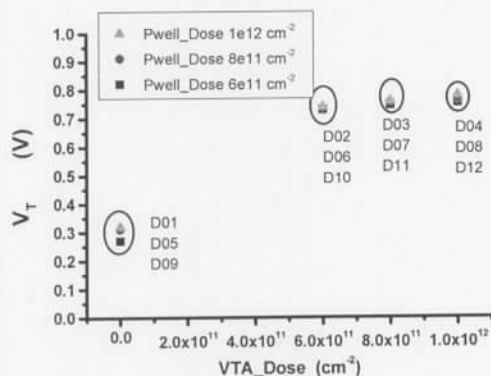
พลังงาน คงที่ 70 keV จากเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนปริมาณโดสในการสร้างจำนวน 12 เงื่อนไข ดังในตารางที่ 2

3. ผลการทดลอง

สำหรับการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเอ็นของมอสทรานซิสเตอร์ ใช้ชุดเครื่องมือวัดที่ประกอบด้วยเครื่อง Probe Station Cascade M 150, HP B1500A Precision Semiconductor Parameter Analyzer เป็นชุดเครื่องมือวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมอสทรานซิสเตอร์ โดยการควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์

โดยการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ ในย่านทำงานเชิงเส้น (Linear Region) ให้แรงดันคงที่ ที่ขั้วเกต (V_{DS}) 0.1 V ให้แรงดันขั้วเกต โดยการปรับเปลี่ยนค่าตั้งแต่ 0 ถึง 3.3 V ($V_{GS} = 0 \rightarrow 3.3$ V, 1 V/Step) และข้อสอบและฐานรองต่อกับกราวด์

ในการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มที่ปริมาณโดสต่างๆ (P-Well และ VTA) ที่เอ็นมอสขนาดความกว้างขั้วเกต $W/L = 20/20$ ไมครอน แสดงดัง รูปที่ 2 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับปริมาณโดสยึ่งประจุสำหรับปรับแรงดันขีดเริ่ม (VTA) และปริมาณโดสการยึ่งประจุบ่อแยกชนิดพี (P-Well) ที่ค่าต่างๆ



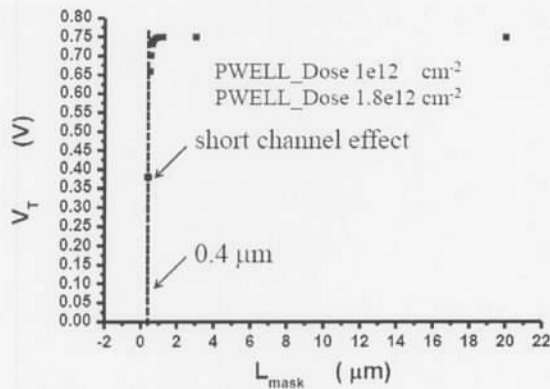
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับปริมาณโดสยึ่งประจุ VTA ที่อัตราส่วนของ $W/L = 20/20$

จากรูปที่ 2 แบ่งออกได้ 2 กรณี ในกรณีแรก ไม่มีการยึ่งประจุสำหรับการปรับค่าแรงดันขีดเริ่ม (VTA) เป็นการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มกับการปรับเปลี่ยนปริมาณโดสของบ่อแยกชนิดพี (P-Well) ที่แผ่น D01, D05, D09 พบว่าการเพิ่มปริมาณโดสของบ่อแยกชนิดพี (P-Well) ทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีความหนาแน่นของพาหะโฮล (hole) เพิ่มขึ้น

ในกรณีที่สอง มีการยึ่งประจุเพื่อปรับค่าแรงดันขีดเริ่ม (VTA) การวัดค่าของแรงดันขีดเริ่มที่มีการปรับเปลี่ยนค่าปริมาณโดส VTA แผ่นที่ D02, D06, D10, D03, D07, D11, D04, D08 และ D12 มีค่าปริมาณโดส VTA มากขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าของ VTA ทำให้ความหนาแน่นของพาหะโฮล (hole) ในช่องทางเดินมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตเพิ่มขึ้นในการทำให้เกิดเป็นชั้นกลับ (inversion layer)

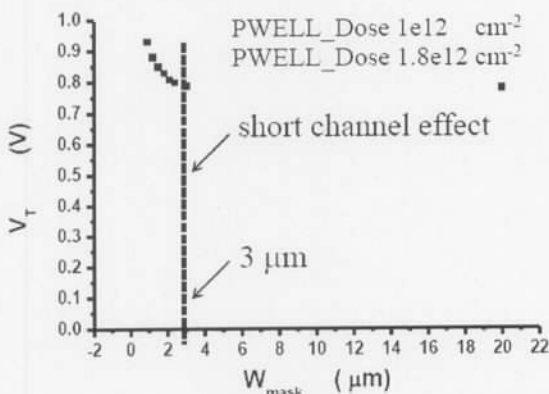
จากทั้ง 2 กรณี ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณโดสของ P-Well และ ปริมาณโดสของ VTA พบว่าปริมาณโดสของการยึ่งประจุมีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณโดส P-Well มีผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับปริมาณโดสของ VTA

จากการศึกษาผลการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มกับปริมาณโดส ได้เลือกแผ่น D10 ที่ปริมาณโดส P-Well $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และ ปริมาณโดส VTA $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ มาเป็นกรณีศึกษาหาค่าของแบบจำลองพารามิเตอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความยาวเกต (L_{mark}) ดังรูปที่ 3 ได้ค่าแรงดันขีดเริ่มประมาณ 0.75 V ที่อัตราส่วนของ $W/L = 20/20$ และที่ขนาดความยาวเกตน้อยกว่าหรือเท่า 0.4 ไมครอน ซึ่งเป็นค่าความยาววิกฤตที่ทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดปรากฏการณ์แชนแนลสั้น (short channel effect)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับความยาวเกต (L_{mask})

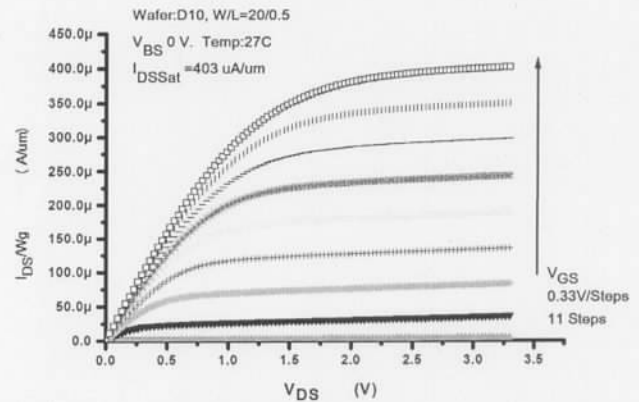
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มกับความยาวช่องทางเดินกระแสของแผ่นที่ทำการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความกว้าง (W_{mask}) ของช่องทางเดินกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 ไมครอน กล่าวได้ว่าในกระบวนการสร้างของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ 0.5 ไมครอน เกิดปรากฏการณ์ของแซนแนลแคป (narrow channel) ที่ความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 ไมครอน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่ม (V_T) กับความกว้างของเกต (W_{mask})

ในส่วนของการทดสอบคุณลักษณะความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ระหว่างกระแสเดรน (I_D) กับแรงดันเดรน (V_{DS}) โดยการให้แรงดันที่ขั้วเกตตั้งแต่ 0 ถึง 3.3 V, (V_{GS} = 0 → 3.3 V, 0.33 V/step) และให้แรงดันที่ขั้วเกตตั้งแต่ 0 ถึง 3.3 V (V_{GS} = 0 → 3.3 V, 0.33 V/step) และขั้วซอร์สและฐานรอง

ต่อกับกราวด์ ผลดังรูปที่ 5 พบว่าได้ค่าอัตราส่วนของกระแสเดรนต่อความยาวเกต อิมิตสูงสุด ที่ V_{GS} = V_{DS} = 3.3 V ประมาณ 403 $\mu\text{A}/\mu\text{m}$



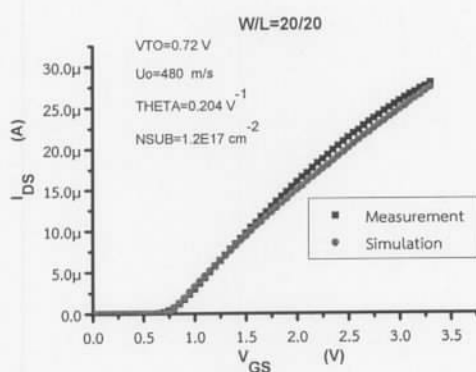
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_D) กับแรงดันเดรน (V_{DS}) ของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ที่ค่าแรงดันเกตค่าต่าง

ตารางที่ 3 ค่าแบบจำลองพารามิเตอร์ SPICE ระดับ 3

พารามิเตอร์	NMOS	หน่วย
TPG	1	-
TOX	11.8	nm
LD	0.058	μm
WD	0.325	μm
UO	480.82	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
VTO	0.72	V
THETA	0.204	V^{-1}
RS	25.82	Ohm (Ω)
RD	25.82	Ohm (Ω)
DELTA	1.57	-
NSUB	9.47×10^{16}	cm^{-3}
XJ	0.35	μm
NFS	2.37×10^{11}	cm^{-2}
VMAX	2.5×10^2	m/s
KAPPA	0.16	V^{-1}
ETA	6.84×10^{-9}	-

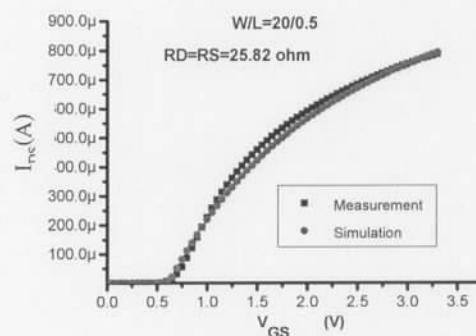
สุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างผลจากการหาแบบจำลองพารามิเตอร์กับผลจากการวัดทดสอบเอ็นมอส เพื่อศึกษาถึงความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพารามิเตอร์ SPICE ระดับ 3 ดังตารางที่ 3 ซึ่งการหาแบบจำลองพารามิเตอร์ทำได้โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ใส่ในโปรแกรม T-SPICE โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้า จะทำการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตของเอ็นมอสขนาด $W = 20$ ไมครอน, $L = 20$ ไมครอน เพื่อดูผลของพารามิเตอร์ **NSUB** **THETA** **VTO** และ **UO** ที่มีต่อเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ได้จากผลการจำลองพารามิเตอร์และผลจากการวัดของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่ ($W/L = 20/20$) พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลดังรูปที่ 6



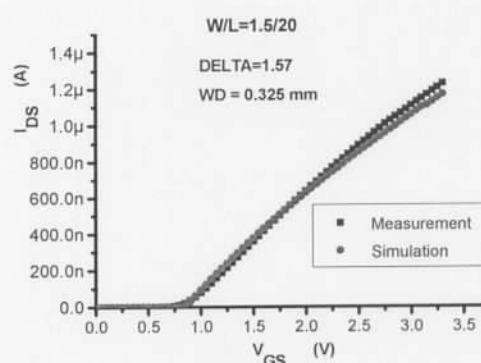
รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ได้จาก ผลการจำลองพารามิเตอร์กับผลจากการวัดของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดใหญ่

2. ผลของพารามิเตอร์ **RD** และ **RS** เอ็นมอสขนาด $W = 20$ ไมครอน $L = 0.5$ ไมครอน ผลของการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ได้จากผลการจำลองพารามิเตอร์และผลจากการวัดของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก ($W/L = 20/0.5$) พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 4.7 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ได้จากผลการจำลองพารามิเตอร์กับผลจากการวัดของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก

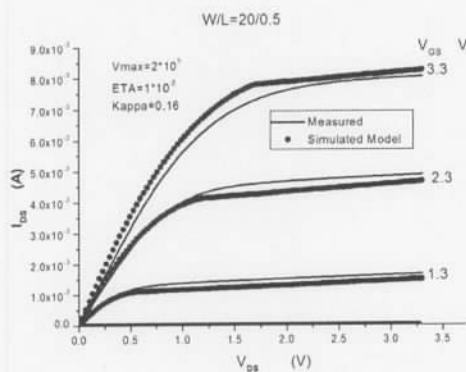
3. ผลของพารามิเตอร์ **WD** และ **DELTA** ที่มีต่อเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ที่มีช่องทางเดินกระแสแคบ ทดสอบโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตของเอ็นมอสขนาด $W = 1.5$ ไมครอน, $L = 20$ ไมครอน ซึ่งได้ผลการเปรียบเทียบได้ผลดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกตที่ได้จากผลการจำลองพารามิเตอร์กับผลจากการวัดของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก

จากผลในรูปที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกตที่ได้จากผลการจำลองพารามิเตอร์และผลจากการวัดของเอ็นมอสแซนแนลแคบ ($W/L = 1.5/20$) พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

4. การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแส
 เทรนกับแรงดันเกรนที่มีผลของการไบอัสฐานรองของเอ็น
 มอสขนาด $W = 20$ ไมครอน, $L = 0.5$ ไมครอน โดยให้
 $V_{DS} = 0 \rightarrow 3.3$ V ที่ $V_{GS} = 0, 1.3, 2.3, 3.3$ V ซึ่งผลการ
 เปรียบเทียบแสดงผลในรูปที่ 9 การเปรียบเทียบ
 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเกรนและแรงดันเกรนที่
 แรงดันเกตค่าต่างๆ ที่ได้จากการจำลองพารามิเตอร์และ
 ผลจากการวัดของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก พบว่า
 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้
 เนื่องจากตัวแบบจำลองของ SPICE ระดับ 3 เองที่ยัง
 ไม่ให้ความเที่ยงตรงในช่วงเชิงเส้น และ อิมิต์ ทำได้นัก



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเกรน
 กับแรงดันเกรนที่แรงดันเกตค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการ
 จำลองพารามิเตอร์และผลจากการวัดของเอ็น
 มอสทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก

4. สรุปและวิจารณ์

การสร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ด้วยเทคโนโลยี
 0.5 ไมครอน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ประเทศไทยสร้างได้เล็ก
 ที่สุด ในงานวิจัยนี้ เริ่มต้นจาก การจำลองกระบวนการ
 สร้าง, การออกแบบกระบวนการสร้าง, การสร้างเอ็น
 มอสทรานซิสเตอร์, วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการถอด
 แบบจำลองพารามิเตอร์ SPICE ระดับ 3

ในการจำลองกระบวนการสร้างได้ใช้โปรแกรม
 Sentaurus TCAD เพื่อกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T)

ในช่วงประมาณ 0.7-0.75 V สำหรับขั้นตอนกระบวนการ
 สร้างเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ได้ใช้แผ่นฐานรองเริ่มต้นผลึก
 เดียวซิลิคอนชนิดพี ที่สภาพความต้านทาน 20-25 Ω -cm
 โดยเริ่มจากการสร้างบ่อแยกชนิดพี (P-WELL) ด้วยวิธีการ
 ยิงสัประจุโบรอน ที่ปริมาณโดส 6×10^{11} , 8×10^{11} , 1×10^{12}
 cm^{-2} สำหรับการป้องกันพันธะทรู (APT) ที่ปริมาณโดส 0,
 2×10^{12} , $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และสุดท้ายเป็นการยิงสัประจุ
 สำหรับการปรับแรงดันขีดเริ่ม ที่ปริมาณโดส 0, 1.6×10^{12} ,
 1.7×10^{12} , 1.8×10^{12} , 1.9×10^{12} , $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และได้
 กำหนดค่าความหนาชั้นเกตออกไซด์ 10 นาโนเมตร จาก
 การจำลองเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาทั้งหมด พบว่าเงื่อนไข บ่อ
 แยกชนิดพีที่ปริมาณโดส $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ปริมาณโดสการยิง
 สัประจุสำหรับการปรับแรงดันขีดเริ่ม (VTA) ที่ปริมาณ
 โดส $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และปริมาณโดสการยิงสัประจุของ
 กระบวนการป้องกันพันธะทรู (APT) ที่ปริมาณโดส
 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ได้ผลค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็น
 มอสทรานซิสเตอร์ 0.70 V โดยเอ็นมอสทรานซิสเตอร์มี
 กระแสเกรนอิมิต์ 403 $\mu\text{A}/\mu\text{m}$ ที่ $V_{DS}=V_{GS}=3.3$ V
 และ สุดท้าย การถอดแบบจำลองพารามิเตอร์ SPICE
 ระดับ 3 ที่สามารถคำนวณด้วยมือ พบว่ามีค่าความ
 คลาดเคลื่อนประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ในอนาคต
 แบบจำลองนั้นต้องใช้เป็นแบบจำลองของ BSIM3 ซึ่ง
 ตอบสนองความแม่นยำและความถูกต้องมากกว่า

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Ruangphanit and R. Muanghlua, "Simulated Studied of 0.5 Micron NMOS n-Type Poly silicon gate length" The 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology, pp. 217-220, May, 2016.
- [2] SIA, The National Technology Roadmap For Semiconductor. San Jose, CA, 1994.
- [3] S. T. Ma, J. R. Brews, "Comparison of Deep-Submicrometer Conventional and Retrograde n-MOSFET's," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 47, No.8, August, 2000, pp. 1573-1579, Aug, 2000.

- [4] I. De and C. M. Osburn, "Impact of Super-Steep-Regrograde Channel Doping Profiles on the Performance of Scaled Devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 46, No. 8, pp. 1711-1717, August, 1999.
- [5] N. Phongphanchanthra, A. Ruangphanit, N. Klunngien, W. Yamwong, S. Niemcharoen and S. Khunkhao, "Twin-Well 0.8 micron CMOS Technology Design and Simulatin Process for Fabrication," *Proceeding of Smart/Intelligent Materials and Nano Technology*, pp. 288, April, 2008.
- [6] P. Meesapawong, A. Ruangphanit, N. Phongphanchanthra and A. Poyai, "Devices Design, Fabrication and Characterizations of Submicron MOSFET for 0.8 CMOS Technology Development," *Laos Journal on Applied Science*. Vol. 1, No. 1, pp. 488-491, 2006.
- [7] N. Phongphanchanthra, A. Ruangphanit, N. Klunngien, W. Yamwong and S. Niemcahroen. "Development of 0.8 Micron CMOS Technology Process for Fabrication," *Proceeding of the 2nd international Conference on Functional Materials & Devices*, pp. A154, June, 2008.
- [8] A. Ruangphanit, N. Phongphanchanthra, P. Meesapawong, C. Hruanan, S. Niemcharoen and R. Muanghlua, "Device Design, Fabrication and Characterizations of 0.8 μm CMOS Technology," *Proceeding of the International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 137-140, May, 2007.

การวิเคราะห์ความเค้นของแม่แรงรยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วย วิธีพลศาสตร์มัลติบอดีและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Passenger Car Jack Stress Analysis Using Multi-Body Dynamics and Finite Element Methods

อนุชิต มงคล มนต์ศักดิ์ พิมสาร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

แม่แรงรยนต์นั่งส่วนบุคคลมี 2 ประเภทหลักๆด้วยกันคือ แม่แรงแบบไฮดรอลิกและแม่แรงแบบแพนโทกราฟ (pantograph jack) ซึ่งแบบหลังนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีน้ำหนักเบาและมีขนาดกะทัดรัด งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความเค้นภายในชิ้นส่วนของแม่แรงแบบแพนโทกราฟ ในเบื้องต้นของงานวิจัยทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแบบจำลอง 3 มิติของแม่แรงโดยชิ้นส่วนต่างๆของแม่แรงจะถือว่าเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) รับน้ำหนักที่ค่าต่างๆ ด้วยกรรมวิธีพลศาสตร์มัลติบอดี (multi-body dynamics method) เพื่อหาแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ข้อต่อ (joint) ที่ความสูงการยกค่าตั้งแต่ 183-320 มิลลิเมตร จากนั้นนำแรงปฏิกิริยาที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ความเค้นในแต่ละชิ้นส่วนของแม่แรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ผลของความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดลอง จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีพบว่าให้ผลลัพธ์ของความเค้นที่สอดคล้องและเป็นไปในทางเดียวกัน โดยค่าความเค้นมากที่สุดที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดขึ้นที่ Arm Upper (Right) มีค่าตัวประกอบความปลอดภัย 1.24- 3.73 ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์แม่แรงในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำไปใช้ออกแบบและพัฒนาแม่แรงรยนต์นั่งส่วนบุคคลให้มีขนาดที่เหมาะสม

คำสำคัญ : แม่แรงรยนต์นั่งส่วนบุคคล วิธีพลศาสตร์มัลติบอดี ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Passenger car jacks consist of two main types, hydraulic and pantograph. The latter is the most widely used because it is lightweight and compact. This research presents stress analysis of pantograph jack. In this research, at first, dynamic of a passenger car jack, treated as rigid body system with connecting joints, was numerically analyzed to evaluate the reaction forces at the joints. The jack strokes were varied from 183 to 320 mm. Later, the calculated reaction forces were employed in the finite element model to investigate the stress distribution in each body. The stress results obtained from finite element method were compared with experimental result. It was found that the stress results from both methods are consistent and have the same trend. The maximum stress, predicted using finite element method, is

found in the Arm Upper (Right) with safety factor 1.24 - 3.73. Therefore, this research can be used as a guideline to design and develop a passenger car jack having optimum size.

Keywords : passenger car jack, multi-body dynamic method, finite element method

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมรถยนต์มีการขยายตัวและเติบโตเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะประเทศไทยมีการผลิตรถยนต์ในประเทศออกมามีหลายแสนคัน แม่แรงรถยนต์เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความสำคัญและจำเป็นต้องมีไว้สำหรับรถยนต์ทุกคันเพื่อใช้ในการฉีกเหล็กหรือใช้ในการซ่อมบำรุงรักษารถยนต์ การศึกษาการออกแบบแม่แรงรถยนต์ [1] และการวิเคราะห์แม่แรงจึงมีความสำคัญทำให้สามารถพัฒนาการออกแบบแม่แรง [2-5] ให้มีขนาดที่เหมาะสมได้

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคล โดยแม่แรงที่นำมาทำการวิเคราะห์นี้เป็นแม่แรงที่มีการผลิตใช้งานจริงกับรถยนต์ยี่ห้อหนึ่งที่ใช้ในประเทศไทยซึ่งผู้วิจัยได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลของแม่แรงดังกล่าวจากผู้ผลิตคือ บริษัท ไทยซัมมิท โอโตพาร์ท อินดัสตรี จำกัด ซึ่งเป็นการศึกษาความเค้นและพฤติกรรมของแม่แรงแบบกลไก โดยจะเป็นการวิเคราะห์การทำงานของแม่แรง แรงที่มากระทำกับชิ้นส่วนต่างๆของแม่แรง [6] และทำการวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นที่ข้อต่อต่างๆของแม่แรงในขณะที่แม่แรงทำงานในรูปแบบของแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยวิธีพลศาสตร์มัลติบอดี [7] จากนั้นจะนำแรงที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [8] เพื่อหาความเค้นที่เกิดขึ้นที่แขนของแม่แรงและนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบที่ได้ค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสามารถที่จะนำกระบวนการวิเคราะห์หาความเค้นของแม่แรงดังกล่าวมาเป็นแนวทางเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบแม่แรงให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ลดเวลาในการออกแบบและสามารถออกแบบให้ลดการใช้วัสดุเพื่อลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

2. สมการที่เกี่ยวข้อง

สมการพื้นฐานของข้อต่อในแบบต่างๆและสมการการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์มัลติบอดี เพื่อหาค่าของแรงกระทำที่ข้อต่อ สามารถแสดงได้ดังนี้ [7]

2.1 สมการข้อต่อแบบหมุน (Revolute joint)

เมื่อมีวัตถุ 2 ชิ้นมาเชื่อมต่อกันโดยใช้ข้อต่อแบบหมุน ความสัมพันธ์ของวัตถุ 2 ชิ้น แสดงได้ดังรูปที่ 1 คือวัตถุ i และ j เชื่อมต่อกันแบบหมุน ที่จุด P ดังนั้นสมการแสดงความสัมพันธ์ของข้อต่อแบบหมุน คือ

$$\vec{h}^i \times \vec{h}^j = \vec{0} \quad (1)$$

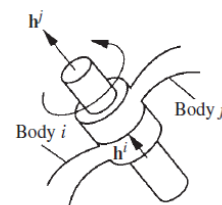
$$\vec{h}^i \times \vec{s}^{ij} = \vec{0} \quad (2)$$

$$\vec{s}^{ijT} \times \vec{s}^{ij} = \vec{0} \quad (3)$$

$\vec{h}^i$ คือ เวกเตอร์ที่เขียนบนชิ้นส่วน i ตามแนวแกนหมุน

$\vec{h}^j$ คือ เวกเตอร์ที่เขียนบนชิ้นส่วน j ตามแนวแกนหมุน

$\vec{s}^{ij}$ คือ เวกเตอร์ลากเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วน i และ j



รูปที่ 1 แสดงข้อต่อแบบหมุน

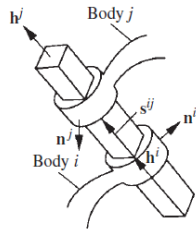
2.2 สมการข้อต่อแบบเลื่อน (Translation Joint)

เมื่อวัตถุ 2 ชิ้นมาต่อกันและความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนเป็นแบบการเคลื่อนที่ในแนวแกน แสดงได้ดังรูปที่ 2 ดังนั้นสมการแสดงความสัมพันธ์ของข้อต่อแบบเลื่อน คือ

$$\vec{h}^i \times \vec{h}^j = \vec{0} \quad (4)$$

$$\vec{h}^i \times \vec{s}^{ij} = \vec{0} \quad (5)$$

$$\vec{n}^{iT} \cdot \vec{n}^j = 0 \quad (6)$$



รูปที่ 2 แสดงข้อต่อแบบเลื่อน

เมื่อ $\vec{h}^i$ และ $\vec{h}^j$ คือ เวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน i และ j ตามลำดับ

2.3 สมการข้อต่อแบบสกรู (Screw Joint)

เมื่อวัตถุ 2 ชิ้นมาต่อกันและความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนเป็นการเคลื่อนที่แบบสกรู แสดงได้ดังรูปที่ 3 สมการแสดงความสัมพันธ์ของข้อต่อแบบสกรูคือ

$$\vec{h}^i \times \vec{h}^j = \vec{0} \quad (7)$$

$$\vec{h}^i \times \vec{s}^{ij} = \vec{0} \quad (8)$$

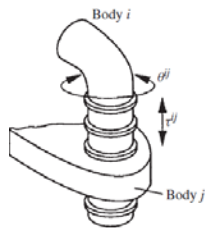
$$\vec{\tau}^{ij} \times \alpha \vec{\theta}^{ij} = c_1 \quad (9)$$

เมื่อ $\vec{\tau}^{ij}$ คือ ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่

$\vec{\theta}^{ij}$ คือ การหมุนสัมพัทธ์ของชิ้นส่วน i และ j

α คือ ระยะพิทช์

c_1 คือ ค่าคงที่



รูปที่ 3 แสดงข้อต่อแบบสกรู

2.4 สมการความสัมพันธ์แบบสัมผัส

เมื่อวัตถุ i และ วัตถุ j มีผิวสัมผัสกันที่จุดใดๆ (สมมติให้เป็นจุด P) สมการแสดงความสัมพันธ์แบบสัมผัสของวัตถุทั้ง 2 ชิ้น คือ

$$\vec{r}_p^i = \vec{r}_p^j \quad (10)$$

$$\vec{n}^i = c_2 \vec{n}^j \quad (11)$$

เมื่อ $\vec{r}_p^i$ และ $\vec{r}_p^j$ คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งจุด P ของวัตถุ i และ j ตามลำดับ

$\vec{n}^i$ และ $\vec{n}^j$ คือ เวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัสของวัตถุ i และ j ตามลำดับ

c_2 คือ ค่าคงที่

2.5 สมการการเคลื่อนที่

ในระบบมัลติบอดี ชิ้นส่วนในระบบจะสมมติให้เป็นวัตถุเกร็ง (rigid body) และถูกเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อพิกัดสมบูรณ์ (absolute coordinate) ของแต่ละชิ้นส่วนสามารถอธิบายด้วยพารามิเตอร์อย่างน้อยที่สุด 6 ตัว จากนั้นจะนำมาพิสูจน์หาสมการการเคลื่อนที่ของแต่ละชิ้นส่วน รวมกับสมการการเชื่อมต่อ (constraint equations) ซึ่งเมื่อเขียนรวมกันจะได้สมการการเคลื่อนที่ของทั้งระบบมัลติบอดีดังนี้

$$\begin{bmatrix} M & C_q^T \\ C_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_e \\ Q_d \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Q_d = C_q \ddot{q} \quad (13)$$

M คือ เมตริกมวลของระบบ

C_q คือ เมตริกจาโคเบียน

$\ddot{q}$ คือ เมตริกความเร่งของระบบ

λ คือ เมตริกแรงคูณ

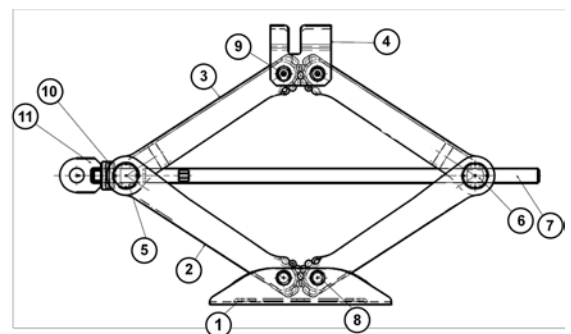
Q_e คือ เมตริกแรงภายนอก

จากนั้นทำการหาคำตอบเมตริกแรงคูณข้างบนรวมกับการใช้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ก็จะได้ค่าของแรงปฏิกิริยาที่ข้อต่อ

3. การดำเนินการวิจัย

3.1 ส่วนประกอบของแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

แม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่างๆหลายชิ้นที่ประกอบเข้าด้วยกันและสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ซึ่งแบบจำลองแม่แรงที่นำมาทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วยชิ้นส่วน ดังรูปที่ 4

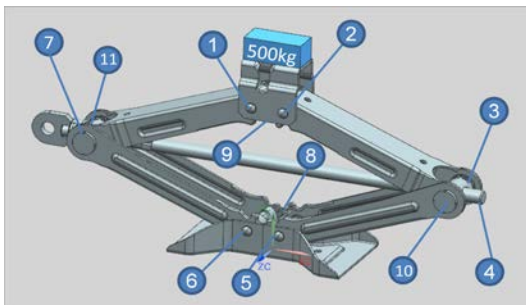


หมายเลข	ชื่อ	จำนวน
1	Seat	1
2	Arm Lower	2
3	Arm Upper	2
4	Top Holder Body	1
5	Metal Screw	1
6	Nut Screw	1
7	Screw	1
8	Livet L	2
9	Livet S	2
10	Bearing Set	1
11	Joint	1

รูปที่ 4 แสดงส่วนประกอบของแม่แรง

3.2 แบบจำลอง 3 มิติ แม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

ในการวิจัยได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมเขียนแบบ 3 มิติ ให้มีขนาดและรูปร่างเหมือนแม่แรงจริง เพื่อจะนำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์แบบวิธีพลศาสตร์มัลติบอดี้ และโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนแม่แรง

3.3 การหาแรงที่ข้อต่อของแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยวิธีพลศาสตร์มัลติบอดี้

การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์มัลติบอดี้จะทำการนำแบบจำลอง 3 มิติ เข้ามาวิเคราะห์ในโปรแกรมการวิเคราะห์พลศาสตร์มัลติบอดี้ จะวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ ของแม่แรงและหาแรงที่เกิดขึ้นที่ข้อต่อของแม่แรงและจะต้องทำการกำหนดความสัมพันธ์ของข้อต่อระหว่างชิ้นส่วนให้ครบทุกชิ้นเพื่อให้แม่แรงสามารถเคลื่อนที่ได้เสมือนจริง ความสัมพันธ์ระหว่าง

ชิ้นส่วนที่ใส่เข้าไปที่ข้อต่อของชิ้นส่วนในแบบจำลองนี้คือ แบบหมุน (revolution joint) แบบเลื่อน (translation joint) และแบบสกรู (screw joint) ซึ่งความสัมพันธ์สามารถระบุตำแหน่งแสดงได้ดังรูปที่ 5

1) ความสัมพันธ์แบบหมุน หมายเลข 1 2 5 6 7 10 และ 11

2) ความสัมพันธ์แบบเลื่อน หมายเลข 4

3) ความสัมพันธ์แบบสกรู หมายเลข 3

4) ความสัมพันธ์แบบสัมผัส หมายเลข 8 และ 9

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแม่แรงจะกำหนดให้สกรูหมุนด้วยความเร็ว 180 องศา/วินาที และรับน้ำหนัก 500 กิโลกรัม เมื่อสกรูที่ใช้มีระยะพิทช์ (α) 2 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสกรู 0.16 [3, 9]

3.4 การวิเคราะห์แขนแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้วิจัยได้นำแขนของแม่แรง ในแบบจำลอง 3 มิติ เข้ามาวิเคราะห์ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงได้ดังรูปที่ 6 เพื่อหาความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละแขนของแม่แรงโดยนำแรงที่หาได้จากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์พลศาสตร์มัลติบอดี้ตามข้อ 3.3 เป็นแรงที่กระทำที่ข้อต่อแขนของแม่แรง

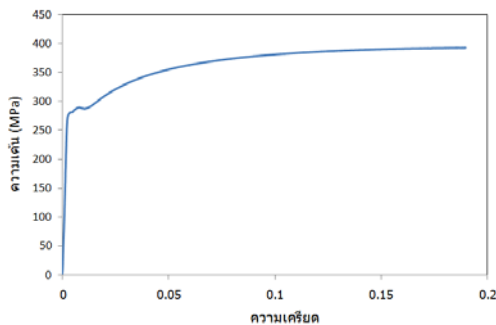


รูปที่ 6 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ Arm Lower(Right)

ผู้วิจัยได้ทำการตัดชิ้นส่วนตัวอย่างของแม่แรงนำไปทำการทดสอบแรงดึง (tensile test) เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ SAPH370 ได้ค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ค่าความต้านแรงดึงคราก (yield strength) และค่าความต้านแรงดึง (tensile strength) จากผลการทดสอบได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ ความเค้น - ความเครียด ของวัสดุ แสดงได้ดังรูปที่ 7 และคุณสมบัติของวัสดุแสดงได้ดังตารางที่ 1

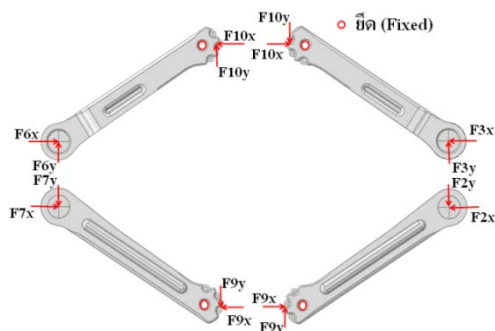
ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุ SAPH370

Tensile Strength (MPa)	394
Yield Strength (MPa)	280
Modulus of Elasticity (GPa)	157
Poisson's ratio (ν)	0.3



รูปที่ 7 ผลทดสอบแรงดึงวัสดุ

ในการวิเคราะห์แขนของแม่แรงด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการวิเคราะห์แยกกันในแต่ละแขนของแม่แรง เริ่มจากกำหนดคุณสมบัติให้กับวัสดุและกำหนดสภาวะขอบ (boundary condition) สร้างเอลิเมนต์และทำการวิเคราะห์ ในการกำหนดสภาวะขอบจะกำหนดให้มีการยึดที่รูแกนทั้งสองด้านของแขนแม่แรง และอีกด้านจะใส่แรงในแนวแกน x และแนวแกน y ที่จุดกึ่งกลางของตัวเชื่อมแขนแม่แรงและจุดสัมผัสระหว่างแม่แรง แสดงได้ดังรูปที่ 8

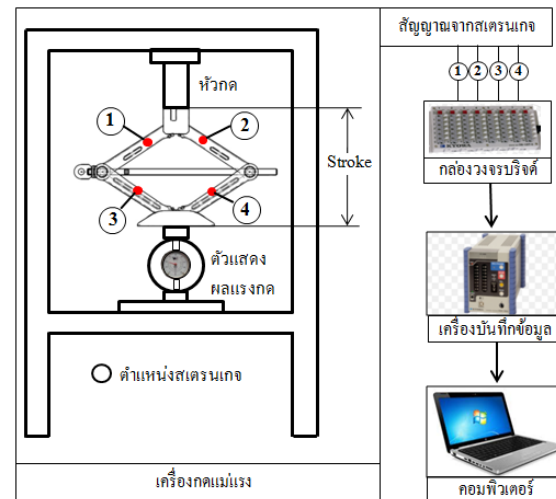


รูปที่ 8 กำหนดสภาวะขอบและแรงกระทำ

3.5 การทดสอบการรับน้ำหนักของแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลให้รับน้ำหนัก 500 กิโลกรัม ที่ความสูงการยกของแม่แรง (stroke) 183 230 270 และ 320 มิลลิเมตร เริ่มจากปรับระดับความสูงของแม่แรงจากนั้นใช้เครื่องกด

(compressing machine) ทำการกดน้ำหนัก ซึ่งหัวกดจะเคลื่อนที่ลงมาที่ส่วนรับน้ำหนักของแม่แรงโดยมีตัวแสดงผลแรงกดและวัดค่าความเครียดจากเซนตรอนเกจที่แขนของแม่แรงทั้งหมด 4 จุด สายสัญญาณของเซนตรอนเกจจะต่อเข้ากับกล่องวงจรบริจด์ เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) และบันทึกค่าลงในคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงผลแผนผังเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 9

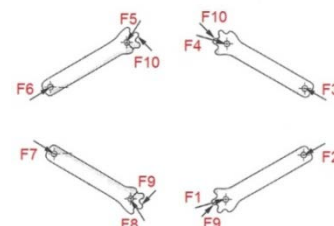


รูปที่ 9 แผนผังเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์แรงที่ข้อต่อของแม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยวิธีพลศาสตร์มัลติบอดี้

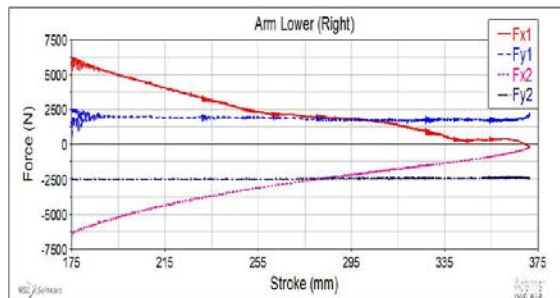
รูปที่ 10 ผังโครงร่างอิสระแรงที่กระทำในแต่ละแขนของแม่แรง



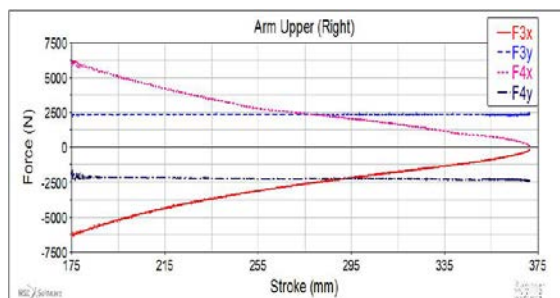
รูปที่ 10 ผังโครงร่างอิสระแรงกระทำที่แขนของแม่แรง

รูปที่ 11 แสดงแรงที่กระทำกับข้อต่อของ Arm Lower (Right) ในกราฟจะแสดงแรง $F1x$ $F1y$ $F2x$ และ $F2y$ รูปที่ 12 แสดงแรงที่กระทำกับข้อต่อของ Arm Upper (Right) ในกราฟจะแสดงแรง $F3x$ $F3y$ $F4x$ และ $F4y$ รูปที่ 13 แสดงแรงที่กระทำกับข้อต่อของ Arm Upper(Left)ในกราฟจะแสดงแรง $F5x$ $F5y$ $F6x$ และ $F6y$

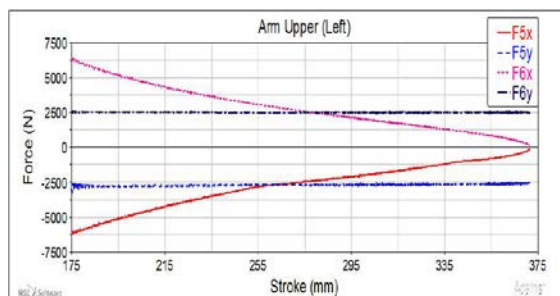
รูปที่ 14 แสดงแรงที่กระทำกับข้อต่อของ Arm Lower (Left) ในกราฟจะแสดงแรง F7x F7y F8x และ F8y



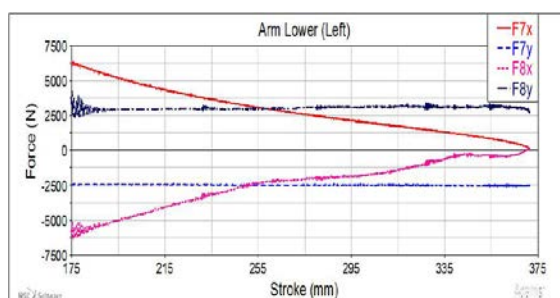
รูปที่ 11 แรงที่กระทำกับข้อต่อของ Arm Lower (Right)



รูปที่ 12 แรงที่กระทำกับข้อต่อของ Arm Upper (Right)



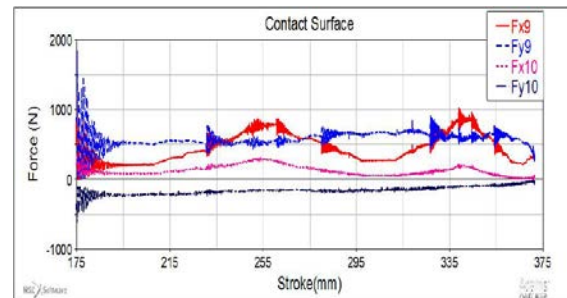
รูปที่ 13 แรงที่กระทำกับข้อต่อของ Arm Upper (Left)



รูปที่ 14 แรงที่กระทำกับข้อต่อของ Arm Lower (Left)

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 11-14 จะเห็นได้ว่าเมื่อความสูงการยกของแม่แรงเพิ่มขึ้นขนาดของแรงที่กระทำกับข้อต่อในแนวแกน x มีแนวโน้มลดลงและแรงกระทำกับข้อต่อในแนวแกน y มีแนวโน้มคงที่โดยแนวโน้มจะ

เหมือนกันทั้ง 4 รูป ซึ่งตำแหน่งของแรง F1- F8 ในแต่ละกราฟจะสอดคล้องกับไดอะแกรมของแรงตามรูปที่ 11



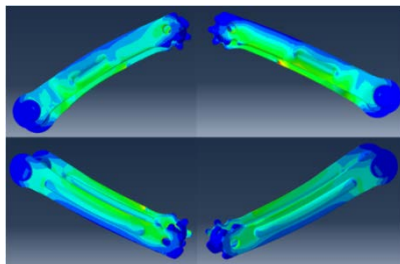
รูปที่ 15 แสดงแรงที่กระทำที่ผิวสัมผัสหมายเลข 8 และ 9

จากรูปที่ 15 เป็นการแสดงแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง Arm Upper (Left) กับ Arm Upper (Right) แสดงโดย F10x และ F10y และ Arm Lower (Left) กับ Arm Lower (Right) แสดงโดย F9x และ F9y โดยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสมีแนวโน้มไม่แน่นอนทั้งในแนวแกน x และ y ของทั้ง 2 คู่ผิวสัมผัสและตำแหน่งของผิวสัมผัสจะเปลี่ยนแปลงไปตามความสูงการยกของแม่แรงซึ่งจากรูปที่ 10 แรง F9 และ F10 ที่แสดงเป็นทิศทางและตำแหน่งของแรงที่เกิดขึ้นที่ระดับความสูงการยก 183 และ 230 มิลลิเมตร

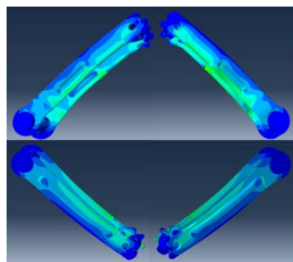
4.2 ผลการวิเคราะห์ความเค้นแกนแม่ของแรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเมื่อความสูงการยกของแม่แรงเพิ่มขึ้นความเค้นที่เกิดขึ้นที่แกนของแม่แรงจะมีค่าลดลงและเป็นไปในแนวทางเดียวกันทั้ง 4 แกนของแม่แรงรูปที่ 16-19 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นที่แกนของแม่แรงที่ความสูงการยกของแม่แรง 183 230 270 และ 320 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ใช้แถบสีเดียวกันจากรูปที่ 19) และจะพบว่าที่ระดับความสูง 183 มิลลิเมตร จะเกิดความเค้นสูงสุดที่แกนของแม่แรงมากกว่าระดับความสูงอื่น และความเค้นมากที่สุดจะสังเกตได้ที่จุดสีแดงดังรูปที่ 16 จะเป็นบริเวณเดียวกันทั้ง 4 แกน คือ Arm Lower (Right) Arm Upper (Right) Arm Upper (Left) และ Arm Lower (Left) คือ 137 MPa 225 MPa 170 MPa และ 193 MPa ตามลำดับโดยบริเวณดังกล่าวสามารถออกแบบให้เหมาะสมเพื่อลดความเค้น

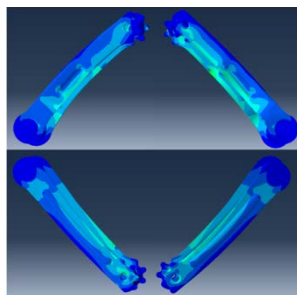
ได้แล้วเมื่อนำค่าความเค้นสูงสุดในแต่ละแขนและแต่ละความสูงมาหาค่าความปลอดภัย (safety factor) จากค่าความต้านแรงดึงคราก (yield strength) จะได้ค่าความปลอดภัยอยู่ในช่วง 1.24 - 3.73 ซึ่งค่าความปลอดภัยตามลักษณะการใช้งานของแม่แรงสามารถออกแบบให้มีค่าได้ 1.5-2.0 [9] อีกทั้งแขนคู่ล่างที่สัมผัสกัน Arm Lower (Left) จะเกิดความเค้นของการสัมผัสสูงสุด คือ 228 MPa ซึ่งยังน้อยกว่าค่าความต้านแรงดึงครากดังนั้นแม่แรงนี้ยังสามารถที่จะออกแบบให้มีค่าความปลอดภัยที่เหมาะสมในช่วงดังกล่าวได้



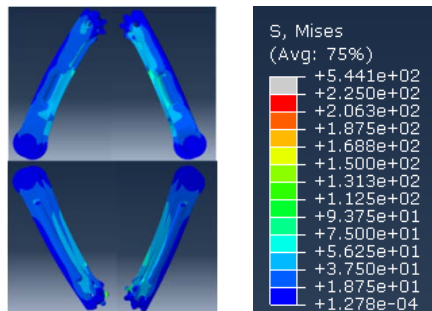
รูปที่ 16 แสดงความเค้นของแขนแม่แรงที่ stroke 183mm



รูปที่ 17 แสดงความเค้นของแขนแม่แรงที่ stroke 230mm



รูปที่ 18 แสดงความเค้นของแขนแม่แรงที่ stroke 270 mm



รูปที่ 19 แสดงความเค้นของแขนแม่แรงที่ stroke 320mm

4.3 ผลทดสอบการรับน้ำหนักของแม่แรง

ผลทดสอบการวัดค่าความเครียดที่แขนของแม่แรงทั้ง 4 แขน ได้ค่าความเครียดแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความเครียดที่วัดได้จากการทดสอบ

Stroke (mm)	ความเครียด ($\times 10^{-6}$)			
	Arm Lower (Right)	Arm Upper (Right)	Arm Upper (Left)	Arm Lower (Left)
183	519	247	312	610
230	388	177	278	400
270	356	106	246	289
320	250	105	240	229

จากนั้นแปลงค่าความเครียดเป็นค่าความเค้น จากสมการ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (14)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความเค้น

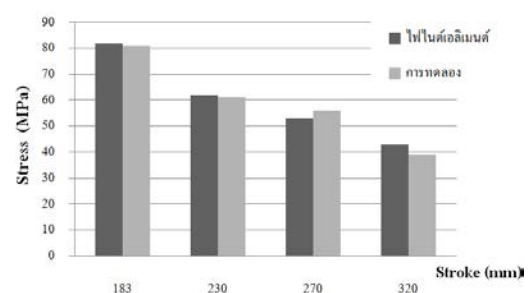
E คือ โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (157 GPa)

ε คือ ความเครียด

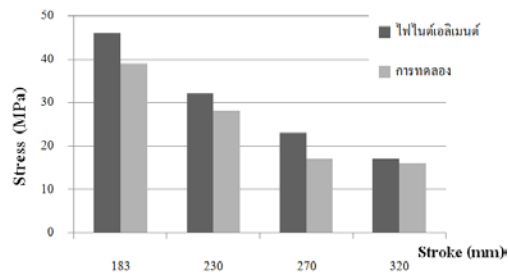
และจะได้ค่าความเค้นเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

4.4 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง

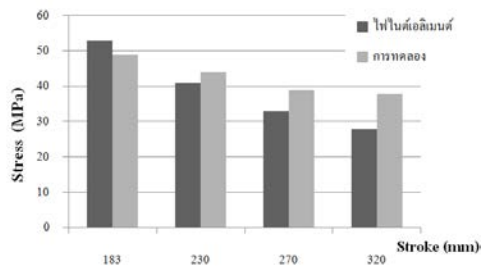
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของแขนแม่แรงทั้ง 4 แขน มาเปรียบเทียบกับกัน ในตำแหน่งเดียวกันกับที่ติดสเตรนเกจพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อความสูงการยกของแม่แรงเพิ่มขึ้นความเค้นที่เกิดขึ้นจะลดลงจากการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าการวิเคราะห์ความเค้นของแขนแม่แรงด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับความเค้นที่เกิดขึ้นจากการรับน้ำหนักจริง แสดงได้ดังรูปที่ 20-23



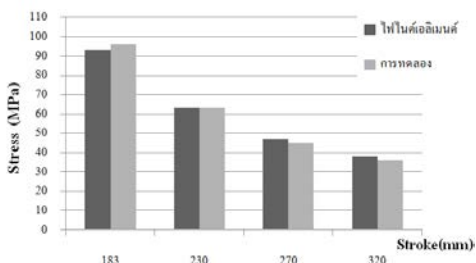
รูปที่ 20 Arm Lower (Right)



รูปที่ 21 Arm Upper (Right)



รูปที่ 22 Arm Upper (Left)



รูปที่ 23 Arm Lower (Left)

5. สรุป

1. การวิเคราะห์แม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยวิธีพลศาสตร์มัลติบอดีไดนามิกส์ พบว่าเมื่อความสูงการยกของแม่แรงเพิ่มขึ้นแรงที่กระทำที่ข้อต่อของแม่แรงมีแนวโน้มลดลง

2. การวิเคราะห์แม่แรงรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าเมื่อความสูงการยกของแม่แรงเพิ่มขึ้นความเค้นที่กระทำที่แขนของแม่แรงมีแนวโน้มลดลง

3. ผลการทดสอบแม่แรงพบว่าเมื่อความสูงการยกของแม่แรงเพิ่มขึ้นความเค้นที่กระทำที่แขนของแม่แรงมีแนวโน้มลดลง

4. จากข้อ 2 และ 3 ผลความเค้นที่เกิดขึ้นที่ความสูงการยกของแม่แรงเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าวิธีการวิเคราะห์หาความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีพลศาสตร์มัลติบอดีไดนามิกส์ในงานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางเพื่อนำไปใช้ออกแบบแม่แรงได้

5. ค่าความเค้นมากที่สุดที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดขึ้นที่ Arm Upper (Right) มีค่าความปลอดภัย 1.24–3.73 และจุดที่เกิดความเค้นสูงสุดสามารถออกแบบให้มีค่าความปลอดภัยที่เหมาะสมได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mounika.Kandi.Reddy and Priyanka CH “Design and Fabrication of Motorized Screw Jack for a four wheeler” Project Report, 2011
- [2] A. S. Akinwonmi and A. Mohammed, “Modification of Existing Design of a Car Jack” Journal of Engineering Trends in Engineering and Applied Sciences, pp.581-588, 2012
- [3] Reena M Arona et al, “Design Optimization of Power Screw Jack” International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, Vol.9, No.2, pp.171-177, 2011
- [4] Nitinchandra R. Patel et al “Design of Toggle Jack Considering Material Selection of Screw-Nut Combination” International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, Vol. 2, Issue5, 2013
- [5] M. M. Nor, K. Kadirgama and M. M. Rahman, “Analysis of Auto Car Jack” National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Students, pp.198-203, 2010
- [6] Robert L.Norton “Machine Design” Singapore, Pearson, 2006
- [7] AHMED A. SHABANA, “Computational Dynamics” 3 rd ed. Singapore-Wiley, 2010
- [8] Daryl L. Logan, Finite Element Method, 3rd ed, Thomson, 2002
- [9] V. Uengpakorn and C.Thanadngan, Machine Design, Se-Education Pubic Company Limited, 2005

การวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างแบบรังผึ้งของวัสดุ คอมโพสิตไม้ – ซีเมนต์

Design and Analysis of Wood-Cement Composite Honeycomb Sandwich Structure

ปณปวีร์ จงรัตนศรีกุล สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: punpawee@tisi.go.th

บทคัดย่อ

โครงสร้างประกบรังผึ้งเป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่มีค่าทางวิศวกรรมโครงสร้างที่พัฒนาโดยอุตสาหกรรมคอมโพสิต ได้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรมเช่นการบิน การขนส่งระบบรางและอื่น ๆ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ เป็นแผ่นหน้าและพื้นหลังที่ถูกเลือกใช้ โครงสร้างรังผึ้งส่วนใหญ่จะจัดเป็นระเบียบในรูปแบบของเซลล์หกเหลี่ยมกลวงกับผนังแนวตั้งของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ โครงสร้างรังผึ้งมีคุณสมบัติที่มีความหนาแน่นต่ำ โดยโครงสร้างรังผึ้งเหล่านี้มีความพรุนสูงมาก โดยทั่วไปแล้ว 75-95% ของโครงสร้างประกอบด้วยช่องว่าง การทดสอบโดยการดัดโค้งสามจุดได้ดำเนินการเพื่อตรวจสอบการไหลและเปรียบเทียบผลลัพธ์การจำลองการทดลองระหว่างแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ความหนาต่างๆกัน นำมาประกอบกันเป็นโครงสร้างรังผึ้งที่มีความหนา 24 มิลลิเมตรกับแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ที่มีความหนา 24 มม. โดยผลที่ได้คือวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง ได้ทำให้พบกับความหลากหลายของการใช้งานในการแลกเปลี่ยนความร้อน การดูดซับพลังงาน การกระจายการไหลและน้ำหนักเบา วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ที่มีโครงสร้างรังผึ้งที่ใช้ในงานวิศวกรรมและในทางวิทยาศาสตร์ในอุตสาหกรรมนั้นมีความพรุนและความแข็งแรง

คำสำคัญ: วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์, โครงสร้างประกบรังผึ้ง

Abstract

The honey comb sandwich construction is one of the most valued structural engineering innovations developed by the composite industry. Used extensively in many industries like aerospace, transportation rails, etc. In this study a wood - cement particle board chosen a face sheet is a core material. Honeycombs are most often an array of hollow hexagonal cells with thin vertical walls wood - cement particle board with Honeycomb is low density permeable material with numerous applications. The defining characteristic of these Honeycombs is a very high porosity; typically 75-95% of the volume consists of void spaces. Static three-point bending tests were carried out in order to investigate load and compared with experimental and simulation results between Wood Cement different thickness. built to honeycomb structure total thickness of 24 mm and cement particle boards with a thickness of 24 mm. Wood - cement particle board Honeycombs have found a wide variety of applications in heat exchangers,

energy absorption, flow diffusion and lightweight optics. wood - cement particle board honeycomb is used in numerous engineering and scientific applications in industry for both porosity and strength

Keywords : Wood-Cement Composite, Honeycomb Sandwich Structure

1. บทนำ

แผ่นชั้นไม้อัดซีเมนต์ (wood cement particle board) เป็นผลิตภัณฑ์แผ่นไม้อัดซีเมนต์ (wood cementboard) ชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมระหว่างชั้นไม้สับ (wood chip) และปูนซีเมนต์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่รวมคุณสมบัติที่ดีระหว่างไม้และปูนซีเมนต์ ได้แก่ ทนน้ำ ทนไฟ ทนปลวก เชื้อราและแมลง รวมทั้งไม่มีอันตรายจากฝุ่นผงใยหิน แผ่นชั้นไม้อัดซีเมนต์สามารถนำไปใช้ก่อสร้างอาคารบ้านเรือนได้ทั้งหลัง พัฒนาเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ของพื้น ผนัง ฝ้าเพดาน หลังคา ในการผลิตแผ่นชั้นไม้อัดซีเมนต์สามารถนำไม้ขนาดเล็ก เศษไม้จากโรงงานมาใช้เป็นวัตถุดิบได้ เป็นการใช้อย่างคุ้มค่า ใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้จริง ช่วยลดปัญหาการขาดแคลนไม้ และช่วยลดภาวะโลกร้อน จะเห็นได้ว่าแผ่นชั้นไม้อัดซีเมนต์ป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้ไม้จริงได้และไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ โดยในการทดลองนี้ทำการทดลองโดยนำ วัสดุแผ่นชั้นไม้อัดซีเมนต์มาทำเป็นโครงสร้างแบบรังผึ้ง

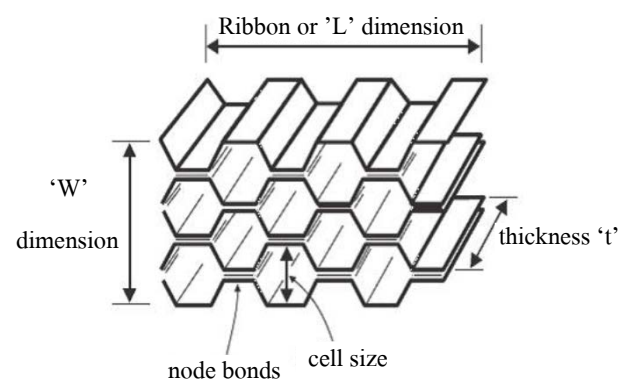


รูปที่ 1 แผ่นชั้นไม้อัดซีเมนต์

โครงสร้างแบบรังผึ้งเป็นการก่อสร้างที่นิยมใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงมั่นคงและมีประสิทธิภาพในการที่จะต้องรับน้ำหนักมากที่สุด โครงสร้างแบบรังผึ้งลักษณะหกเหลี่ยมเป็นวัสดุหลักพื้นฐานที่ทำให้โครงสร้างมีประสิทธิภาพ มีความแข็งแรงและทนต่อการเสีรูป โดยพื้นฐานแนวคิดของ

โครงสร้างนี้คือแผ่นผิวด้านหน้าจะเป็นโครงสร้างหลักที่รับแรงความเค้นดัด ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับความเค้น โดยมีความคล้ายคลึงอย่างมากกับลักษณะของการรับแรงแบบคาน โครงสร้างแบบรังผึ้งเป็นแนวคิดการออกแบบโครงสร้างที่น่าสนใจโดยเป็นทางเลือกที่เหมาะสมของวัสดุและรูปทรงเรขาคณิต โดยโครงสร้างมีอัตราส่วนที่สูงระหว่างความต้านทานการเสีรูปกับน้ำหนักที่สามารถรองรับได้

โครงสร้างรังผึ้งมักจะใช้สำหรับฉนวนกันความร้อน, ฉนวนดูดซับมลพิษสิ่งแวดล้อม โครงสร้างรังผึ้งช่วยให้ลดปริมาณของวัสดุแผ่นชั้นไม้อัดซีเมนต์ มีน้ำหนักที่เบา จึงลดค่าใช้จ่ายสำหรับค่าวัสดุได้อย่างมาก



รูปที่ 2 โครงสร้างแบบรังผึ้ง

การศึกษาลักษณะความแข็งแรงของโครงสร้างแบบแซนวิชรังผึ้งนั้น เป็นที่แพร่หลายในหมู่นักวิจัย มีการนำเสนอผลงานวิจัยหลากหลายรูปแบบ แต่โดยส่วนใหญ่นั้นเป็นการศึกษาโดยใช้วัสดุในกลุ่มโลหะ เช่น [1] หยางและเจียว (2008) ได้ดำเนินการศึกษาวัสดุที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างแบบแซนวิชรังผึ้ง ซึ่งจะนำมาใช้ในการจำลองผลกระทบและพบว่า มีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงเมื่อมีการเพิ่มโหลด.[2] พิค และ อัล (1999) ได้ศึกษาลักษณะความ

แข็งแรงของโครงสร้างแบบแชนวิชของแผ่นอลูมิเนียมรีนึ่งโดยใช้ชุดการทดสอบความแข็งแรงคือการทดสอบจุดที่เกิดการโก่ง พวกเขายังได้ดำเนินการศึกษาเชิงทฤษฎีในการวิเคราะห์ความยืดหยุ่นพลาสติก พฤติกรรมการโก่งแรงที่ดีที่สุดและความแข็งแรงของแผ่นแชนวิช.[3] คูทานิน, จอห์น, โจชโค และ กัสเซอร์ ได้ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างแบบแชนวิชแผ่นรีนึ่งในลักษณะอยู่กับที่โดยใช้วัสดุเรซินในการทดลอง

ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงขอเสนอการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแบบแชนวิชรีนึ่งของวัสดุที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นทางเลือกและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมต่างๆได้

2. ขั้นตอนการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ความหนาต่างๆกัน โดยนำมาประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างรังผึ้งให้ได้ความหนา 24 มิลลิเมตร

2.1.2 วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ความหนา 24 มิลลิเมตร

โดยทั้ง 2 ประเภทนั้นเลือกใช้วัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างขึ้นไม้และซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:3 โดยหลักการเลือกวัสดุขึ้นไม้ต้องเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.878 ซึ่งวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ทั้ง 2 อัตราส่วน (ตารางที่ 2) นั้น ให้คุณสมบัติที่ไม่ต่างจากค่าที่กำหนดและเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.878 (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์

Property	Value	Units
Elastic Modulus	3000	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.3	N/A
Shear Modulus	300	N/mm ²
Mass Density	159.99	Kg/m ³
Yield Strength	20	N/mm ²

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพตามอัตรา

ส่วนระหว่างซีเมนต์และขึ้นไม้

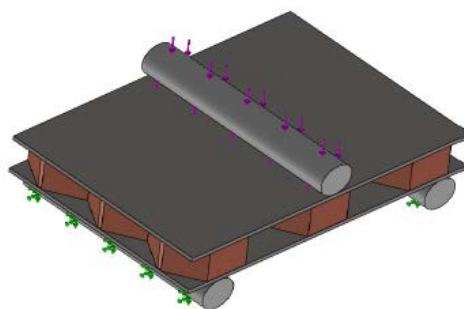
Wood:Cement	Density (g/cm ³)	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	IB (N/mm ²)
1:3	1.27(0.18)	12.68(0.5)	6009.6(32.1)	0.35(0.07)
1:4	1.28(0.12)	10.56(0.8)	7056.4(199.3)	0.56(0.04)
BISON type HZ	1.20	9.0	3000	0.4

ตารางที่ 3 คุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.878

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	การพองตัวเมื่อแช่น้ำ ร้อยละไม่เกิน	2	ข้อ 9.5
2	ความต้านแรงดัด เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	9	ข้อ 9.6
3	มอดูลัสยืดหยุ่น เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	3 000	ข้อ 9.6
4	ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า	0.5	ข้อ 9.7

2.2 ทฤษฎีการจำลองของการทดสอบโครงสร้างแบบแชนวิช (พฤติกรรมกรรมการโก่ง)

วิธีที่ง่ายเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการโก่ง โดยแสดงจากขั้นตอนทดสอบที่มีโครงสร้างแบบแชนวิช ภายใต้อันตรึงที่ช่วงกลางของโครงสร้างได้รับการพิจารณาตามที่แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แรงกระทำลงที่จุดกึ่งกลางของโครงสร้างรังผึ้ง

จากรูปแสดงให้เห็นว่าผิวด้านหน้าได้รับความเค้นดัดเท่านั้น อย่างไรก็ตามรูปแบบของความเค้นดัดนั้นเป็นไปตามทิศทางของความหนา ทั้งโครงสร้างรังผึ้งและผิวหน้า สามารถหาความหนาของแผ่นได้จาก

$$(tf = TC) = 5mm$$

โดย เกลซี่ (1958) ได้เสนอสูตรของการคำนวณการโก่งช่วงกลาง δ , โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น E_f , ปริมาตรของรังผึ้ง I_f , โครงสร้างรังผึ้งแฉกแซนวิชที่ทำจากแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ในระบอบที่มีความยืดหยุ่นเชิงเส้นสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\delta = Pa^3 / 48E_f I_f + Pa / 4A_c G_{ea} \quad (1)$$

ในส่วนแรกทางด้านขวามือในของสมการ (1) เป็นผลกระทบที่เกิดจากการโก่งงอและในส่วนที่สองเกิดจากแรงเฉือน ดังจะเห็นในรูป 3 การเปรียบเทียบของทฤษฎีการคาดการณ์ (เช่นระหว่างโหนดและโก่งช่วงกลาง) โดยใช้สมการ 1 จะทำกับผลการทดลองสำหรับชิ้นงานทดสอบในปัจจุบันภายใต้การตัด จะเห็นว่าสมการ (1) สามารถคาดการณ์การตอบสนองการยืดหยุ่นเชิงเส้นของคานรับน้ำหนักแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์รังผึ้งแซนวิชได้ดี โดยที่

P = แรงที่กระทำลงบนวัตถุที่ทำให้เกิดการโก่ง

a = ระยะห่างระหว่างแท่นที่รองรับวัตถุ

E_f = โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น

I_f = ปริมาตรของวัตถุ

A_c = พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

G_{ea} = โมดูลัสของแรงเฉือน

ที่ซึ่ง C เป็นค่าคงที่ ที่เป็นตัวแทนของแรงเฉือนที่เกิดจากแกนของรังผึ้งในขณะที่ได้รับการตัด ค่าคงที่ C อาจได้รับจากสมการ (1) โดยการสมมติว่ามีผลกระทบของแรงเฉือนของแกนเพื่อให้ความแข็งแรงแรงงมีแนวโน้มที่จะคล้ายกับที่ให้ความต้านทานการเสีรูปของผนังแฉก ผลลัพธ์เหล่านี้หาได้จาก

$$C = C1 / C1 + C2 \quad (2)$$

$$\text{where, } C1 = d^3 / 48E_f I_f,$$

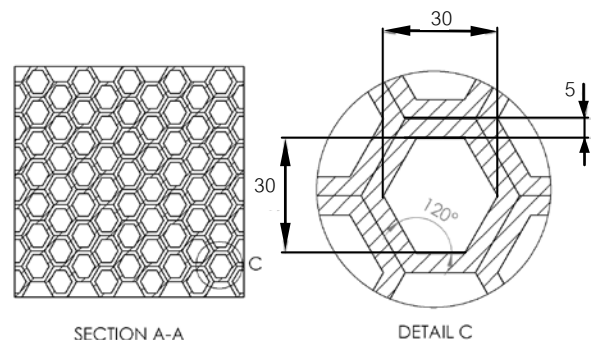
$$C2 = d / 4A_c G_{ea} \quad (3)$$

2.3.การดำเนินการทดลอง

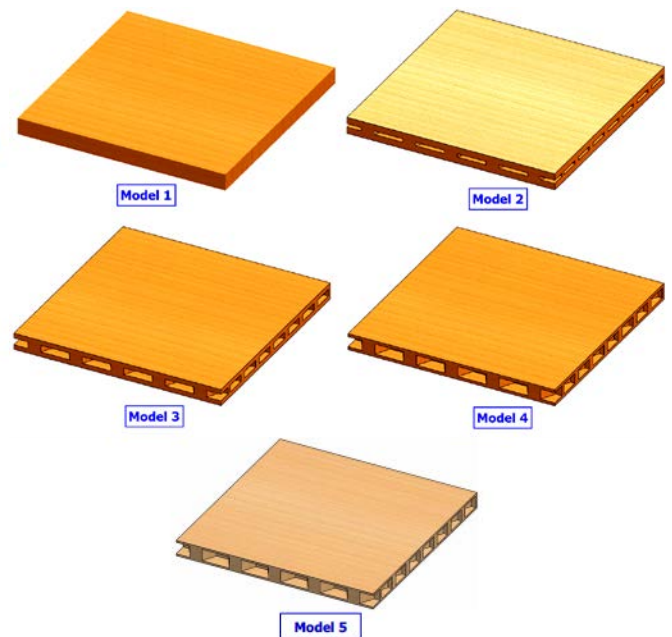
ข้อมูลที่กำหนดในโปรแกรมการวิเคราะห์

แบบจำลอง

1. แบบจำลองที่ 1 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 24 มม.
2. แบบจำลองที่ 2 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 9.5 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 5 มม.
3. แบบจำลองที่ 3 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 7 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 10 มม.
4. แบบจำลองที่ 4 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 4.5 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 15 มม.
5. แบบจำลองที่ 5 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 3.0 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 18 มม.



รูปที่ 4 ขนาดของรังผึ้ง



รูปที่ 5 แบบจำลองทั้ง 5 รูปแบบ

การทดลอง

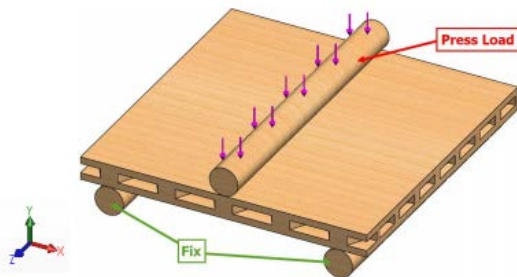


รูปที่ 6 3-point bending test
ขอบเขตและเงื่อนไขในการทดลอง

Type of support	Movement Characteristics		
	Horizontal	Vertical	Rotation
Hinged Support	$\Delta_x = 0$	$\Delta_y = 0$	$\theta \neq 0$
Roller Support	$\Delta_x \neq 0$	$\Delta_y = 0$	$\theta \neq 0$
Fixed Support	$\Delta_x = 0$	$\Delta_y = 0$	$\theta \neq 0$
Spring Support	$\Delta_x \neq 0$	$\Delta_y \neq 0$	$\theta \neq 0$

รูปที่ 7 Boundary Condition

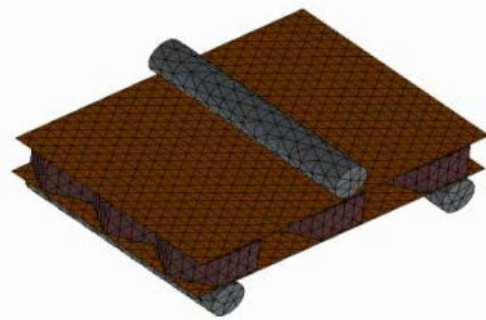
- ยึดชิ้นงานแท่งเหล็กทรงกระบอกด้านล่างทั้ง 2 ข้าง ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางแท่งเหล็ก 240 mm
- แรงกระทำกดที่ผ่านแท่งเหล็กทรงกระบอกด้านบน โดยมีขนาดของแรงดังนี้
 - 2000 N
 - 5000 N
 - 7000 N



รูปที่ 8 แบบจำลองแสดงทิศทางของแรง

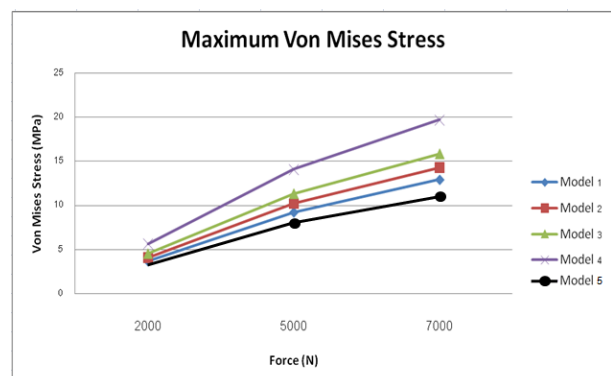
3.ผลการทดลอง

การวิเคราะห์แบบวัตถุไม่เคลื่อนที่ได้ ดำเนินการเพื่อที่จะได้รับผลของการตอบสนองของ โครงสร้างแผ่นรังผึ้งหกเหลี่ยมแซนวิชที่ได้รับแรงกระทำ โหลดที่แตกต่างกันกล่าวคือ 2kN, 5kN, 7kN และที่ความ สูงของโครงสร้างรังผึ้งที่แตกต่างกันกล่าวคือ 0 มม. 5 มม. 10 มม. 15 มม. และ 18 มม. โดยทำการสังเกตใน ระหว่างการวิเคราะห์การโก่งที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการ เพิ่มขึ้นของแรงที่กระทำโดย รูปที่ 8 แสดงถึงทิศทางการ เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานทั้ง 5 รูปแบบ



รูปที่ 9 Meshed Model

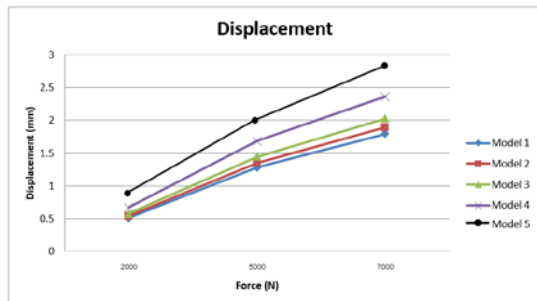
ความโค้งและความเครียด จะถูกนำเสนอใน ลักษณะกราฟ ดังแสดงที่ในรูป 10 และ 11 กราฟแสดง ถึงการเปลี่ยนแปลงของความเครียด กับภาระโหลด ตาม ขนาดความสูงของโครงสร้างรังผึ้งต่างๆ ในรูปที่ 12 จาก ตารางสรุปผล จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าค่าความเครียด เพิ่มขึ้นอย่างเห็น ได้ชัด เมื่อมีแรงกระทำบนวัสดุทดสอบ เพิ่มขึ้น



รูปที่ 10 รูปแบบของความเครียดที่เกิดขึ้นทั้ง 5 รูปแบบ

จากรูปที่ 10 พบว่าขนาดของแรงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผล กระทบต่อวัสดุที่ทำกรทดลอง โดย Max Von Mises

Stress สูงที่สุดที่เกิดขึ้นนั้น จะเกิดในกรณีที่ให้แรงสูงสุด ที่ 7 kN และที่ Model 1 เกิด Max Von Mises Stress สูงที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดของแรงที่กระทำต่อวัตถุเท่ากัน เนื่องจากรูปแบบของ Model ที่ 1 นั้นไม่มีความกลวงจึงสามารถรับความเค้นได้ในระดับที่สูงกว่า Model อื่นๆ



รูปที่ 11 รูปแบบการโก่งตัวที่เกิดขึ้นทั้ง 5 รูปแบบ จากรูปที่ 11 พบว่าขนาดของแรงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผล กระทั่งต่อวัสดุที่ทำการทดลอง โดยการเกิด Displacement สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในแต่ละโมเดลนั้น จะเกิดในกรณีที่ให้แรงสูงสุดที่ 7 kN และที่ Model 5 นั้น เกิด Displacement สูงที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดของแรงที่กระทำต่อวัตถุเท่ากัน นั่นคือเมื่อวัตถุมีความกลวงมากขึ้น จะทำให้ Displacement มากขึ้นเช่นกัน

ตารางแสดงค่า Stress และ Displacement ในกราฟ

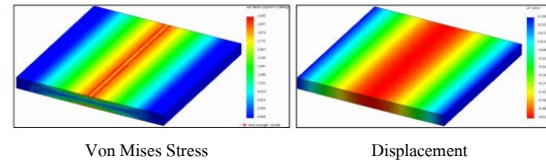
Part	Value	Force (N)		
		2000	5000	7000
Model 1 Wood 24 mm	Max Von Mises Stress (MPa)	3.695	9.237	12.93
	Max Displacement (mm)	0.513	1.283	1.796
	Max Shear Stress YZ (MPa)	0.221	0.531	0.744
	Max Shear Stress XY (MPa)	0.463	1.158	1.621
	Max Shear Stress XZ (MPa)	0.046	0.115	0.161
Model 2 Wood 9.5 mm Hex 5 mm	Max Von Mises Stress (MPa)	4.09	10.23	14.32
	Max Displacement (mm)	0.541	1.352	1.893
	Max Shear Stress YZ (MPa)	0.394	0.985	1.379
	Max Shear Stress XY (MPa)	1.015	2.538	3.553
	Max Shear Stress XZ (MPa)	0.43	1.075	1.505
Model 3 Wood 7 mm Hex 10 mm	Max Von Mises Stress (MPa)	4.531	11.33	15.86
	Max Displacement (mm)	0.579	1.447	2.026
	Max Shear Stress YZ (MPa)	0.502	1.255	1.756
	Max Shear Stress XY (MPa)	1.171	2.929	4.1
	Max Shear Stress XZ (MPa)	0.542	1.354	1.896
Model 4 Wood 4.5 mm Hex 15 mm	Max Von Mises Stress (MPa)	5.631	14.08	19.71
	Max Displacement (mm)	0.675	1.686	2.361
	Max Shear Stress YZ (MPa)	0.794	1.986	2.781
	Max Shear Stress XY (MPa)	1.287	3.218	4.505
	Max Shear Stress XZ (MPa)	0.638	1.595	2.233
Model 5 Wood 3 mm Hex 18 mm	Max Von Mises Stress (MPa)	7.453	18.63	26.09
	Max Displacement (mm)	0.804	2.01	2.814
	Max Shear Stress YZ (MPa)	1.007	2.517	3.523
	Max Shear Stress XY (MPa)	1.418	3.544	4.962
	Max Shear Stress XZ (MPa)	1.036	2.591	3.627

รูปที่ 12 ตารางสรุปผลการทดลอง

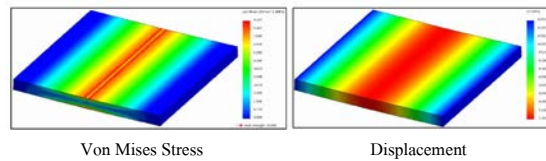
ผลการทดลอง

1. แบบจำลองที่ 1 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 24 มม.

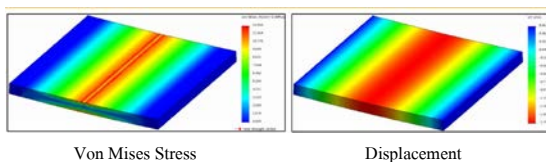
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N

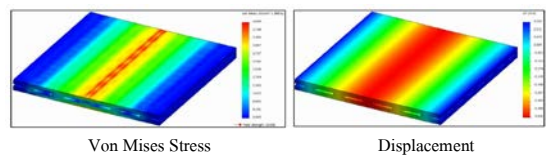


- แรงขนาด 7000 N

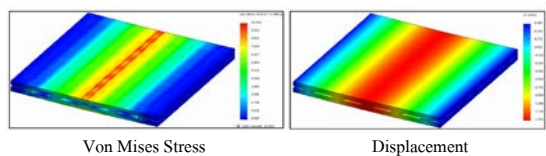


2. แบบจำลองที่ 2 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.หนา 9.5 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 5 มม.

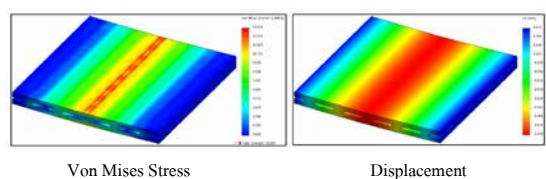
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N

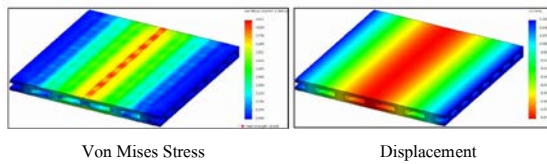


- แรงขนาด 7000 N

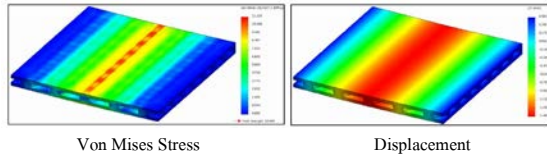


3 แบบจำลองที่ 3 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.
หนา 7 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 10 มม.

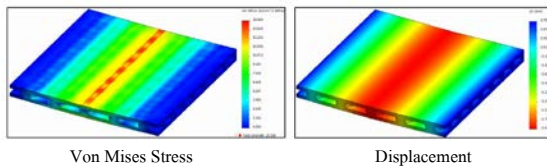
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N

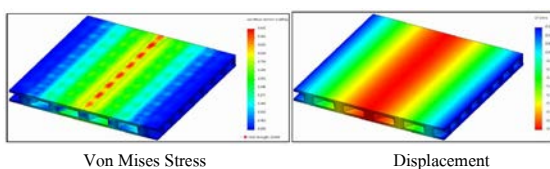


- แรงขนาด 7000 N

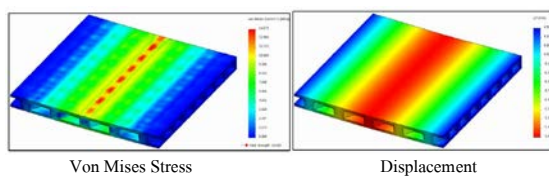


4 แบบจำลองที่ 4 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.
หนา 4.5 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 15 มม.

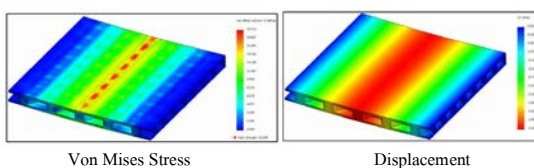
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N

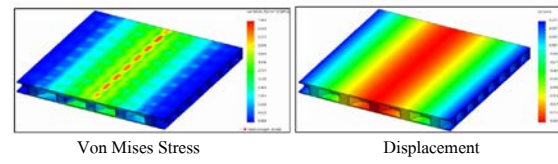


- แรงขนาด 7000 N

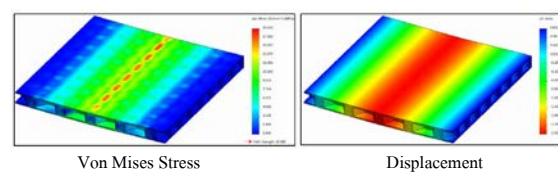


5 แบบจำลองที่ 5 คือ แผ่นไม้ขนาด 300 มม. x 300 มม.
หนา 3.0 มม. และชั้นรังผึ้ง หนา 18 มม.

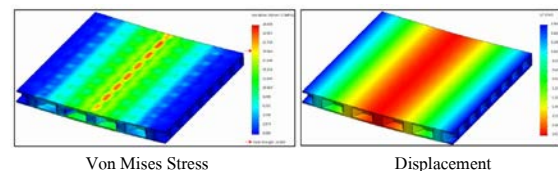
- แรงขนาด 2000 N



- แรงขนาด 5000 N



- แรงขนาด 7000 N



4.สรุปผล

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มแรงกระทำลงบนวัสดุทดสอบโดยเริ่มจากแรงขนาด 2 kN 5 kN และ 7 kN นั้น จะส่งผลให้ค่า Von Mises Stress เพิ่มขึ้น ตามแรงที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุทดสอบในรูปแบบที่มีลักษณะกลางหรือมีความสูงของส่วนผนังรังผึ้งมากจะทำให้เกิด Von Mises Stress น้อยกว่า วัสดุทดสอบที่มีลักษณะตันหรือมีความสูงของส่วนรังผึ้งน้อย

อีกทั้งในการทดสอบแบบ 3 point-bending นั้น จะทำให้เกิดการโก่งตัวของวัสดุ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มแรงกระทำลงบนวัสดุทดสอบโดยเริ่มจากแรงขนาด 2 kN 5 kN และ 7 kN นั้น จะส่งผลให้ค่า Displacement เพิ่มขึ้น ตามแรงที่เพิ่มขึ้น โดยวัสดุทดสอบในรูปแบบที่มีลักษณะกลางหรือมีความสูงของส่วนผนังรังผึ้งมากจะทำให้เกิด Displacement มากกว่า วัสดุทดสอบที่มีลักษณะตันหรือมีความสูงของส่วนรังผึ้งน้อย

โครงสร้างแบบรังผึ้งของวัสดุคอมโพสิตไม้-ซีเมนต์โดยทั่วไปสามารถใช้ได้ทันทีในปริมาณมาก โครงสร้างดังกล่าวจะถูกใช้ในงานวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ โดยจะถูกใช้งานจำนวนมากในอุตสาหกรรมที่ต้องการทั้งความพูนและความแข็งแรงในการทำงานในปัจจุบัน พฤติกรรมของโครงสร้างแบบรังผึ้งของวัสดุคอมโพสิตไม้-ซีเมนต์ มีการทดลองในแบบที่รับแรงกระทำสูง โดยการจำลองเชิงตัวเลขถูกใช้ในการคาดการณ์การโก่งตัว รวมทั้งได้ทำการศึกษาค่าและเปรียบเทียบบนพื้นฐานของผลการทดลอง พบว่าการไถ่ระดับสีของเส้นกราฟที่แสดงผลของความโก่งสำหรับความสูงของรังผึ้งต่ำจนไปถึงความสูงของรังผึ้งสูงสุด โดยผลลัพธ์เหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแผงโครงสร้างแบบรังผึ้งได้

5.เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Katunin, M. John, K. Jozsko and A. Kajzer, "Characterization of quasi - static behavior of honeycomb core sandwich structures," Modelowanie Inzynierskie, nr 53, ISSN 1896-771X.
- [2] W. D. Callister, "Materials Science and Engineering An Introduction." India: Wiley. 2000,
- [3] C. Hwu and J. S. Hu, "Delamination buckling of honeycomb sandwich panels with laminated faces," Journal of Composite Materials, 29(15), pp.1962-1987, 1995.
- [4] I. G. Masters and K. E. Evans, "Models for elastic deformations of honeycombs," Composite structures, 35, pp.403-422, 1996.
- [5] P. Qiao and M. Yang, "Impact Mechanics and High-Energy Absorbing Materials," Journal of Aerospace Engineering, 21:4, pp.235-248, 2008.
- [6] K. Rao and J. Rao, "Thermostuctural analysis of honeycomb sandwich panels, International Journal of Engineering, Science & Advanced Technology," 2(5), pp.1402-1409, 2012.
- [7] M. R. Said, M. K. Ismail and S. A. Syed Putra, "Paper Honeycomb Sandwiches Panels under Static 3 - Point Bending", International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials (ICE SEAM 2011) Solo-Indonesia, pp.271-278, 2011.
- [8] J. Paika, A. K. Thayamballi and G. S. Kim, "The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels," Thin - Walled Structures, 35(3), pp.205-231, 1999.

การออกแบบหัวดูดอากาศแบบสล롯สำหรับกระบวนการชุบโลหะ

Design of Slot Hood for Plating Process

ภัทรพันธุ์ ทมดกั้ง กิรติ สุลักษณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

การชุบโลหะเป็นกระบวนการเพิ่มสมบัติ ความเงา ความคงทนสภาพกัดกร่อน ความแข็งแรงให้แก่โลหะ ในระหว่างการชุบโลหะมักเกิดไอระเหยของสารเคมีในน้ำยาชุบโลหะปนเปื้อนในอากาศซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและออกแบบหัวดูดอากาศสำหรับถังชุบขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) $0.62 \times 1.50 \times 1.00$ m โดยประเมินความเหมาะสมด้านขนาด ลักษณะการเจาะช่องทางดูดอากาศที่มีผลต่อการกระจายความเร็วของการดูด การศึกษาใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศบนพื้นฐานการจำลองแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขนาดความสูงและความกว้างของหัวดูดอากาศไม่ส่งผลต่อการกระจายความเร็วอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศ ลักษณะรูปทรงการเจาะช่องทางเข้าของอากาศไม่ส่งผลต่อการกระจายความเร็วด้วยเช่นกัน การกระจายความเร็วของอากาศจะสม่ำเสมอขึ้นเมื่อพื้นที่ของช่องทางเข้าของอากาศเพิ่มขึ้นตามระยะ X นอกจากนั้นยังพบว่าการจำลองการไหลที่เหมาะสมสำหรับใช้ออกแบบหัวดูดอากาศคือ การจำลองการไหลแบบราบเรียบ

คำสำคัญ : การชุบโลหะ, หัวดูดอากาศ, ความเร็วยึดจับ, การจำลองการไหล, ออกแบบ

Abstract

Metal plating is a process to improve the properties of metals, such as shininess, corrosion resistance, and hardness. During the plating process, the chemicals in plating solutions will usually evaporate in the air which is harmful to human health. This research aims to study and design a hood for a plating tank size (width×length×height), of $0.62 \times 1.50 \times 1.00$ m. The study assesses the suitability in hood size and drilling characteristic of hood slots which are in front to the section speed distribution. The computer simulation has been used to predict the flow behaviors based on laminar and turbulent flow. The study found that the increasing of height and depth of hood are not affect the speed of air flow distribution in front of hood. Furthermore, the slot shape of the hood is also not affect as well. The air flow distribution more regularly when increase the area of hood slot follow longitudinal direction (X). It is found that, moreover, the flow simulation which is suitable for designing the hood is laminar modelling.

Keywords : Plating, Hood, Capture Velocity, Flow Simulation, Design

1. บทนำ

การขูดโลหะเป็นกระบวนการที่ทำเพื่อเพิ่มสมบัติของโลหะเช่น ความต้านทานการกัดกร่อน ป้องกันการเกิดสนิม เป็นต้น กระบวนการขูดโลหะมีการใช้สารเคมีหลายประเภท อาทิ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก โซเดียมคาร์บอเนต คอปเปอร์ไฟโรฟอสเฟต นิกเกอร์ซัลเฟต นิกเกิลคลอไรด์ เป็นต้น[1] ซึ่งสามารถระเหยเป็นไอลอยปนเปื้อนในอากาศและเป็นอันตราย ดังนั้นจึงต้องมีการระบายอากาศที่ปนเปื้อนออกไป โดยติดตั้งหัวดูดที่ปากถังขูด ซึ่งมีให้เลือกหลายชนิดแต่ชนิดที่นิยมใช้ในกระบวนการขูดโลหะคือแบบสล็อต (Slot hood) หัวดูดชนิดนี้จะมีสัดส่วนความกว้างต่อความยาว (W/L) < 0.2 ที่ด้านหน้ามีช่องเจาะสำหรับเป็นทางเข้าของอากาศและมีท่อดูดดูดเข้าทางด้านข้างของหัวดูดเพื่อไม่ให้กีดขวางการเคลื่อนย้ายชิ้นงานเข้าออกถังขูด[2,5] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หัวดูดแบบสล็อต

จากการประเมินและทดสอบพบว่าหัวดูดอากาศแบบสล็อตที่ใช้ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพการดูดอากาศไม่ดีเท่าที่ควร โดยแรงดูดจะมากในบริเวณใกล้ที่ติดกับท่อดูด และจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระยะห่างมากขึ้นไปทางปลายหัวดูดการกระจายแรงดูดจึงไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้สนใจออกแบบหัวดูดใหม่โดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญของหัวดูด ร่วมกับการทดสอบเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้จะนำไปสู่แนวทางในการออกแบบหัวดูดที่เหมาะสมกับการขูดโลหะต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการออกแบบหัวดูด

ในการออกแบบหัวดูดอากาศปัจจัยหลักที่ใช้พิจารณามีดังนี้

1) ความเร็วยึดจับ (Capture velocity) เป็นความเร็วต่ำสุดที่อากาศ ณ จุดกำเนิดสารปนเปื้อนถูกดูดเข้าสู่ระบบขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่หัวดูดและรูปร่างของหัวดูด ค่าความเร็วยึดจับที่ใช้นี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของงาน สำหรับงานขูดโลหะค่าความเร็วดังกล่าวอยู่ในช่วง 0.5–1.0 m/s [2-4]

2) อัตราการดูดของอากาศคำนวณค่าตามมาตรฐานการออกแบบหัวดูดอากาศ ACGIH[3-4] ซึ่งแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของหัวดูดเช่น หัวดูดรูปทรงกลมและสี่เหลี่ยมคำนวณได้จาก

$$Q = V(5X^2 + A) \quad (1)$$

เมื่อ Q เป็นอัตราการดูดของอากาศ (m^3/s), V เป็นความเร็วอากาศที่กึ่งกลางหัวดูดที่จุด X (m/s), X เป็นระยะตามแนวแกนของหัวดูด (m) และ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของหัวดูด (m^2)

3) ปีก (Flange) เป็นแผ่นวัสดุที่ติดอยู่ที่ขอบด้านหน้าของหัวดูด เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากด้านหลังของหัวดูดเคลื่อนที่เข้ามาด้านหน้า

หัวดูดที่ใช้ในปัจจุบันนั้นมีการเจาะช่องทางเข้าที่กระจายเท่ากันตลอดความยาวหัวดูดทำให้การกระจายแรงดูดไม่สม่ำเสมอดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการออกแบบหัวดูดใหม่เพื่อให้ได้การกระจายแรงดูดที่สม่ำเสมอตลอดความยาวของหัวดูด โดยอาศัยหลักการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกับพื้นที่ทางเข้าของอากาศ

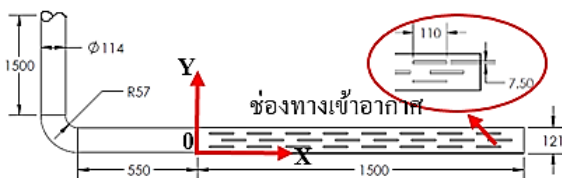
3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

การวิจัยนี้มีการดำเนินงาน 2 ส่วนคือ 1) การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบหัวดูด พื้นฐานของการจำลองเป็นการแก้สมการควบคุมการไหล ซึ่งประกอบด้วยสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมเนื่องจากการวิเคราะห์ได้ดำเนินการในรูปแบบการไหลแบบ

ปั่นป่วนร่วมด้วย[6] ดังนั้นจึงมีสมการสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนเพิ่มเข้ามาในการแก้สมการ และ 2) การทดลองเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

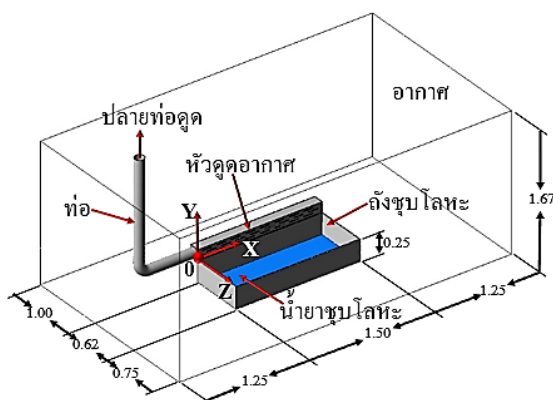
3.1 การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์

การจำลองเริ่มด้วยการสร้างโดเมนของอากาศโดยใช้โปรแกรม SolidWorks2014 ประกอบด้วย หัวดูดอากาศ ท่อ ถังชุบโลหะ ระดับน้ำยาชุบโลหะ หัวดูดอากาศแบบเดิมมีขนาด $0.121 \times 1.500 \times 0.121$ m และช่องทางเข้าของอากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 11.00×0.75 cm ท่อหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.114 m ต่อเข้ากับด้านข้างของหัวดูดแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขนาดและลักษณะช่องทางเข้าของหัวดูดแบบเดิม

โดเมนที่เกี่ยวข้องได้แก่ ปริมาตรของอากาศที่อยู่เหนือผิวของสารเคมีที่บรรจุในถัง ในทางปฏิบัติระดับของสารเคมีในถังจะต่ำกว่าปากถังประมาณ 25 cm ดังนั้นโดเมนอากาศส่วนของถังจึงมีขนาด $0.62 \times 1.50 \times 0.25$ m เมื่อได้ขนาดของโดเมนของวัตถุ (ท่อดูด หัวดูด ถังชุบ) แล้ว จึงสร้างโดเมนของอากาศครอบระบบดังกล่าวโดยกำหนดขนาดดังแสดงในรูปที่ 3 และเงื่อนไขขอบที่ใช้ในการจำลองสรุปในตารางที่ 1

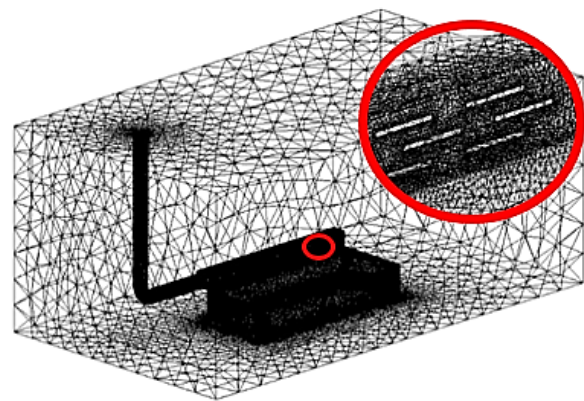


รูปที่ 3 แบบจำลองหัวดูดและ โดเมนของอากาศ

ตารางที่ 1 เงื่อนไขขอบสำหรับการจำลองทางคอมพิวเตอร์

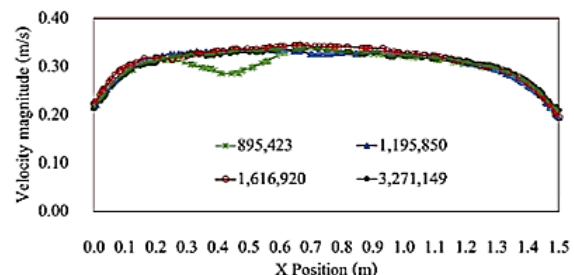
โดเมนอากาศ	Pressure inlet = 0
โดเมนของวัตถุ	
- ผิวด้านหน้าของหัวดูด	Wall (No slip)
- ถังชุบโลหะ	Wall (No slip)
- ผิวหน้ายาชุบโลหะ	Wall (No slip)
- ผิวด้านข้างของท่อ	Wall (No slip)
- ปลายท่อดูด	Velocity inlet (-40 m/s)

การจำลองผลใช้กริดแบบพีระมิดทรงสี่หน้า (Tetrahedral) โดยกำหนดให้กริดในบริเวณช่องทางเข้าและด้านหน้าหัวดูดและถังมีความละเอียดเท่ากับ 3 mm เพราะเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศสูงดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การสร้างกริด

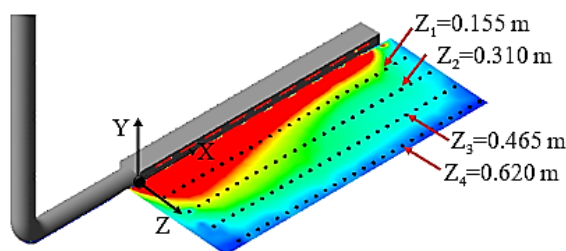
เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่ากริดที่ใช้มีความเหมาะสมจึงได้ทำการทดสอบความเป็นอิสระของกริดบนกริด 4 ชุดคือ 895,423, 1,195,850, 1,616,920 และ 3,271,149 เอลิเมนต์ พบว่ากริดขนาด 1,195,850 เอลิเมนต์ ให้ความแม่นยำเทียบเท่ากริดชุดที่ละเอียดกว่าดังแสดงในรูปที่ 5 ดังนั้นจึงเลือกใช้กริดชุดดังกล่าวในการใช้งาน



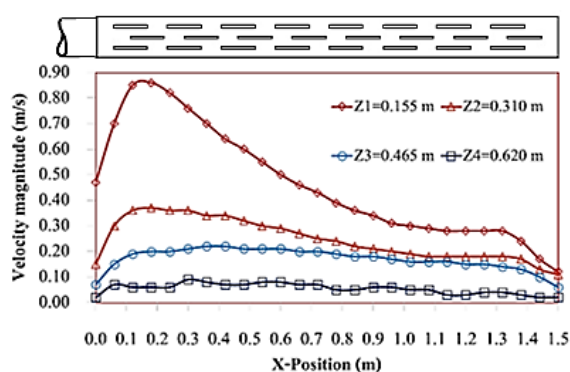
รูปที่ 5 การทดสอบความเป็นอิสระของกริด

การจำลองพฤติกรรมกรไหลใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 โดยจำลอง 3 แบบ คือ แบบราบเรียบ และแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k- ϵ และแบบจำลอง k- ω SST โดยกำหนดค่าคงที่สำหรับแบบจำลอง k- ϵ เป็น $C_\mu = 0.09$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1$ และค่าคงที่สำหรับแบบจำลอง k- ω SST เป็น $\alpha_\infty^+ = 1$, $\alpha_\infty = 0.52$, $\beta_\infty^+ = 0.09$, $\xi_\infty^+ = 1.5$ การคำนวณใช้ขั้นตอนวิธี SIMPLE และใช้วิธีผลต่างศูนย์กลาง (Upwind differencing scheme) แบบอันดับความแม่นยำสอง กำหนดอันดับการลู่เข้าของการคำนวณทุกสมการเป็น 10^{-5} กำหนดค่าเริ่มต้นการคำนวณของความเร็วและความดันเท่ากับ 0 และค่าเริ่มต้นสำหรับ k, ϵ , ω เท่ากับ 1 ทั้งหมด

รูปที่ 6 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วของอากาศบนระนาบ Y=0.0605 m วัดจากขอบถึงขอบ เมื่อนำค่าความเร็วบนระนาบดังกล่าวที่ระยะห่างจากด้านหน้าหัวคูด Z_1 , Z_2 , Z_3 และ Z_4 มาแสดงผลได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศของหัวคูดแบบเดิม



รูปที่ 7 ความเร็วของอากาศของหัวคูดแบบเดิม

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่า การกระจายความเร็วของอากาศไม่สม่ำเสมอ โดยความเร็วด้านหน้าหัวคูดจะมีค่าสูงด้านที่ใกล้กับท่อคูด และลดลงเรื่อย ๆ จนถึงปลายหัวคูด ดังนั้นหากมีไอสารเคมีเกิดขึ้นที่บริเวณปลายหัวคูด หัวคูดแบบเดิมจะไม่สามารถดูดไอสารเคมีออกจากระบบได้อย่าง

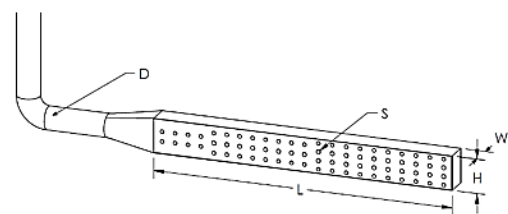
มีประสิทธิภาพ จึงได้นำไปสู่การออกแบบหัวคูดดังแสดงต่อไปนี้

3.2 การออกแบบหัวคูดอากาศ

งานวิจัยนี้สนใจออกแบบหัวคูดอากาศใหม่โดยศึกษาพารามิเตอร์ของหัวคูดที่ส่งผลต่อการดูด ดังนี้

- 1) รูปแบบการจัดวางและขนาดช่องทางเข้าของอากาศ โดยศึกษาเปรียบเทียบกับแบบเดิม
- 2) ขนาดความสูงของหัวคูด โดยศึกษาเปรียบเทียบกับ 3 ขนาดคือ 1.5D, 2.0D และ 2.5D
- 3) ขนาดความกว้างของหัวคูด โดยศึกษาเปรียบเทียบกับ 3 ขนาดคือ 1.0D, 1.5D และ 2.0D
- 4) รูปทรงช่องทางเข้าของอากาศ โดยศึกษาเปรียบเทียบกับ 4 รูปแบบ

รายละเอียดของแต่ละพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 8 เมื่อ D เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 0.114 m, H เป็นความสูงของหัวคูด, W เป็นความกว้างของหัวคูด, L เป็นความยาวของหัวคูดเท่ากับ 1.500 m, S เป็นช่องทางเข้าของอากาศ (พื้นที่รวมของช่องทางเข้าของอากาศเท่ากับ 0.0198 m^2)



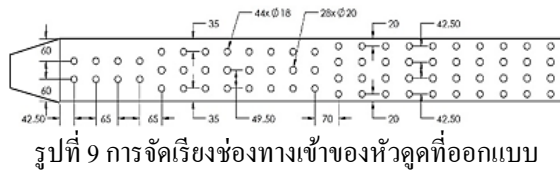
รูปที่ 8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบหัวคูด

3.2.1 ออกแบบรูปแบบการจัดเรียงช่องทางเข้าของ

อากาศ

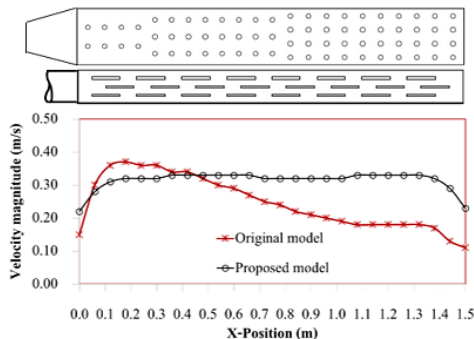
การออกแบบช่องทางเข้าเพื่อให้ได้ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคูดสม่ำเสมอตลอดความยาวหัวคูดนั้น ในขั้นต้นจะกำหนดให้รูปทรงของช่องทางเข้าของอากาศเป็นวงกลมเพื่อให้ง่ายในการสร้างแบบจำลองและกำหนดพื้นที่ของช่องทางเข้าเท่ากับหัวคูดแบบเดิมคือ 0.0198 m^2 เนื่องจากหัวคูดด้านที่ติดกับท่อมีแรงดูดที่สูงและลดลงเรื่อย ๆ จนถึงปลายของหัวคูด ดังนั้นจึงกำหนดให้พื้นที่ทางเข้าเป็นแบบกระจายในลักษณะที่ด้านที่ติดกับท่อพื้นที่จะน้อยและเพิ่มขึ้นตามความยาวของหัวคูดดังแสดงในรูปที่ 9 เพื่อให้ได้แรงดูดด้านหน้าหัวคูดที่สม่ำเสมอตลอดความยาว

ในการจำลองใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ ผลการออกแบบแสดงในรูปที่ 10



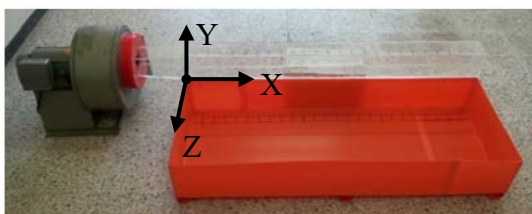
รูปที่ 9 การจัดเรียงช่องทางเข้าของหัวดูดที่ออกแบบ

เมื่อนำการกระจายความเร็วของอากาศด้านหน้าของหัวดูดแบบเดิม และหัวดูดที่ออกแบบช่องทางเข้าแบบใหม่ มาเปรียบเทียบกันได้ผลแสดงในรูปที่ 10 จะเห็นว่ารูปแบบที่ออกแบบใหม่ให้การกระจายความเร็วสม่ำเสมอกว่าแบบเดิมอย่างชัดเจน



รูปที่ 10 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของช่องทางเข้าของหัวดูดแบบเดิมและหัวดูดที่ออกแบบใหม่

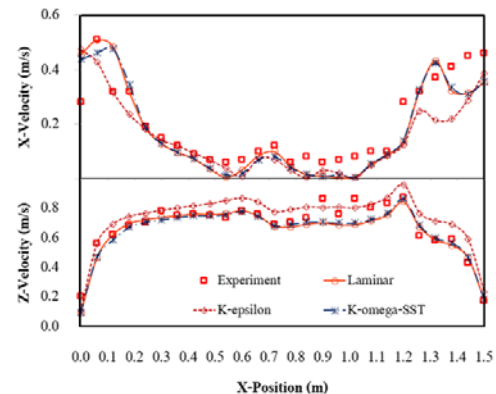
เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองทางคอมพิวเตอร์และหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบหัวดูด จึงได้สร้างชุดทดลองเพื่อใช้ทดสอบ ชุดทดลองประกอบด้วยหัวดูดขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m ถึงขนาด $0.620 \times 1.500 \times 0.250$ m และต่อเข้ากับพัดลมดูดอากาศดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ชุดทดลองหัวดูดอากาศ

จากนั้นทำการวัดค่าความเร็วของอากาศในทิศทาง X และ Z (ส่วนทิศทาง Y ไม่สามารถวัดได้จากข้อจำกัดของเครื่องมือวัด) ที่ด้านหน้าของช่องเจาะแต่ละช่องที่ระยะ $Z=0.01$ m ค่าที่ได้จากการวัดในแต่ละตำแหน่ง X ถูกนำมา

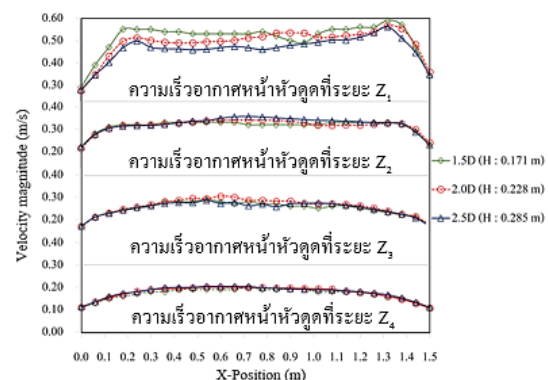
เฉลี่ยแล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองทั้ง 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 12 ผลการทดลองพบว่าความเร็วของอากาศทิศทาง Z ในช่วงต้นของหัวดูด ($X=0$) จะต่ำและเพิ่มขึ้นเมื่อระยะ X เพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเร็วมีค่าค่อนข้างคงที่และลดลงเมื่อถึงปลายของหัวดูด ($X=1.5$) ส่วนความเร็วในทิศทาง X จะสูงบริเวณช่วงต้นและปลายของหัวดูด เนื่องจากการดูดเอาอากาศด้านข้างเข้ามาในระบบด้วย ส่วนบริเวณกลางที่เป็นช่วงสมมาตรอากาศมีความเร็วในแนวตั้งฉาก (ทิศ Z) จึงทำให้ความเร็วทิศทาง X มีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่ามีความสอดคล้องกันดีและพบว่าผลการจำลองแบบราบเรียบกับแบบปั่นป่วน k- ω SST มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง k- ϵ แต่เนื่องจากการจำลองแบบราบเรียบใช้เวลาคำนวณน้อยกว่า ดังนั้นจึงเลือกการจำลองแบบราบเรียบในการออกแบบหัวดูดในที่นี้



รูปที่ 12 ความเร็วอากาศที่ตำแหน่งหน้าช่องทางเข้าของอากาศ(บน) แนวแกน X และ (ล่าง)แนวแกน Z

3.2.2 ออกแบบความสูงของหัวดูดอากาศ

เมื่อนำค่าความเร็วของอากาศที่ตำแหน่ง Z_1, Z_2, Z_3 และ Z_4 ตามความสูงของหัวดูด ($Y=0.0855$ m) ของหัวดูดทั้ง 3 ขนาดมาเปรียบเทียบกันได้ผลดังแสดงในรูปที่ 13

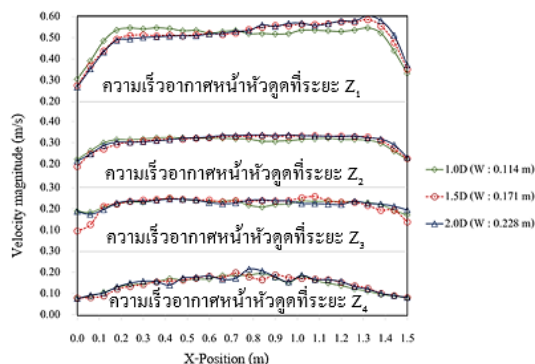


รูปที่ 13 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดทั้ง 3 ขนาดความสูง

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าหัวดูดทั้ง 3 ขนาดให้ลักษณะการกระจายความเร็วของอากาศใกล้เคียงกัน เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเปรียบเทียบขนาดความสูงของหัวดูดในขณะที่ขนาดของท่อดูดเท่าเดิม ย่อมไม่ส่งผลให้อัตราการดูดอากาศที่ถูกดูดเข้าสู่หัวดูดมีการเปลี่ยนแปลงนั่นคือ ที่อัตราการดูดคงที่ค่าหนึ่งการเปลี่ยนความสูงของหัวดูดไม่ส่งผลต่อการกระจายแรงดูด

3.2.3 ออกแบบความกว้างของหัวดูดอากาศ

เมื่อนำค่าความเร็วของอากาศที่ตำแหน่ง Z_1, Z_2, Z_3 และ Z_4 ตามแนวกึ่งกลางความสูงของหัวดูด ($Y=0.0855$ m) ของหัวดูดทั้ง 3 ขนาดมาเปรียบเทียบกันได้ผลดังแสดงในรูปที่ 14

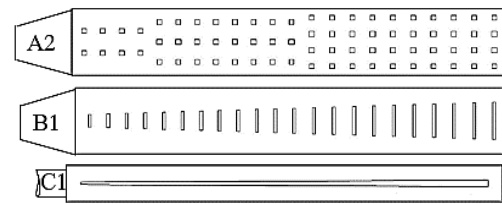
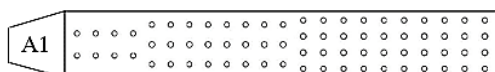


รูปที่ 14 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดทั้ง 3 ขนาดความกว้าง

จากรูปที่ 14 จะเห็นว่าหัวดูดทั้ง 3 ขนาดให้ลักษณะการกระจายความเร็วของอากาศใกล้เคียงกัน เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเปรียบเทียบขนาดความกว้างของหัวดูดในขณะที่ขนาดของท่อดูดเท่าเดิมย่อมไม่ส่งผลให้อัตราการดูดอากาศเข้าสู่หัวดูดเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการดูดคงที่การกระจายความเร็วของอากาศจึงไม่เปลี่ยนแปลงแม้จะเปลี่ยนความกว้างของหัวดูดก็ตาม

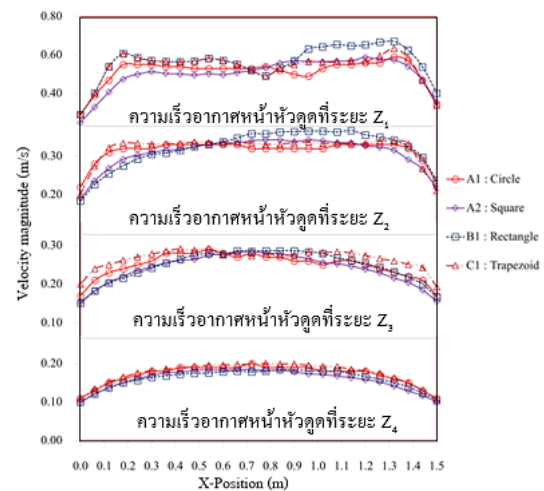
3.2.4 การออกแบบรูปทรงช่องทางเข้าของอากาศ

กำหนดให้พื้นที่ทางเข้ารวมของอากาศเท่ากับ 0.0198 m^2 ในทุกโมเดลปรับรูปทรงของช่องทางเข้าเป็น 3 รูปแบบคือรูปแบบ A เป็นการกระจายช่องทางเข้าแบบขั้นบันไดลักษณะช่องมี 2 แบบคือวงกลมและสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปแบบ B เป็นแบบรวมช่องเข้าด้วยกันเพื่อสร้างการกระจายของพื้นที่ช่องเจาะให้ต่อเนื่องมี 1 แบบคือสี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปแบบ C เป็นช่องแบบต่อเนื่องรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังแสดงในรูปที่ 15



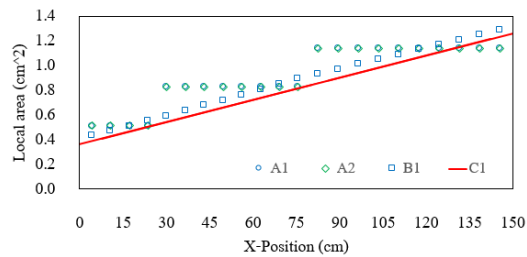
รูปที่ 15 (A1, A2)ช่องแบบกระจาย(B1)ช่องแบบรวม (C1)ช่องแบบต่อเนื่อง

เมื่อนำค่าความเร็วของอากาศที่ตำแหน่ง Z_1, Z_2, Z_3 และ Z_4 ตามแนวความสูงของหัวดูด ($Y=0.0855$ m) ของหัวดูดทั้ง 4 แบบมาเปรียบเทียบได้ผลดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศสำหรับช่องทางเข้าของอากาศ

จากรูปที่ 16 จะเห็นว่าเมื่อกำหนดพื้นที่ของช่องทางเข้าอากาศให้เท่าเดิมแต่เปลี่ยนรูปทรงของช่องทางเข้าการกระจายความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเปลี่ยนรูปทรงช่องทางเข้าของอากาศในขณะที่ขนาดของท่อดูดเท่าเดิมย่อมไม่ส่งผลให้อัตราการดูดเปลี่ยนแปลงการกระจายความเร็วของอากาศจึงไม่เปลี่ยนแปลงดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่ออัตราการดูดคงที่ค่าหนึ่งรูปทรงของช่องเจาะไม่ส่งผลต่อการกระจายแรงดูดเมื่อนำพื้นที่ช่องเจาะทั้ง 4 แบบมาแสดงผลเทียบกับระยะ X ได้ดังรูปที่ 17 จะเห็นว่าแบบ A1 และ A2 มีการกระจายแบบขั้นบันไดส่วนแบบ B1 เป็นการเจาะช่องแบบรวม และ C1 เป็นการเจาะแบบต่อเนื่องรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (ดูรูปที่ 15) ทุกรูปแบบให้ลักษณะการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เทียบกับระยะ X ที่คล้ายกัน ซึ่งพบว่าลักษณะการเจาะช่องทางเข้าที่มีแนวโน้มดังกล่าวจะทำให้การกระจายแรงดูดที่สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการเจาะช่องแบบ



C1 สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วเพราะใช้การเจาะเพียงครั้งเดียว

รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเจาะกับระยะ X

4.บทสรุป

1) งานวิจัยนี้ออกแบบหัวดูดโดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าผลการจำลองคอมพิวเตอร์สอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าการจำลองการไหลแบบราบเรียบมีความเหมาะสมในการใช้ออกแบบหัวดูด

2) เปรียบเทียบการกระจายแรงดูดพบว่าหัวดูดแบบเดิมให้การกระจายแรงดูดที่ไม่สม่ำเสมอส่วนหัวดูดที่ออกแบบโดยการจัดเรียงช่องเจาะใหม่ให้การกระจายแรงดูดอากาศที่สม่ำเสมอ

3) ที่อัตราการดูดคงที่ค่าหนึ่งการเปลี่ยนแปลงความสูงของหัวดูดไม่ส่งผลต่อการกระจายแรงดูด

4) ที่อัตราการดูดคงที่ค่าหนึ่งการเปลี่ยนแปลงความกว้างของหัวดูดไม่ส่งผลต่อการกระจายแรงดูด

5) ที่อัตราการดูดคงที่ค่าหนึ่งรูปทรงของช่องเจาะไม่ส่งผลต่อการกระจายแรงดูด

6) การกระจายความเร็วของอากาศจะสม่ำเสมอขึ้นเมื่อเจาะช่องให้มีพื้นที่เพิ่มขึ้นตามระยะ X

5.เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Thaphaniyangkul, Industrial Sector Codes of Practice for Pollution Prevention, Department of Industrial Works, BKK, 2005.
- [2] M. Petchmaneechote, Air Pollution Control System Guide Book, Enco Training, BKK, 2006.
- [3] S. Arnold, Industrial Ventilation Manual 22nd Edition, ACGIH Worldwide, WA, 1997.
- [4] S. Arnold, Industrial Ventilation Manual 23rd Edition, ACGIH Worldwide, WA, , 1998.

[5] H. J. McDermott, Handbook of Ventilation for Contaminant Control, ACGIH Worldwide, CA, 2001.

[6] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, Computational Fluid Dynamics, Longman Scientific & Technical, NY, 1995.

ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโตนดและแป้งมันสำปะหลัง ต่อสมบัติของแผ่นใยไม้อัดปลอดสารพิษ

Effect of Palmyra Fruit Fiber and Tapioca Starch Contents on Properties of Non-Toxic Fiberboard

ชาตรี หอมเขียว^{1*} วรพงศ์ บุญช่วยแทน¹ วรธนพร ชีววุฒิพงศ์¹

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ (Materials Processing Technology Research Unit)

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

บทคัดย่อ

การผลิตแผ่นใยไม้อัดโดยใช้เส้นใยผลตาลโตนดเป็นตัวเสริมแรงและแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานเป็นนวัตกรรมของการผลิตแผ่นใยไม้อัด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโตนดและปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัด ในการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดเป็นชิ้นงานตัวอย่างกระทำโดยใช้เครื่องอัดร้อนด้วยอุณหภูมิ 190 °C แรงดันอัด 13.8 MPa เป็นระยะเวลา 30 นาที ซึ่งจากการทดลองพบว่า การเติมเส้นใยผลตาลโตนดเป็นส่วนผสม 7 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงตึงจากกับผิวหน้า ค่าความแข็งแรงดัด และค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่การเติมเส้นใยผลตาลโตนดเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลงอย่างช้าๆ นอกจากนี้การเติมแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงตึงจากกับผิวหน้าและเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่เติมเป็นส่วนผสม

คำสำคัญ : แผ่นใยไม้อัด ไม้เยื่อไม้ยางพารา เส้นใยผลตาลโตนด แป้งมันสำปะหลัง การอัดร้อน

Abstract

Production of fiberboard using palmyra fruit fiber as reinforcement and tapioca starch as binder is an innovation of this product. Therefore, the objective of this research was to study the effect of palmyra fruit fiber and tapioca starch contents on mechanical and physical properties of fiberboard. The materials were manufactured into sample fiberboards using a hot compression machine with temperature 190 °C, pressure 13.8 MPa and time 30 min. According to the results, addition of palmyra fruit fiber 7% resulted in internal bond strength, modulus of rupture and modulus of elasticity increased clearly. However, the increasing additions of palmyra fruit fiber reduced water absorption slowly. Furthermore, an increase of tapioca starch contents in fiberboard resulted in internal bond strength and water absorption decreased; however, modulus of rupture and modulus of elasticity significantly increased with tapioca starch contents.

Keywords : fiberboard, rubberwood sawdust, palmyra fruit fiber, tapioca starch, hot compression

1. บทนำ

ทรัพยากรป่าไม้ของประเทศไทยในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมาปริมาณลดน้อยลงเป็นอย่างมาก ทำให้รัฐบาลได้ประกาศยกเลิกสัมปทานการทำไม้เมื่อปี พ.ศ. 2532 และมีการแก้ปัญหาโดยการนำเข้าไม้จากต่างประเทศ เพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมไม้และแผ่นไม้ประกอบ [1] อย่างไรก็ตามเพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนไม้อย่างยั่งยืน การวิจัยเกี่ยวกับวัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่นักวิจัยให้ความสนใจกันอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่าง การนำไม้หรือพืชโตเร็ว และวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรมาผลิตเป็นแผ่นปาร์ติเกิล (Particleboard) แผ่นใยไม้อัด ความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Fiberboard; MDF) และแผ่นไม้อัด (Plywood) เป็นต้น โดยนำวัสดุเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในงานเฟอร์นิเจอร์ งานตกแต่ง และงานก่อสร้าง เป็นต้น [1]

เช่นเดียวกันในการผลิตวัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติสามารถผลิตได้โดยการนำเอาวัสดุไม้หรือพืชโตเร็วมาย่อยให้เป็นเส้นใยแล้วนำมาผสมกับสารยึดติดหรือกาว จากนั้นนำมาอัดรวมกันให้เป็นแผ่นโดยใช้ความร้อนและแรงดันอัดที่สูง เพื่อให้ได้แผ่นใยไม้อัดที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น อย่างไรก็ตามแผ่นใยไม้อัดเหล่านี้มักใช้กาวที่มีส่วนผสมของสารฟอร์มาลดีไฮด์เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของเส้นใยไม้หรือพืชโตเร็ว ซึ่งทราบกันดีว่าสารฟอร์มาลดีไฮด์ คือ สารที่มีผลต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพของคน [2] หรือกล่าวได้ว่าเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นแนวโน้มของการวิจัย การผลิต และการตลาดในอนาคตจะเป็นการผลิตแผ่นใยไม้อัดที่ปราศจากสารฟอร์มาลดีไฮด์ [3] หรือแผ่นใยไม้อัดที่ปลอดสารพิษ

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นใยไม้อัดพบว่า ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแผ่นใยไม้อัด เช่น ทะลายปาล์ม น้ำมัน เปลือกทุเรียน เส้นใยมะพร้าว ต้นข้าวโพด แกลบ และเส้นใยยูคาลิปตัส เป็นต้น จากนั้นนำมาอัดร้อนโดยใช้กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เป็นตัวประสาน เช่นเดียวกัน Ali และคณะ [4] ใช้เส้นใยปอแก้วผลิตเป็นแผ่นใยไม้อัดและใช้กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์

และกาวฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เป็นตัวประสาน Paridah และคณะ [5] ใช้เส้นใยปอแก้วและขี้เลื่อยไม้ยางพาราผลิตเป็นแผ่นใยไม้อัด และใช้กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เป็นตัวประสาน ซึ่งยังไม่พบการนำขี้เลื่อยไม้ยางพาราและเส้นใยผลตาลโดนดมาผลิตเป็นแผ่นใยไม้อัดโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่ปลอดสารพิษและมีเป็นจำนวนมากในประเทศไทย

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นผู้วิจัยพบว่า ต้นตาลมีคุณสมบัติและประโยชน์ที่ดีหลายประการ แต่ยังมีปัญหาจากเศษเหลือทิ้งจำนวนมากในธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากชาวบ้านนำผลตาลโดนดไปใช้ประโยชน์เพื่อทำขนมตาล แล้วทิ้งส่วนของผลตาลโดนดเป็นจำนวนมาก โดยไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์และปล่อยให้เปื่อยยุ่ยไปเองตามธรรมชาติ จากสภาพปัจจุบันผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่าส่วนของเส้นใยจากผลตาลโดนดที่เหลือทิ้งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตแผ่นใยไม้อัดได้ เนื่องจากเส้นใยผลตาลโดนดเป็นวัสดุที่มีความเหนียว แข็งแรง และมีเซลลูโลสในปริมาณที่สูง ด้วยเหตุนี้การผลิตแผ่นใยไม้อัดโดยใช้เส้นใยผลตาลโดนดเป็นตัวเสริมแรง และใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานจึงเป็นนวัตกรรมใหม่ของการผลิตแผ่นใยไม้อัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนด ปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพารา และปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดปลอดสารพิษ ซึ่งผลจากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในทางวิชาการสำหรับผู้ที่สนใจนำเส้นใยผลตาลโดนดไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

เส้นใยผลตาลโดนด จัดหามาจากพื้นที่ใน อ.สทิงพระ จ.สงขลา แต่ก่อนนำไปใช้งานเส้นใยถูกย่อยลดขนาดให้มีขนาดสั้นกว่า 1 ซม. ขี้เลื่อยไม้ยางพารา ได้รับมาจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราในจังหวัดสงขลา เช่นเดียวกันก่อนนำไปใช้งานขี้เลื่อยถูกแยกขนาดโดยการร่อนให้ผ่านตะแกรงขนาด 12 เมช (mesh) และแป้งมันสำปะหลังชนิดพิเศษ ตราแมวแดงดาวเทียมลูกโลก จัดซื้อมาจาก หจก.เกรียงไกรค้าแป้ง

2.2 การขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานตัวอย่าง

นำส่วนผสมเส้นใยผลตาลโดนดและขี้เลื่อยไม้ยางพาราตามอัตราส่วนต่างๆ ที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 1 มาทำการผสมคลุกเคล้ากัน แล้วจึงนำน้ำแป้งมันสำปะหลังเทลงในถังผสมโดยใช้เวลาในการกวนผสมประมาณ 5 นาที จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดเทใส่ในกรอบไม้ (Wooden frame) และแม่พิมพ์ที่มีขนาดกว้าง 200 มม. × ยาว 250 มม.หนา 6 มม. ต่อจากนั้นอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดร้อนด้วยอุณหภูมิ 190 °C แรงดันอัด 13.8 MPa (2000 psi) เป็นระยะเวลา 30 นาที ซึ่งในแต่ละสูตรการทดลองขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานแบบสุ่ม 3 แผ่นตัวอย่าง

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมของแผ่นใยไม้อัดปลอดสารพิษ

Sample code	RWF (%)	PFF (%)	CSF (%)
R90P0C10	90.0	0.0	10.0
R82P7C10	82.4	7.6	10.0
R71P18C10	71.8	18.2	10.0
R58P30C12	58.0	30.0	12.0
R50P30C20	50.0	30.0	20.0

หมายเหตุ: ในแต่ละสูตรมีการผสมน้ำ 200 มิลลิลิตรต่อส่วนผสมทั้งหมด 265 กรัม; RWF คือ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา PFF คือ เส้นใยผลตาลโดนด และ CSF คือ แป้งมันสำปะหลัง

2.3 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bond Strength; IBS) และการทดสอบแรงดัด (Flexural testing) ในการทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าชิ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 50 มม. × ยาว 50 มม. × หนา 6 มม. ความเร็วที่ใช้ทดสอบดึงคือ 2 มม./นาที เช่นเดียวกันในการทดสอบแรงดัดเป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด (Three-point bending) ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 50 มม. × ยาว 200 มม. × หนา 6 มม. ระยะห่างระหว่างบารองรับชิ้นงานมีระยะ 150 มม. ความเร็วในการทดสอบดัดคือ 10 มม./นาที ในการทดสอบสมบัติทางกลกระทำโดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์รุ่น NRI-TS500-50 จาก บริษัท นรินทร์ อินสตรูเมนต์ จำกัด และปฏิบัติตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standard (JIS) A 5905 [6] ซึ่งทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25 °C และในแต่ละสมบัติทำการทดสอบซ้ำ 5 ชิ้นงานตัวอย่าง

2.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

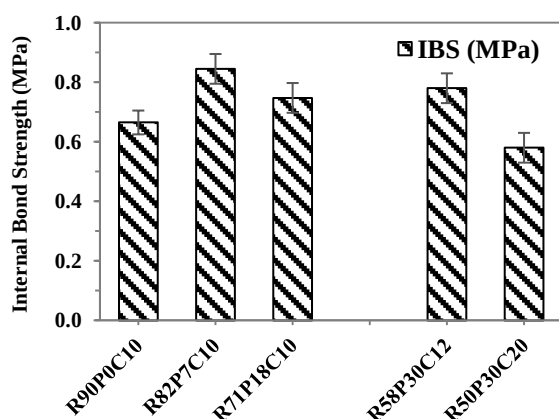
การทดสอบสมบัติทางกายภาพเป็นการทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) และการพองตัว (Thickness swelling) เมื่อแผ่นใยไม้อัดถูกแช่น้ำ ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 50 มม. × ยาว 50 มม. × หนา 6 มม. โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน JIS A 5905 [6] อย่างไรก็ตามก่อนการทดสอบชิ้นงานถูกอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดขนาดความหนาและชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนการทดสอบทันทีด้วยเวอร์เนียร์ดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.01 มม. และเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียด 0.01 กรัม ต่อจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปแช่น้ำในน้ำที่เปลี่ยนใหม่ทุกๆ 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดชิ้นงานถูกหยิบขึ้นจากน้ำและถูกซับด้วยกระดาษซับน้ำ สุดท้ายนำชิ้นงานวัดขนาดความหนาและชั่งน้ำหนักทันทีเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักหรือเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และเปอร์เซ็นต์การพองตัว ในการทดสอบกระทำซ้ำ 5 ชิ้นงานตัวอย่าง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลกระทบของส่วนผสมต่อสมบัติการดึง

ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดและปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นใยไม้อัดถูกแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นใยไม้อัดที่มีส่วนผสมของเส้นใยผลตาลโดนด 7 เปอร์เซ็นต์ และ 18 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าแผ่นใยไม้อัดที่ไม่เติมเส้นใยเป็นส่วนผสม 26.86 เปอร์เซ็นต์ และ 11.94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สิ่งนี้เกิดจากการเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสมช่วยเสริมแรงให้แก่แผ่นใยไม้อัดสามารถต้านทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นใยไม้อัดที่เติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสม 7 เปอร์เซ็นต์ และ 18 เปอร์เซ็นต์ พบว่าแผ่นใยไม้อัดที่มีส่วนผสมของเส้นใยผลตาลโดนดสูงกว่า มีค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าที่ต่ำกว่า สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า เมื่อมีการเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสมที่มากเกินไป ภายในโครงสร้างของแผ่นใยไม้อัดจะมีรูพรุนหรือมีช่องว่างระหว่างเฟสของเส้นใยกับขี้เลื่อยไม้ และระหว่างเฟสของเส้นใยกับเส้นใย

เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายทอดแรงระหว่างเฟสภายในโครงสร้างของแผ่นใยไม้อัดลดลง ทำให้ความสามารถต้านทานต่อแรงดึงลดลง นอกจากนี้ผลการทดสอบเหล่านี้ยังมีการยืนยันผลโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า ปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดมีผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เช่นเดียวกันเมื่อวิเคราะห์โดยใช้ Tukey's test พบว่า แผ่นใยไม้อัดที่ไม่เติมเส้นใยเป็นส่วนผสม (ตัวอักษร *a*) มีความแข็งแรงดึงต่ำกว่าแผ่นใยไม้อัดที่เติมเส้นใย 7 เปอร์เซ็นต์ (ตัวอักษร *b*) และ 18 เปอร์เซ็นต์ (ตัวอักษร *b*) อย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) แต่การเติมเส้นใยเพิ่มจาก 7 เปอร์เซ็นต์ เป็น 18 เปอร์เซ็นต์ มีผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)



รูปที่ 1 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดและแป้งมันสำปะหลังต่อความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าโดยใช้ Student's t-test พบว่าการเติมแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นจาก 12 เปอร์เซ็นต์ (ตัวอักษร *D*) เป็น 20

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัด

Properties	R90P0C10	R82P7C10	R71P18C10	P-value		R58P30C12	R50P30C20	P-value
IBS (MPa)	0.67 <i>a</i>	0.85 <i>b</i>	0.75 <i>b</i>	0.031 *		0.78 <i>D</i>	0.58 <i>E</i>	0.015 *
MOR (MPa)	6.72	7.14	6.07	0.530		9.72 <i>D</i>	11.54 <i>E</i>	0.039 *
MOE (GPa)	1.07 <i>a</i>	1.26 <i>b</i>	0.85 <i>c</i>	0.022 *		1.00 <i>D</i>	1.40 <i>E</i>	0.028 *
WA (%)	112.46	107.92	105.74	0.224		104.49 <i>D</i>	91.71 <i>E</i>	0.041 *
TS (%)	24.79	23.51	22.08	0.798		32.54 <i>D</i>	28.71 <i>D</i>	0.184

เปอร์เซ็นต์ (ตัวอักษร *E*) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เนื่องจากการเกิดแนวแตกร้าวบริเวณชั้นแกนกลาง (Core layer) ของแผ่นใยไม้อัดในสูตรที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมมากกว่า ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากในรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าในสูตรที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสม 12 เปอร์เซ็นต์ บริเวณชั้นแกนกลางของแผ่นใยไม้อัดมีการประสานกันแบบแนบชิดสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของแผ่นใยไม้อัด แต่ในแผ่นใยไม้อัดที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสม 20 เปอร์เซ็นต์ เกิดแนวแตกร้าวขึ้นบริเวณชั้นแกนกลางตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัด สิ่งนี้เกิดจากแป้งมันสำปะหลังไม่เกิดการสุก (Curing) บริเวณชั้นแกนกลางของแผ่นใยไม้อัด ทำให้เกิดเป็นแนวแตกร้าวขึ้น ในความเป็นจริงเมื่อแป้งมันสำปะหลังถูกใช้เป็นส่วนผสมมากขึ้น การสุกของส่วนผสมนั้นต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น และเหตุผลที่บริเวณชั้นแกนกลางเกิดการไม่สุกแต่บริเวณขอบนอกเกิดการสุกของแป้งมันสำปะหลังนั้น พฤติกรรมนี้เกิดขึ้นจากการถ่ายเทความร้อน ที่ในการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดเป็นการถ่ายเทความร้อนจากฮีตเตอร์ไปยังแม่พิมพ์ และจากแม่พิมพ์ถ่ายเทไปยังส่วนผสมของแผ่นใยไม้อัด ทำให้บริเวณขอบนอกสุดทั้งสองด้านของแผ่นใยไม้อัดจะได้รับความร้อนสูงสุด และบริเวณชั้นแกนกลางจะได้รับความร้อนต่ำสุด [7] ส่งผลให้ความสามารถการสุกของแป้งมันสำปะหลังลดลงที่บริเวณชั้นแกนกลาง เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติของแผ่นใยไม้อัดดังแสดงในรูปที่ 3 เห็นได้ว่าการวิบัติหรือการขาดออกจากกันของแผ่นใยไม้อัด เกิดขึ้นที่บริเวณชั้นแกนกลางของแผ่นใยไม้อัด ซึ่งเป็นบริเวณที่แข็งแรงน้อยสุดของแผ่นใยไม้อัดที่มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลัง 20 เปอร์เซ็นต์

หมายเหตุ: ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดและแป้งมันสำปะหลังมีนัยสำคัญเมื่อ $P < 0.05$ และในแต่ละสมบัติหากมีตัวอักษรเหมือนกันหมายถึง มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$) (ตัวอักษร a-c และ D-E สำหรับผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนด และปริมาณแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ



รูปที่ 2 การยึดเกาะบริเวณชั้นแกนกลางของแผ่นใยไม้อัดที่มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลัง (ก) 12 เปอร์เซ็นต์ และ (ข) 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3 ลักษณะการวิบัติของแผ่นใยไม้อัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยผลตาลโดนดหลังจากทดสอบการดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

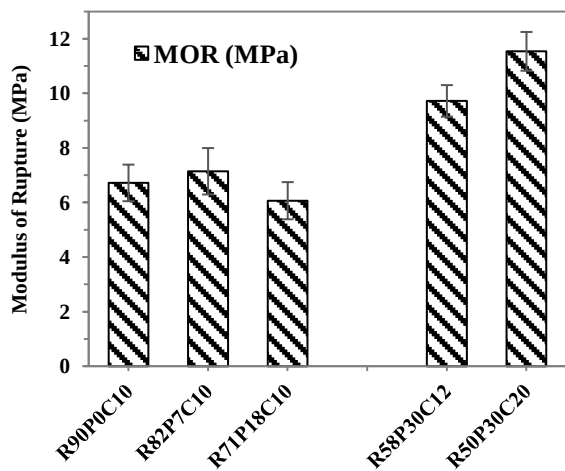
3.2 ผลกระทบของส่วนผสมต่อสมบัติการตัด

สมบัติการตัดคือ สมบัติที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการตัดสินใจประยุกต์ใช้งานแผ่นใยไม้อัด เพราะการประยุกต์ใช้งานของแผ่นใยไม้อัดส่วนใหญ่จะเป็นการใช้ในลักษณะของการรับแรงดัด ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดและแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความแข็งแรงดัด (Modulus of Rupture; MOR) และค่ามอดูลัสการดัด (Modulus of Elasticity; MOE) ของแผ่นใยไม้อัดถูกแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ ทั้งค่าความแข็งแรงดัดและค่า

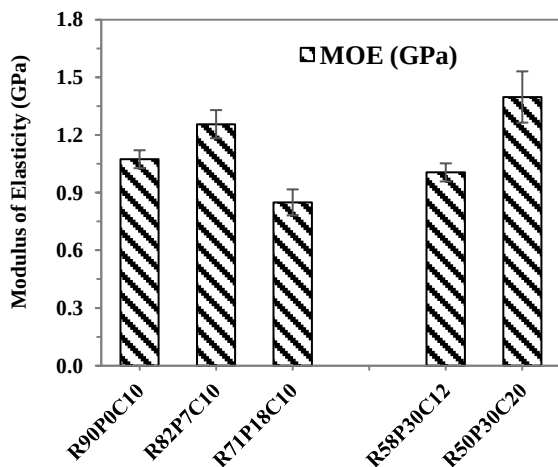
มอดูลัสการดัดมีพฤติกรรมที่คล้ายกันคือ เมื่อเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสม 7 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ทั้งค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้น 6.25 เปอร์เซ็นต์ และ 17.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยที่เติมเป็นส่วนผสมช่วยเสริมแรงให้แก่แผ่นใยไม้อัดสามารถต้านทานต่อแรงดัดได้มากขึ้น เพราะเส้นใยที่เติมเข้าไปจะเข้าไปทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานที่ช่วยถ่ายทอดแรงระหว่างเฟสของซีเมนต์ในโครงสร้างของแผ่นใยไม้อัด แต่เมื่อเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสม 18 เปอร์เซ็นต์ พบว่าแผ่นใยไม้อัดมีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดต่ำกว่าแผ่นใยไม้อัดที่ไม่เติมเส้นใยผลตาลโดนด 9.67 เปอร์เซ็นต์ และ 20.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พฤติกรรมนี้สามารถให้เหตุผลได้เช่นเดียวกับสมบัติการดึงที่ว่า การเติมเส้นใยเป็นส่วนผสมมากเกินไป ส่งผลให้ภายในโครงสร้างของแผ่นใยไม้อัดมีรูพรุนหรือมีช่องว่างระหว่างเฟสของส่วนผสมคือ ซีเมนต์ ทราย พาราและเส้นใยผลตาลโดนดมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถการถ่ายทอดแรงระหว่างเฟสภายในโครงสร้างลดลง ทำให้แผ่นใยไม้อัดมีความสามารถต้านทานต่อแรงดัดได้น้อยลง

อย่างไรก็ตามการเติมเส้นใยเป็นส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นยังส่งผลให้แผ่นใยไม้อัดมีความสามารถในการยืดตัว (Elongation) เพิ่มมากขึ้นเมื่อรับแรงดัด และเมื่อแผ่นใยไม้อัดเกิดการวิบัติ (Failure) แผ่นใยไม้อัดจะไม่เกิดการแยกขาดออกจากกันอย่างสิ้นเชิง ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากรูปที่ 6 ที่แสดงลักษณะการวิบัติของแผ่นใยไม้อัดที่เสริมแรงและไม่เสริมแรงด้วยเส้นใยผลตาลโดนดหลังจากทดสอบการดัด เห็นได้ว่าแผ่นใยไม้อัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยถึงแม้จะมีการวิบัติแล้ว แต่แผ่นใยไม้อัดจะยังไม่ขาดออกจากกันอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากความสามารถของเส้นใยที่เปรียบเสมือนเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างเฟสของซีเมนต์ในโครงสร้างแผ่นใยไม้อัดไม่ให้ขาดออกจากกัน แต่ทว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นใยไม้อัดที่ไม่เสริมแรงด้วยเส้นใย เห็นได้ว่าเมื่อแผ่นใยไม้อัดเกิดการวิบัติขึ้น แผ่นใยไม้อัดจะขาดออกจากกันอย่างสิ้นเชิงในทันที ดังนั้นในการประยุกต์ใช้

งานจริงแผ่นใยไม้อัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยจะมีความปลอดภัยมากกว่าแผ่นใยไม้อัดที่ไม่เสริมแรงด้วยเส้นใย เพราะถึงแม้แผ่นใยไม้อัดจะรับแรงจนเกิดการวิบัติ แต่ด้วยความสามารถของเส้นใยที่เติมเข้าไป จะช่วยชะลอการขาดออกจากกันอย่างสิ้นเชิงของแผ่นใยไม้อัดไว้ได้อีกระยะหนึ่ง ก่อนที่ความเสียหายจะเกิดขึ้น



รูปที่ 4 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดและแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความแข็งแรงดัด



รูปที่ 5 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดและแป้งมันสำปะหลังต่อค่ามอดูลัสการดัด

เช่นเดียวกันเมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัด พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสม ส่งผลให้ทั้งค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 18.72 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากการประสานและการยึดเกาะระหว่างเฟสของส่วนผสมคือ ชี

เลื้อยไม้และเส้นใยเกิดขึ้นได้ดีและแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้การถ่ายทอดแรงระหว่างเฟสภายในโครงสร้างของแผ่นใยไม้อัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้แผ่นใยไม้อัดสามารถต้านทานต่อแรงดัดได้มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับสมบัติการดัด พบว่าแผ่นใยไม้อัดให้ผลที่ตรงกันข้ามกับสมบัติการดัด สิ่งนี้เป็นเพราะเมื่อแผ่นใยไม้อัดรับแรงดัด จุดที่รับแรงสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณขอบนอกสุดของแผ่นใยไม้อัด แต่ทว่าเมื่อแผ่นใยไม้อัดรับแรงดัด จุดที่แผ่นใยไม้อัดขาดออกจากกันจะเป็นบริเวณที่มีความแข็งแรงหรือต้านทานต่อแรงดัดได้น้อยที่สุด [7] นั่นคือบริเวณชั้นแกนกลางของแผ่นใยไม้อัด ซึ่งเป็นไปตามเหตุผลที่ได้อธิบายในสมบัติการดัดที่ว่า บริเวณชั้นแกนกลางเกิดการไม่สุกของแป้งมันสำปะหลัง แต่บริเวณขอบนอกเกิดการสุกของแป้งมันสำปะหลัง ทำให้บริเวณขอบนอกของแผ่นใยไม้อัดมีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณชั้นแกนกลาง เพราะการประสานและการยึดเกาะระหว่างเฟสของส่วนผสมที่แข็งแรงกว่าเกิดขึ้นบริเวณขอบนอกของแผ่นใยไม้อัด ดังนั้นการเติมแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมมากขึ้น ส่งผลให้แผ่นใยไม้อัดมีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ลักษณะการวิบัติของแผ่นใยไม้อัด (ก) ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยผลตาลโดนด และ (ข) ที่ไม่เสริมแรงด้วยเส้นใยผลตาลโดนด หลังจากทดสอบการดัด

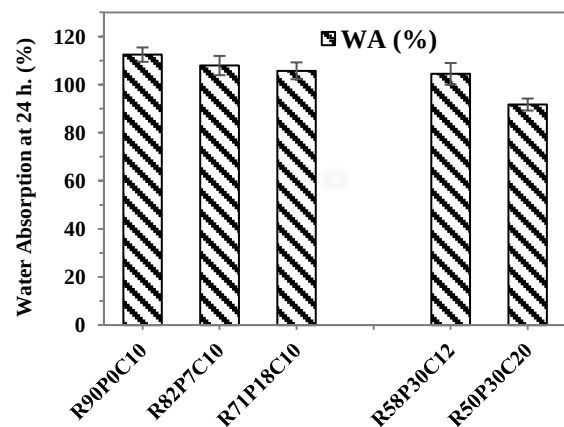
3.3 ผลกระทบของส่วนผสมต่อสมบัติการดูดซับน้ำ

สมบัติการดูดซับน้ำ (Water absorption) และการพองตัว (Thickness swelling) เมื่อแช่น้ำของแผ่นใยไม้อัด เป็นอีกสมบัติที่จำเป็นต้องทำการวัดหรือทดสอบเมื่อมีการพัฒนาแผ่นใยไม้อัด เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าแผ่นใยไม้อัดถูกผลิตมาจากวัสดุธรรมชาติที่มีเซลลูโลสเป็น

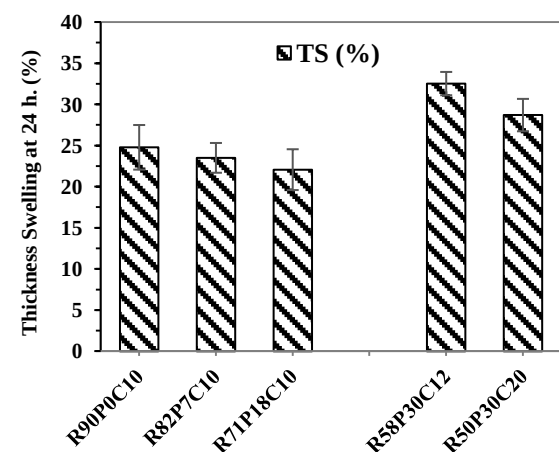
องค์ประกอบหลัก และเซลลูโลสเป็นสารที่ชอบดูดซับน้ำ (Hydrophilic) [8, 9] ทำให้เมื่อแผ่นใยไม้อัดถูกแช่น้ำจะมีการดูดซับน้ำและการพองตัวในอัตราที่สูง จากการทดสอบการแช่น้ำของแผ่นใยไม้อัดเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง สามารถแสดงผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและการพองตัวของแผ่นใยไม้อัดได้ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและการพองตัวมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ตามปริมาณเส้นใยที่เดิมเป็นส่วนผสม ยกตัวอย่าง เมื่อเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสม 7 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและการพองตัวลดลง 4.03 เปอร์เซ็นต์ และ 5.16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เช่นเดียวกันเมื่อเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสม 18 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและการพองตัวลดลง 5.97 เปอร์เซ็นต์ และ 10.93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า เส้นใยผลตาลโดนดจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยกว่าซีลื้อใยไม้อย่างพารา เนื่องจากหากพิจารณาจากผิวของเส้นใย เส้นใยจะมีลักษณะผิวเรียบและมัน แต่ซีลื้อใยไม้อย่างพาราจะมีผิวขรุขระและมีรูพรุน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่า การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างของซีลื้อใยไม้ง่ายและรวดเร็วกว่าเข้าสู่โครงสร้างของเส้นใย และอีกหนึ่งเหตุผลสามารถอธิบายได้ว่า เส้นใยผลตาลโดนดมีความหนาแน่น (Density) ต่ำกว่าซีลื้อใยไม้อย่างพารานั้นหมายความว่า ในการขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัดสูตรที่มีเส้นใยเป็นส่วนผสมจะมีปริมาตรของแผ่นใยไม้อัดก่อนการอัดมากกว่าสูตรที่ไม่เติมเส้นใย และเมื่อส่วนผสมถูกอัดให้มีความหนาแน่นเท่ากันทุกสูตร สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ในสูตรที่มีส่วนผสมของเส้นใยเพิ่มขึ้น การอัดแน่นระหว่างเฟสของส่วนผสมจะมากขึ้น ทำให้การแทรกซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้างแผ่นใยไม้อัดที่มีส่วนผสมของเส้นใยมากขึ้น เป็นไปได้ยากขึ้น ดังนั้นเมื่อเติมเส้นใยเป็นส่วนผสมในแผ่นใยไม้อัดเพิ่มขึ้น การดูดซับน้ำและการพองตัวของแผ่นใยไม้อัดจึงมีค่าลดลง

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและการพองตัว พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมในแผ่น

ใยไม้อัด ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญแต่การพองตัวลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่าลดลง 12.23 เปอร์เซ็นต์ และ 11.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังสามารถเพิ่มการประสานภายในโครงสร้างของแผ่นใยไม้อัด โดยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเฟสของส่วนผสม (ซีลื้อใยไม้อัดและเส้นใย) ของแผ่นใยไม้อัด ดังนั้นเมื่อแป้งมันสำปะหลังสามารถประสานหรือเคลือบผิวของเส้นใยธรรมชาติได้ทั่วถึงมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการดูดซับน้ำของแผ่นใยไม้อัดลดลง



รูปที่ 7 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดและแป้งมันสำปะหลังต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ



รูปที่ 8 ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดและแป้งมันสำปะหลังต่อเปอร์เซ็นต์การพองตัว

นอกจากนี้เมื่อสังเกตพฤติกรรมการดูดซับน้ำและการพองตัว จะเห็นได้ว่ามีพฤติกรรมที่สอดคล้องกัน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าอัตราการพองตัวจะมีความผันแปรโดยตรงตามอัตราการดูดซับน้ำ เมื่อซีลื้อใยไม้อัดหรือเส้นใยธรรมชาติดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น วัสดุเหล่านี้จะเกิดการบวมหรือพองตัว

เพิ่มขึ้นเช่นกันตามปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้าง อย่างไรก็ตามเมื่อถึงจุดที่ขี้เลื่อยไม้หรือเส้นใยธรรมชาติดูดซับน้ำจนอิ่มตัว (Saturation) วัสดุเหล่านี้จะไม่ดูดซับน้ำและพองตัวเพิ่มขึ้นอีก ยกตัวอย่างในงานวิจัยของ Adhikary และคณะ [10] ที่พบว่า การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกที่เสริมแรงด้วยขี้เลื่อยไม้ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ มีการดูดซับน้ำและการพองตัวจนอิ่มตัว เมื่อถูกแช่น้ำเป็นระยะเวลา 9 สัปดาห์

4. สรุป

ผลกระทบของปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดและปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดถูกศึกษา ซึ่งพบว่าแผ่นใยไม้อัดมีการเปลี่ยนแปลงในสมบัติทางกลและทางกายภาพ เนื่องจากปริมาณของเส้นใยผลตาลโดนดและแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งแผ่นใยไม้อัดมีค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ค่าความแข็งแรงดัด และค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสม 7 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเส้นใยที่เติมเป็นส่วนผสมช่วยเสริมแรงให้แก่แผ่นใยไม้อัดสามารถต้านทานต่อแรงดึงและดัดได้มากขึ้น แต่ทว่าเมื่อเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสม 18 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ค่าความแข็งแรงดัด และค่ามอดูลัสการดัดลดลง เช่นเดียวกับการเติมเส้นใยผลตาลโดนดเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและการพองตัวลดลงอย่างช้าๆ นอกจากนี้การเติมแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และเปอร์เซ็นต์การพองตัวลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้น เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังทำให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคขี้เลื่อยไม้และเส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้น ข้อเสนอแนะ การเติมแป้งมันสำปะหลังในปริมาณที่มากเกินไป ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังเกิดการไม่สุก (Curing) บริเวณชั้นแกนกลางของแผ่นใยไม้อัด ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแผ่นใยไม้อัด นอกจากนี้สูตรที่มีส่วนผสมของขี้เลื่อยไม้ยางพารา 50% เส้นใยผลตาลโดนด 30% และแป้งมันสำปะหลัง 20% เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดที่สูง และ

เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ต่ำ เพราะการประยุกต์ใช้งานของแผ่นใยไม้อัดส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาวะของการรับแรงดัดและสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก งบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปี 2559 และขอขอบคุณนางสาววิชุดา แก้วคง และนางสาวนิติญา หอยสกุล สำหรับความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Buachongkon and N. Laemsak, "Properties of Medium Density Fiberboard Made from Dendrocalamus Hamiltonii and Dendrocalamus Latiflorus with Various Age Classes," Thai Journal of Forestry, Vol. 26, pp. 83-89, 2007.
- [2] R. Hashim, N. Said, J. Lamaming, M. Baskaran, O. Sulaiman, M. Sato, et al., "Influence of Press Temperature on the Properties of Binderless Particleboard Made from Oil Palm Trunk," Materials and Design, Vol. 32, pp. 2520-2525, 2011.
- [3] R. Hashim, S. Hamid, O. Sulaiman, N. Ismail, M. Ibrahim, and H. Jais, "Extractable Formaldehyde from Waste Medium Density Fibreboard," Journal of Tropical Forest Science, Vol. 21, pp. 25-33, 2009.
- [4] I. Ali, K. Jayaraman, and D. Bhattacharyya, "Effects of Resin and Moisture Content on the Properties of Medium Density Fibreboards made from Kenaf Bast Fibres," Industrial Crops and Products, Vol. 52, pp. 191-198, 2014.
- [5] M.T. Paridah, A.H. Juliana, Y.A. El-Shekeil, M. Jawaid, and O.Y. Alothman, "Measurement of Mechanical and Physical Properties of Particleboard by Hybridization of Kenaf with Rubberwood Particles," Measurement, Vol. 56, pp. 70-80, 2014.
- [6] Japanese Industrial Standard (JIS) A 5905, Fibreboards, 2003.
- [7] C. Homkhiew, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, "Influence of Wood Species and Thickness Sizes on Mechanical and Physical Properties of Binderless Particleboard," Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 33, pp.18-23, 2016.
- [8] H. Bouafif, A. Koubaa, P. Perre and A. Cloutier, "Effects of Fiber Characteristics on the Physical and Mechanical Properties of Wood Plastic Composites," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 40, pp. 1975-1981, 2009.
- [9] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, "Effect of Temperatures and Water Types on Water Absorption of Rubberwood Flour-Polypropylene Composites," Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 32, pp. 49-54, 2015.
- [10] K.B. Adhikary, S. Pang and M.P. Staiger, "Long-Term Moisture Absorption and Thickness Swelling Behaviour of Recycled Thermoplastics Reinforced with Pinus Radiata Sawdust," Chemical Engineering Journal, Vol. 142, 190-198, 2008.

การเลือกรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์เพื่อลดต้นทุนการซ่อมบำรุง รถบรรทุก; กรณีศึกษาการรถบรรทุกสินค้าเกษตร

Economics Model Selection for Truck Maintenance Costs Reduction; Agricultural Truck Case Study

ชาญชัย เหลาฮา¹* ศิขรินทร์ สุขโต²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองเตย

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

E-mail: claoha27@yahoo.com*

บทคัดย่อ

ต้นทุนการซ่อมบำรุงที่มีมูลค่าสูงย่อมส่งผลกระทบต่อต้นทุนรวมของการขนส่ง ดังนั้นวัตถุประสงค์การวิจัยเพื่อกำหนดและตัดสินใจเลือกรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์การลดต้นทุนการซ่อมบำรุงรถบรรทุก กลุ่มตัวอย่างกรณีศึกษามาจากรถบรรทุกสินค้าเกษตรจำนวน 284 คัน วิธีการวิจัยดำเนินการตามขั้นตอนของ Deming cycle: PDCA model ซึ่งเป็นเครื่องมือปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยเริ่มต้นด้วย Check – Action – Plan – Do ขั้นตอน Check ปัจจุบันพบว่ามีค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงเฉลี่ย 9.20 บาท ซึ่งกำหนดเป้าหมายไว้ที่ 7.54 บาท ต่อมาขั้นตอน Action ได้นำช่องว่างที่เกิดระหว่างเป้าหมายและการดำเนินการมาวิเคราะห์ SWOT เพื่อวางแผนระยะสั้นและระยะยาว จากนั้นนำผลจากการวิเคราะห์ SWOT กำหนดรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์ 3 รูปแบบในขั้นตอน Plan คือ (1) กรณีซื้อรถบรรทุกใหม่ทดแทน (2) กรณีสร้างอู่ซ่อมภายใน และ (3) กรณีจ้างรถบรรทุกร่วมสัดส่วน 20:80 ผลการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบทางเศรษฐศาสตร์ที่ 2 NPV มีค่ามากกว่ารูปแบบทางเศรษฐศาสตร์ที่ 3 และ 1 ดังนั้นขั้นตอน Do จึงสรุปได้ว่าเลือกรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์ที่ 2 เนื่องจากการสร้างอู่ซ่อมบำรุงเองจะมีกำไร 7,894,991.32 บาท

คำสำคัญ : PDCA model, SWOT analysis, Payback period, Net present value method, Internal rate of return method.

Abstract

Maintenance costs are high then impact to the total cost of transportation. Thus, the objective of the study was to define and decide the economic model of trucks maintenance cost reduction. A sample of this case study was from 284 agricultural trucks. Research methodology follows the Deming cycle: PDCA model that is a tool to improve productivity. This research started by Check - Action - Plan - Do. The first checking step was defined the maintenance cost by 9.20 baht, but the management set the target by 7.54 baht. Therefore, in the action phase found the gap between the target and current situation and then SWOT analysis was to plan a short term and long term plan. The next, definition of three economic model were (1) replacement with new trucks (2) in-house maintenance and (3) outsource with the ratio of 20:80. The result of analysis illustrate that NPV of model 2 was better than model 3 and 1. Finally was selected in Do phase model 2 that could make profit by 7,894,991.32 baht.

Key words : PDCA model, SWOT analysis, Payback period, Net present value method, Internal rate of return method.

1. บทนำ

รถบรรทุกถูกใช้งานมาเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดต้นทุนในการซ่อมบำรุงที่เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลา ต้นทุนการซ่อมบำรุงจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนรวมค่าขนส่ง ต้นทุนรวมของผู้ประกอบการขนส่งจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่ระบบการจัดการซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญ การจัดการที่ไม่เป็นระบบยังก่อให้เกิดปัญหาการท่วมนงบประมาณกับสิ่งที่ไม่จำเป็น ซึ่งจะสังเกตได้ว่างบประมาณส่วนใหญ่ถูกใช้ไปกับการซ่อมรถที่ไม่สร้างรายได้ เช่นการซ่อมที่เกิดจากอุบัติเหตุพลิกคว่ำรถบรรทุกถูกชน หรือตกเหวลึก ซึ่งหากนำรถบรรทุกดังกล่าวกลับมาใช้งานอีกก็ไม่สามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

การบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง (Corrective Maintenance) เป็นกิจกรรมเพื่อการดัดแปลง ปรับปรุงแก้ไขสภาพรถบรรทุกที่เกิดอุบัติเหตุ ขจัดเหตุขัดข้อง เรือร้งของรถบรรทุกให้หมดไปโดยสิ้นเชิง ซึ่งที่ผ่านมาบริษัทนำรถบรรทุกส่วนหนึ่งไปซ่อมกับอู่เอกชน หลายครั้งพบว่ารถซ่อมบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุงขาดการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ และขาดการบันทึกข้อมูลวิธีการทางสถิติ หากต้องการนำข้อมูลมาใช้เพื่อวิเคราะห์ปัญหาในเชิงลึก ยังไม่สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากมีหลายปัจจัย[1] ส่วนการ

บำรุงรักษาที่ทำการประจำ Preventive Maintenance กำหนดไว้แล้วเมื่อครบกำหนดเพื่อป้องกันและลดสภาพการเสื่อมสภาพของรถบรรทุก หลีกเลี่ยงการเกิดการขัดข้อง ดังนั้นระบบการจัดการการบำรุงรักษาเป็นสิ่งจำเป็นและเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญต่อการป้องกันและแก้ปัญหาการซ่อมบำรุง [2] งบประมาณการซ่อมบำรุงส่วนใหญ่ในอดีตมีรูปแบบการบำรุงรักษาไม่ได้แยกส่วนค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงสำหรับรถบรรทุกที่ไม่เกิดมูลค่าจะต้องนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน

ความไม่แน่นอนของปริมาณวัตถุดิบและรถบรรทุกส่งผลกระทบต่อการบริหารจัดการการขนส่ง หลายครั้งจำเป็นต้องจ้างรถบรรทุกจากเอกชนเข้าร่วม เพื่อทดแทนรถบรรทุกที่เข้าอู่ซ่อมระยะยาว หรือเกิดปัญหากะทันหัน และนอกจากนี้รถบรรทุกส่วนใหญ่มิจะมีงานประจำ หากไม่ทำสัญญาระยะยาวอาจไม่มีผู้เข้าร่วม ความไม่แน่นอนว่าจะมีงานให้ผู้เข้าร่วมวิ่งและงานนั้นๆ คุ่มค่าหรือไม่

การลงทุนงบประมาณจำนวนมากเกี่ยวกับการซ่อมบำรุงเป็นการตัดสินใจที่สำคัญและต้องมีเหตุผลที่เหมาะสม ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากได้นำวิธีการต่างๆ กำหนดเป็นตัวชี้วัดในการตัดสินใจ ซึ่งส่วนใหญ่กำหนด 3 ตัวชี้วัดคือ Payback period method (PB), The

net present value method (NPV), และ The internal rate of return method (IRR) [3-6] ตัวชี้วัดดังกล่าวเป็นการตัดสินใจที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการทำกำไรของบริษัท ซึ่งการตัดสินใจต้องพิจารณาพร้อมกับวิธีการตัดสินใจอื่นๆ เช่น risk management [7-8] หรือ Analytic Network Process (ANP) [9] แต่ในกรณีที่จำเป็นต้องเลือกโครงการใดเพียงโครงการเดียววิธี NPV จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีอื่น และหากมีโครงการที่เป็นอิสระต่อกันวิธี IRR จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมาก เพราะเกณฑ์ของการพิจารณาโครงการจะบ่งบอกถึงว่าบริษัทสามารถทำกำไรมากน้อยเพียงใด [5]

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อกำหนดและตัดสินใจเลือกรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์การลดต้นทุนการซ่อมบำรุงรถบรรทุก

3. วิธีการวิจัย

วิธีการวิจัยดำเนินการตามขั้นตอนของ Deming cycle: PDCA model ซึ่งเป็นเครื่องมือปรับปรุงประสิทธิภาพ แต่งานวิจัยเริ่มต้นด้วย Check – Action – Plan – Do ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

Check คือการตรวจสอบเป้าหมายกับการดำเนินการในปัจจุบัน ซึ่งบริษัทได้มีการสำรวจต้นทุนการซ่อมบำรุงรถบรรทุกในพื้นที่เดียวกันก่อนหน้านี้

Action คือการนำช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเป้าหมายกับการดำเนินการมาวิเคราะห์ SWOT การวิเคราะห์ SWOT เป็นวิธีการที่ช่วยให้การกำหนดกลยุทธ์และยังเชื่อมโยงไปยังทรัพยากรต่างๆ ผลงานที่ดีภายในบริษัท เป็นผลมาจากความสัมพันธ์ที่ถูกต้องของระบบการจัดการ การรับรู้จุดแข็งและจุดอ่อนภายในเช่นเดียวกับโอกาสภายนอกและภัยคุกคามที่เกิดขึ้น [10-11]

Plan คือการกำหนดรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์ 3 รูปแบบ โดยมีตัวชี้วัด PB, NPV, และ IRR ช่วยในการตัดสินใจ [7-12]

Do คือการตัดสินใจเลือกรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์

4. ผลการดำเนินการ

บริษัทกรมศึกษาให้บริการขนส่งอ้อยและน้ำตาลในจังหวัดหนองบัวลำภู บริษัทมีการขยายตัวทางด้านขนส่งแบบถาวรกระโดด เมื่อปี 2555 บริษัทมีรถบรรทุก 17 คัน ต้นปี 2556 บริษัทมีรถบรรทุกเพิ่มเป็น 284 คัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องปรับแผนงานให้เหมาะสม [13] เพื่อสร้างโอกาสความได้เปรียบเชิงการแข่งขัน

4.1 Check

จากการเก็บข้อมูลการซ่อมบำรุงรถบรรทุกพบว่า ต้นทุนในการซ่อมบำรุงมีมูลค่าสูงถึง 42,915,547 บาท เนื่องจากรถบรรทุกมีการใช้งานมาเป็นเวลานาน ดังนั้นต้องจัดแบ่งกลุ่มรถบรรทุกเพื่อหาแนวทางการจัดการซ่อมบำรุงในแต่ละกลุ่มรถบรรทุก ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การแยกประเภทของรถบรรทุก

ลำดับ	กลุ่ม	หลักเกณฑ์	ระยะทาง	จำนวน/คัน	อายุใช้งานเฉลี่ย/ปี
1	A	11-15 ปี	> 1,000,000 กม.	130	14
2	B	1-5 ปี	0 - 500,000 กม.	115	3
3	C	> 15 ปีขึ้นไป	ไม่สามารถวิ่งได้	29	20
4	D	5-8 ปี	500,001 - 800,000 กม.	10	6
รวม				284	

จากตารางที่ 1 กลุ่ม A มีปริมาณรถบรรทุกคิดเป็นร้อยละ 46 ของรถบรรทุกทั้งหมด กลุ่ม B มีปริมาณรถบรรทุกคิดเป็นร้อยละ 40 กลุ่ม C มีปริมาณรถบรรทุกคิดเป็นร้อยละ 10 และกลุ่ม D มีปริมาณรถบรรทุกคิดเป็นร้อยละ 4

ต่อมาผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลการซ่อมบำรุงรถบรรทุกบริษัทกรมศึกษา โดยปกติแล้วค่าซ่อมบำรุงจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ การซ่อมบำรุงตามระยะ ค่ายางรถบรรทุก และการซ่อมบำรุงหนัก ดังรายละเอียดตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลค่าใช้จ่ายการซ่อม

ลำดับ	ประเภทงานซ่อม	ค่าใช้จ่าย(บาท)
1	ซ่อมบำรุงตามระยะ	23,898,222.00
2	ยาง	17,017,325.00
3	ซ่อมบำรุงหนัก	2,000,000.00
	รวม	42,915,547.00

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นมากที่สุดกับรถบรรทุกที่มีอายุมากกว่า 10 ปี (ตารางที่ 1 กลุ่ม A และ C) มีค่าซ่อม 16,415,778 บาท คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 69 ในปีที่ผ่านมา 2558 ค่าซ่อมบำรุงรักษารถบรรทุกเท่ากับ 7.54 บาท/กิโลเมตร แต่การดำเนินการในปัจจุบันพบว่าค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงเฉลี่ย 9.20 บาท/กิโลเมตร

ตารางที่ 3 ค่าใช้จ่ายการซ่อมของรถแต่ละประเภท

ประเภทรถ	จำนวน(คัน)	ค่าซ่อม(บาท)
รถบรรทุกเก่า	159	16,415,778.00
รถบรรทุกใหม่	125	7,482,444.00
รวม	284	23,898,222.00

ตารางที่ 4 รายการซ่อม

รายการซ่อม	ค่าซ่อม(บาท)
การซ่อมบำรุงตามระยะ	13,770,000.00
การซ่อมซ้ำ อาการเดิม	1,496,812.00
การซ่อมจากอุบัติเหตุ	1,148,966.00
รวม	16,415,778.00

หากนำข้อมูลรถบรรทุกกลุ่ม A และ C มาจำแนกค่าซ่อมสามารถจำแนกได้ 3 รายการดังแสดงในตารางที่ 4 ค่าซ่อมบำรุงตามระยะมีมูลค่า 13,770,000 บาท คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 80 แต่หากดูจากข้อมูลตารางที่ 1 พบว่ามีรถบรรทุกที่มีอายุมากกว่า 15 ปี จำนวน 29 คันรวมอยู่ด้วย และมีค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษาตามระยะรวมอยู่ด้วยประมาณสัดส่วนร้อยละ 22 คิดเป็นเงินจำนวน 3,071,769.23 บาท ($13,770,000 \times 22\% = 3,071,769.23$) หากรวมค่าซ่อมซ้ำและค่าซ่อมจากเกิดอุบัติเหตุ

2,645,778.00 บาท รวมจำนวนเงินทั้งสิ้น 5,717,547.23 บาท คิดเป็น 1 ใน 3 ของจำนวนเงินค่าซ่อม

4.2 Action

งานวิจัยของ [14] ได้วิเคราะห์ SWOT อุตสาหกรรมให้บริหารผู้คอนเทนเนอร์ถึงโอกาสที่กำลังมากับนโยบายของรัฐบาลในระดับรัฐและภาคกลางที่ผลักดันให้อุตสาหกรรมนี้มีการเติบโต แต่ยังมีจุดอ่อนการนัดหยุดงานของพนักงานและความล่าช้าในการดำเนินการในการจัดการขนส่งสินค้าที่ต้องเร่งแก้ไขโดยด่วน และงานวิจัยของ [15] ได้พัฒนาและดำเนินกลยุทธ์บางอย่างเพื่อลดอุบัติเหตุทางถนนในการขนส่งวัตถุอันตรายในอิหร่าน ความเป็นไปได้ของการจัดลำดับความสำคัญของกลยุทธ์ทั้งที่อยู่ในหรือภายนอก ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้ง 2 งานวิจัยได้จัดทำกลยุทธ์โดยผ่านการวิเคราะห์ SWOT เพื่อให้ได้กลยุทธ์ที่เหมาะสมกับตัวเองดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์ SWOT และสรุปได้ว่า

จุดแข็ง (Strength)

- (1) บริษัทมีการปรับตัวได้ดี
- (2) บริษัทมีรถบรรทุกจำนวนมากเพียงพอกับปริมาณสินค้าเกษตรที่มีอยู่ในปัจจุบัน

จุดอ่อน (Weakness)

- (1) บริษัทขาดการบูรณาการระหว่างหน่วยงานภายใน ทำให้ขาดการวางแผน เช่น การวางแผนการซ่อมบำรุง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในแนวทางเดียวกัน

- (2) บริษัทมีต้นทุนการซ่อมบำรุงรถบรรทุกสูง

โอกาส (Opportunity)

- (1) สินค้าเกษตรมีปริมาณมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคต

- (2) นโยบายภาครัฐสนับสนุนอุตสาหกรรมระบบโซ่อุปทานและโลจิสติก

อุปสรรค (Threat)

- (1) เจ้าของไร่อ้อยมีรถบรรทุกเป็นของตัวเอง
- (2) การปรับราคาของอะไหล่รถบรรทุก

4.3 Plan

รูปแบบทางเศรษฐศาสตร์กำหนด 3 รูปแบบ เพื่อลดค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงคือ

- (1) กรณีซื้อรถบรรทุกใหม่ทดแทน
- (2) กรณีสร้างอุโมงค์บำรุงภายใน
- (3) กรณีจ้างรถบรรทุกร่วมสัดส่วน 20:80

วิเคราะห์รูปแบบทั้ง 3 รูปแบบเพื่อลดค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุง โดยใช้ตัวชี้วัดเพื่อประเมินโครงการ 3 ตัวชี้วัดคือ

- (1) วิธีระยะเวลาคืนทุน (PB)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก}}{\text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี}} \dots\dots\dots (1)$$

- (2) วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \dots\dots\dots (2)$$

กำหนดให้

B_t = ผลประโยชน์จากโครงการในปีที่ t

C_t = ค่าใช้จ่ายของโครงการในปีที่ t

t = ปีของโครงการมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n

n = อายุโครงการมีค่าตั้งแต่ (project life)

r = อัตราดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาสของเงินทุน

- (3) วิธีผลตอบแทนจากการลงทุน (IRR)

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \dots\dots\dots (3)$$

ตัวชี้วัดทั้ง 3 ตัวนี้เป็นตัวชี้วัดที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยของ [4] ที่พวกเขาประเมินผลการปฏิบัติงานโครงการด้านความปลอดภัยของกลุ่มตัวอย่าง และงานวิจัยของ [16] เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบว่าจะปฏิเสธหรือจะยอมรับโครงการ (NPV, IRR, และ PP) การผลิตรวมของพลังงานกลหรือไฟฟ้าและความร้อน

4.3.1 กรณีซื้อรถบรรทุกใหม่ทดแทน

รูปแบบที่ 1 คือการจะซื้อรถบรรทุกใหม่ทดแทนรถบรรทุกซ่อมหนักมูลค่ารถบรรทุกปัจจุบันมีมูลค่าต่ำ ปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาในการประเมินรูปแบบนี้ได้แก่ กระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิครั้งแรกคือราคารถบรรทุก

ปัจจุบันและค่าซ่อมบำรุงเฉลี่ยรายปีลดมูลค่าปัจจุบันของรถบรรทุก (บาท) กระแสเงินสดรับสุทธิรายปีตลอดระยะเวลาคือค่าขนส่งอ้อย (บาท/คัน/ปี) และระยะเวลา 10 ปี

4.3.2 กรณีสร้างอุโมงค์ภายใน

รูปแบบที่ 2 คือการสร้างอุโมงค์บำรุงภายใน เนื่องจากปริมาณรถบรรทุกมาก ในบางครั้งต้องเข้าคิวกับอุโมงค์บำรุงได้นอกที่ทำสัญญากับบริษัท ส่งผลให้การวางแผนการซ่อมบำรุงไม่เป็นไปตามแผนที่กำหนด ปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาในการประเมินรูปแบบนี้ได้แก่ เงินลงทุนสร้างอุโมงค์ครั้งแรก รวมทั้งค่าอุปกรณ์เครื่องมือสำหรับซ่อมบำรุง, ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ, เงินเดือนพนักงาน (บาท), ค่าอะไหล่และวัสดุสิ้นเปลือง (บาท), ค่าโทรศัพท์ (บาท), ค่าน้ำประปาและค่าไฟฟ้า (บาท), ระยะเวลา 10 ปี, และอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการเท่ากับร้อยละ 5

4.3.3 กรณีจ้างรถบรรทุกร่วมสัดส่วน 20:80

รูปแบบที่ 3 คือการขายรถบรรทุกซ่อมหนักจำนวน 29 คัน เนื่องจากประเมินค่าซ่อมแล้วมีมูลค่าสูงกว่ามูลค่าปัจจุบัน ประกอบกับรถบรรทุกที่มีมูลค่าปัจจุบันต่ำจำนวน 38 คัน หากยังคงให้รถบรรทุกดังกล่าววิ่งต่อไป อาจทำให้มูลค่าต่ำไปกว่านี้ ซึ่งทำให้ราคารถบรรทุกใหม่ห่างกับราคาปัจจุบันมาก อาจไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องขายรถทั้ง 2 ชนิด และดำเนินการจ้างรถบรรทุกร่วมขนส่งอ้อยแทน โดยกำหนดการจ้างรถบรรทุกร่วมในสัดส่วน 20:80 ของรถบรรทุกที่มีอยู่ในปัจจุบัน

ปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาในการประเมินรูปแบบดังกล่าวได้แก่ เงินรายได้จากการรับจ้างขนอ้อยจากลานอ้อยมายังโรงงานน้ำตาล (บาท), ค่าใช้จ่ายก่อนดำเนินการได้แก่, เงินเดือนพนักงานประสานงาน 2 คน (บาท), ค่าน้ำมันยานพาหนะ 1 คัน (บาท), ค่าโทรศัพท์ (บาท), ค่าน้ำประปา (บาท), ค่าไฟฟ้า (บาท), ค่าเช่ารถบรรทุกร่วม (บาท), ค่าบริหารจัดการระหว่างปี (บาท), ระยะเวลา 10 ปี, และอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการเท่ากับร้อยละ 5

4.3.4 เงื่อนไขการตัดสินใจ

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (IRR) เป็นการเปรียบเทียบกระแสเงินสดรับสุทธิรายปีตลอดระยะเวลาเทียบกับกระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิครั้งแรกในรูปของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และร้อยละของผลตอบแทน (IRR) หากใช้ 2 ตัวชี้วัดนี้ในการตัดสินใจคัดเลือกโครงการ ผลการยอมรับหรือปฏิเสธโครงการจะไปในทิศทางเดียวกันได้

4.4 Do

การเฝ้าติดตามและตรวจสอบผลการดำเนินการและเป้าหมาย

ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบค่า PB, NPV, และ IRR แต่ละโครงการ

	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
Payback period	10	5	5
NPV	-฿ 413,523.46	฿ 7,894,991.32	฿ 2,260,488.77
IRR	1%	15%	29%
อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำ	5%	5%	5%

โดยปกติโครงการที่มีกระแสเงินสดรับสุทธิ NPV มากกว่า 0 และมีร้อยละผลตอบแทนจากการลงทุน IRR มากกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ (NPV) จะแสดงผลยอมรับหรือปฏิเสธการลงทุนไปในทิศทางเดียวกัน และจากการวิเคราะห์พบว่าไม่ควรลงทุนรูปแบบที่ 1 การซื้อรถบรรทุกอ้อยทดแทน เนื่องจากค่า NPV ติดลบ (-413,523.46 บาท) ตามการคำนวณสมการ 2 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ [10] จะส่งผลต่อเจ้าของ Equity ของกิจการลดลง และรูปแบบที่ 1 ให้ผลตอบแทนเพียง 1% IRR ตามการคำนวณของสมการ 3 น้อยกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการเท่ากับร้อยละ 5

รูปแบบที่ 2 การสร้างอุโมงค์บ่ารุงภายในและรูปแบบที่ 3 แผนงานจ้างรถบรรทุกพร้อมเป็น 2 แผนงานที่มีค่ามูลค่า NPV เป็นบวก (+) และ ค่า IRR มีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการเท่ากับร้อยละ 5 แต่หากเราพิจารณาอัตราการเติบโตของอุตสาหกรรมเหมือนกับงานวิจัยของ [5] กำหนดตัวชี้วัดในการลดความเสี่ยงการพิจารณารูปแบบทางเศรษฐศาสตร์และงานวิจัยของ [6] พบว่าการพิจารณาอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มักจะมีข้อบกพร่อง แต่ก็สามารถพิจารณาพร้อมกับตัวชี้วัดตัวอื่นได้

รูปแบบที่ 2 NPV มีค่ามากกว่าแผนงานที่ 3 ดังนั้นจึงเลือกดำเนินรูปแบบที่ 2 ซึ่งการดำเนินการสร้างอุโมงค์บ่ารุงภายในจะมีกำไร 7,894,991.32 บาท และมี PB เท่ากับ 5 ตามการคำนวณสมการที่ 1 ซึ่งมากกว่างานวิจัยของ [7] ที่มีค่า PB ที่ 2.1 ปี ในโครงการลงทุนด้านพลังงาน แต่ก็น้อยกว่างานวิจัยของ [18] ที่มีค่า PB ที่ 7 ปี ในการประเมินผลและการตัดสินใจโครงการลงทุนการขนส่ง

รูปแบบที่ 3 กรณีจ้างรถบรรทุกพร้อมสัดส่วน 20:80 จะดำเนินการต่อจากรูปแบบที่ 2 เนื่องจากจะมีกำไร 2,260,488.77 บาท ประกอบกับผลตอบแทนในการจำหน่ายรถบรรทุกอ้อยที่มีมูลค่าต่ำและมีต้นทุนการซ่อมบำรุงจำนวน 67 คัน คิดเป็นเงินประมาณ 131,410,000 บาท (มูลค่ารถบรรทุกเมื่อตุลาคม 2558) และทำให้ต้นทุนการซ่อมบำรุงตามระยะจาก 23,898,222.00 บาท ลดลงเหลือ 22,401,410.00 บาท เนื่องจากตัดค่าซ่อมบำรุงหนัก 1,496,812 บาท คิดเป็นต้นทุนการซ่อมบำรุงลดลงจาก 9.20 บาทต่อกิโลเมตร เป็น 8.56 บาทต่อกิโลเมตร ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ต้นทุนการซ่อมบำรุงก่อนและหลังการปรับปรุง

		ก่อนดำเนินการ	หลังดำเนินการ
ลำดับ	ประเภทงานซ่อม	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
1	ซ่อมทั่วไป	23,898,222.00	22,401,410.00
2	ยาง	17,017,325.00	17,017,325.00
3	ซ่อมกระเบ	2,000,000.00	2,000,000.00
รวม		42,915,547.00	41,418,735.00

5. สรุปผลและอภิปรายผล

ต้นทุนในการซ่อมบำรุงรถบรรทุกมีมูลค่าสูงมาก เนื่องจากขาดการจัดการที่ไม่เป็นระบบ วัตถุประสงค์งานวิจัยคือเพื่อกำหนดและตัดสินใจเลือกรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์ รูปแบบทางเศรษฐศาสตร์กำหนดไว้ 3 รูปแบบคือ

(1) กรณีซื้อรถบรรทุกใหม่ทดแทนเป็นการดำเนินการเพื่อลดต้นทุนการซ่อมบำรุงเชิงแก้ไข [19] แต่ไม่สามารถดำเนินการได้ในรูปแบบนี้

(2) กรณีสร้างอู่ซ่อมภายในเป็นวิธีที่เหมาะสม เนื่องจากมีค่ามูลค่า NPV เป็นบวก (+) และ ค่า IRR มีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการ ทั้งในส่วนของบริษัทต่างๆ ที่มีอยู่ในบริษัท [10-11]

(3) กรณีจ้างรถบรรทุกร่วมสัดส่วน 20:80 มีค่ามูลค่า NPV เป็นบวก (+) และ ค่า IRR มีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการพิจารณาว่าบริษัทสามารถทำกำไรน้อย [6] รูปแบบที่ 2

ผลการตัดสินใจพบว่า รูปแบบที่ 2 มีค่า NPV มากกว่ารูปแบบที่ 3 และ 1 ค่า IRR มีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ต้องการ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สร้างรูปแบบทางเศรษฐศาสตร์รูปแบบใหม่ เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจสำหรับโครงการเดี่ยวๆ ที่เป็นอิสระต่อกัน

งานวิจัยในอนาคตผู้วิจัยจะศึกษารูปแบบทางเศรษฐศาสตร์ในเชิงการลงทุนเป็นระยะเวลาที่เท่ากัน รวมถึงการพิจารณาปัจจัยในการคืนทุนที่เร็ว

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. W. Labib, "World-class maintenance using a computerised maintenance management system,"

Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.4, No.1, pp.66-75, 1998.

- [2] Y. S. Shum, and D. C. Gong, "The application of genetic algorithm in the development of preventive maintenance analytic model," The international journal of advanced manufacturing technology, Vol.32, No.1-2, pp. 169-183, Feb., 2007.
- [3] W. Fairley and H. D. Jacoby, "Investment analysis using the probability distribution of the internal rate of return," Management Science, Vol.21, No.12, pp. 1428-1437, 1975.
- [4] T. Sayed, E. Sacchi, and P. D. Leur, "Evaluating the Safety Benefits of the Insurance Corporation of British Columbia Road Improvement Program Using Full Bayes Approach," Transportation Research Board 95th Annual Meeting, Location: Washington DC, United States, Date: Jan.10 -14, 2016.
- [5] J. J. Heckman, S. H. Moon, R. Pinto, P. A. Savelyev, and A. Yavitz, "The rate of return to the HighScope Perry Preschool Program," Journal of public Economics, Vol.94, No.1, pp.114-128, Feb., 2010.
- [6] C. A. Magni, "Average internal rate of return and investment decisions: a new perspective," The Engineering Economist, Vol.55, No.2, pp.150-180, Jan., 2010.
- [7] J. Jackson, "Promoting energy efficiency investments with risk management decision tools," Energy Policy, Vol.38, No.8, pp.3865-3873. Mar., 2010.
- [8] A. V. Cauwenbergh, E. Durinck, R. Martens, E. Laveren, and I. Bogaert, "On the role and function of formal analysis in strategic investment decision processes: results from an empirical study in Belgium," Management Accounting Research, Vol.7, No.2, pp.169-184, 1996.
- [9] S. M. Ordoobadi, "Application of ANP methodology in evaluation of advanced technologies," Journal of Manufacturing

- Technology Management, Vol.23, No.2, pp.229-252, May, 2012.
- [10] G. Houben, K. Lenie, and K. Vanhoof, "A knowledge-based SWOT-analysis system as an instrument for strategic planning in small and medium sized enterprises," Decision support systems, Vol.26, No.2, pp.125-135, 1999.
- [11] E. K. Valentin, "SWOT analysis from a resource-based view," Journal of marketing theory and practice, Vol.9, No.2, pp.54-69, Dec., 2015.
- [12] K. V. Sambasivarao, and S. G. Deshmukh, "A decision support system for selection and justification of advanced manufacturing technologies," Production Planning & Control, Vol.8, No.3, pp.270-284, Nov., 2010.
- [13] A. H. Tsang, "A strategic approach to managing maintenance performance," Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.4, No.2, pp.87-94, 1998.
- [14] P. S. Joseph, and P. K. Manoj, "International container transshipment terminal (ICTT), vallarpadam, kerala: a swot analysis," Pezzottaite Journals, Vol.4, No.4, Oct. – Dec., 2015.
- [15] A. S. Kheirkhah, A. Esmailzadeh, and S. Ghazinoory, "Developing strategies to reduce the risk of hazardous materials transportation in Iran using the method of fuzzy swot analysis," Transport, Vol.24, No.4, pp.325-332, Nov., 2009.
- [16] M. V. Biezma, and J. R. S. Cristobal, "Investment criteria for the selection of cogeneration plants—a state of the art review," Applied Thermal Engineering, Vol.26, No.5, pp.583-588, Sept., 2005.
- [17] B. G. C. Ribeiro, W. T. D. Sousa, and J. A. M. D. Luz, "Feasibility project for implementation of conveyor belts in an iron ore mine. Study case: Fabrica Mine in Minas Gerais State, Brazil," Rem: Revista Escola de Minas, Vol.69, No.1, pp.79-83, Jan. – Mar., 2016.
- [18] R. Khraibani, A. D. Palma, N. Picard, and I. Kaysi, "A new evaluation and decision making framework investigating the elimination-by-aspects model in the context of transportation projects' investment choices," Transport Policy, Vol.48, pp.67-81, Mar., 2016.
- [19] J. C. Hartman, "An economic replacement model with probabilistic asset utilization," IIE Transactions, Vol.33, No.9, pp.717-727, 2001.

ค่าพลังงานความร้อนรายปีและต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ Annual Energy Yield and Life Cycle Cost (LCC) of a New Prototype of Evacuated Tube Collector (ETC)

พรนิภา นูโนชา^{1*} ธวัช สุริวงษ์^{1*}

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

*pornnipa.n@gmail.com, tawats@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอค่าพลังงานความร้อนรายปีและต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ETC) รูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้ใช้ท่อสุญญากาศจำนวน 15 ท่อ คิดเป็นพื้นที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์เท่ากับ 1.08 m^2 และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด (η_{max}) เท่ากับ 0.72 ผลการประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ $1,117.9 \text{ kWh/m}^2$ หรือมีค่าเท่ากับ $1,207.3 \text{ kWh}$ ($4,346.4 \text{ MJ}$) สำหรับต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศนี้ สำหรับการประเมินค่าต้นทุนวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Cost, LCC) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ พบว่ามีค่าเท่ากับ 22,993 บาท ซึ่งเป็นค่าต้นทุนวัฏจักรชีวิตที่ต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ สรุปได้ว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีความสามารถในการแข่งขันเชิงพาณิชย์ และมีศักยภาพในการผลิตพลังงานความร้อนหรือน้ำร้อน สำหรับภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการน้ำร้อนในกระบวนการผลิต

คำสำคัญ : ตัวเก็บรังสีอาทิตย์; อะลูมิเนียมอะโนไดซ์; ตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์; ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต

Abstract

This research presents the annual energy yield and economic evaluation of a new prototype of evacuated tube collector (ETC) with applied anodized aluminium sheet as solar absorber. The size of ETC was 15 vacuum tubes with 1.08 m^2 solar absorber area. The maximum thermal efficiency (η_{max}) of ETC was 0.72. As the results, annual energy yield of ETC per a unit area of solar absorber was $1,117.9 \text{ kWh/m}^2$ or $1,207.3 \text{ kWh}$ ($4,346.4 \text{ MJ}$) for the prototype ETC (1.08 m^2 solar absorber area). According to the Life Cycle Cost (LCC) evaluation, LCC of this prototype ETC was 22,993 Baht which is lower than commercial solar collector. Therefore, the evacuated tube collector (ETC) with applied anodized

aluminium sheet as the solar absorber can be competitive with commercial solar collector, and it is high potential for producing the hot water in household and industrial sectors that required hot water in manufacturing.

Keywords : Solar collector, Anodized aluminium, Solar absorber, Life cycle cost

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตเมื่ออัตราการเพิ่มประชากรสูงขึ้นการใช้พลังงานจึงมีอัตราความต้องการเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้หน่วยงานต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนภายในประเทศเล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ด้านพลังงานทดแทน รวมถึงการประเมินหาค่าพลังงานความร้อนและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยีนั้นๆ ซึ่งถือว่าเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญ พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานสะอาดจากธรรมชาติ ปราศจากการก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม พลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ประโยชน์สองด้านหลักๆ คือ การผลิตไฟฟ้าและการผลิตความร้อน ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนหรือเทคโนโลยีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) ซึ่งในประเทศไทยมีการใช้งานมาแล้วไม่น้อยกว่า 25 ปี [1] ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำแนกประเภทตามการติดตามดวงอาทิตย์ (Tracking) เช่นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมแสงชนิดรางพาราโบลา (Parabolic trough collector) และแบบที่ไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์ (Station collector) เช่น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate collector, FPC) และแบบท่อสุญญากาศ (Evacuated tube collector, ETC) [2] ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่มีการติดตามดวงอาทิตย์เป็นที่ยอมรับและได้มีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับการผลิตน้ำร้อนในบ้านเรือน โรงแรม และโรงพยาบาล อย่างไรก็ตามสำหรับประเทศไทยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ยังไม่ได้ได้รับความนิยมในการติดตั้งและใช้งานมากนักเนื่องจากสภาพอากาศและปริมาณความต้องการการใช้น้ำร้อนภาคครัวเรือนยังไม่สูง และต้นทุนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่นำเข้า

มาจากต่างประเทศเป็นหลักและผลิตเองในประเทศได้เพียงบางส่วน โดยส่วนที่มีต้นทุนสูงคือท่อเลือกเก็บรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่มีการเคลือบสารเลือกเก็บรังสีอาทิตย์ที่บริเวณผิวด้านนอกของท่อแก้วชั้นใน ซึ่งกระบวนการเคลือบสารเลือกเก็บรังสีอาทิตย์นี้จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง (การเคลือบด้วยโลหะ) เช่น Sputtering, Evaporation Pyrolysis และ Electro-deposition เป็นต้น [3-5] ซึ่งการผลิตในประเทศไทยทำได้ยาก เนื่องจากเทคนิคส่วนใหญ่ต้องใช้เครื่องมือที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง ส่งผลให้ไม่มีการผลิตตัวเก็บรังสีอาทิตย์ภายในประเทศ อย่างไรก็ตาม การเตรียมผิวเคลือบด้วยกระบวนการอะโนไดซ์ (Anodization) เป็นเทคนิคหนึ่งที่โรงงานอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมของประเทศไทยมีความสามารถและศักยภาพสูง

งานวิจัยที่ผ่านมาของผู้วิจัยได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคสำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์จากผิวด้านนอกของท่อแก้วด้านในของท่อแก้วสุญญากาศสองชั้น มาเป็นการประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ที่มีการเติมธาตุ निकเกิลลงในฟิล์ม (Ni-Al₂O₃) หรือแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ร่วมกับท่อแก้วสุญญากาศสองชั้น ซึ่งประสบความสำเร็จในการเปลี่ยนตำแหน่งตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยแผ่นอะลูมิเนียมนี้ทำหน้าที่สองอย่างพร้อมกันคือ ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ให้กับสารทำงานในท่อความร้อนภายในท่อแก้วสุญญากาศแบบสองชั้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบไม่มีการเคลือบสารเลือกเก็บรังสีอาทิตย์บนท่อสุญญากาศ [6] รวมถึงมีการรายงานผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้าน

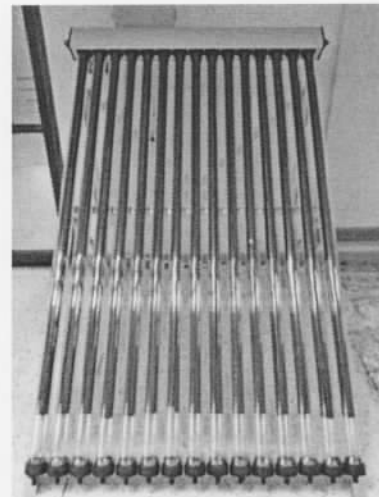
เศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ พบว่ามีความสามารถและศักยภาพในการแข่งขันในเชิงพาณิชย์ [7] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการพิจารณาในส่วนของการประเมินค่าพลังงานความร้อนรายปีโดยเปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้งแบบแผ่นเรียบและแบบท่อสุญญากาศที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ [8] และการประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Cost, LCC) ให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าพลังงานความร้อนที่สามารถผลิตได้รายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศสองชั้นรูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์เปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้งแบบแผ่นเรียบและแบบท่อสุญญากาศที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ รวมถึงการประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินความเป็นไปได้ของค่าพลังงานความร้อนรายปีที่สามารถผลิตได้ และทางด้านเศรษฐศาสตร์ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศสองชั้นที่มีการนำเอาแผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ที่มีการเติมธาตุ निकเกิลในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$) เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยนำข้อมูลสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Performance of solar collector) มาคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้ต่อปีและตลอดอายุการใช้งาน จากงานวิจัยที่ผ่านมาของผู้อื่น [6] พบว่าสามารถประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศสองชั้นได้ การประกอบต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์รูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ร่วมกับท่อสุญญากาศ

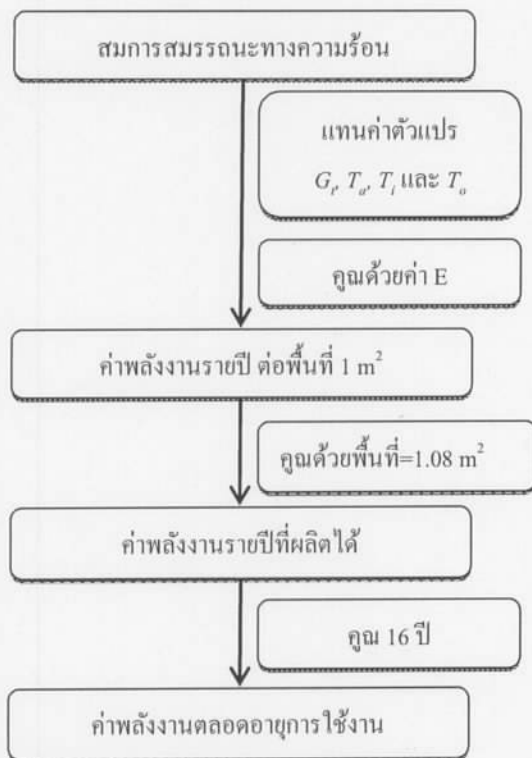
สองชั้นที่ไม่มีการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์ที่ผิวต่อต้านออกของท่อแก้วชั้นในจำนวน 15 ท่อ เข้ากับชุดตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับงานวิจัยนี้มีการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector thermal efficiency) ตามมาตรฐาน ISO9806-1 รายละเอียดการทดสอบแสดงในงานวิจัยของ พรนิภา และคณะ [6]



รูปที่ 1 ต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์

การคำนวณค่าพลังงานรายปีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้และตลอดอายุการใช้งานสามารถหาได้จากสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่คำนวณผ่านตัวแปรต่างๆ ในสถานะที่กำหนดตามรายละเอียดในตารางที่ 1 อันได้แก่ G , T_a , T_i และ T_o เมื่อใส่ค่าในตัวแปรในสมการสมรรถนะทางความร้อนทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ณ สถานะที่กำหนด จากนั้นนำประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้มาคูณกับค่าพลังงานรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย (E) ทำให้ได้ค่าพลังงานรายปีที่สามารถผลิตได้ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร (1 m^2) นำค่าที่ได้นี้คูณด้วยพื้นที่ของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 1.08 m^2 ผลที่ได้คือค่าพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

สามารถผลิตได้รายปี และสุดท้ายเมื่อคูณด้วยจำนวนอายุการใช้งาน (16 ปี) ทำให้ทราบถึงค่าพลังงานที่ผลิตได้ตลอดอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [8] ดังรายละเอียดในแผนภาพการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนรายปีในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การคำนวณค่าพลังงานรายปีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้ตลอดอายุการใช้งาน

การประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Cost, LCC) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นการประเมินต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดช่วงอายุการใช้งาน มีขอบเขตการพิจารณาจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนอุปกรณ์ประกอบไปด้วยค่าชุดอุปกรณ์ถึงน้ำร้อน แผ่นครีบบะลูนีเนียม ค่าดำเนินการอื่นๆ แรงงานในการติดตั้งระบบรวมถึงค่ากระบวนการเคลือบสารเลือกรับรังสีอาทิตย์และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่เกิดขึ้นตลอดช่วงอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (คิดจากร้อยละ 0.5 ของเงินลงทุน โดยอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 16 ปี [9] การคำนวณต้นทุนวัฏจักรชีวิตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 [10, 11] นำค่าใช้จ่ายทั้งหมดนี้มาปรับคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยการใช้อัตราดอกเบี้ยที่กำหนดโดยธนาคารกสิกรไทย [12]

$$LCC = C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+i)^n} - \frac{SV}{(1+i)^N} \quad (1)$$

เมื่อ

C_c = เงินลงทุนเริ่มต้น (Initial capital cost) (บาท)

C_n = ต้นทุนในการดำเนินการ (Operating cost) ค่าซ่อมบำรุง เชื้อเพลิงและอื่นๆ ในแต่ละปี (บาท)

SV = มูลค่าซากปีที่สุดท้ายของโครงการ (บาท)

i = อัตราดอกเบี้ย (Interest rate) หรือ อัตราคิดลด (Discount rate)

n = อายุการใช้งานโครงการ (Project period)

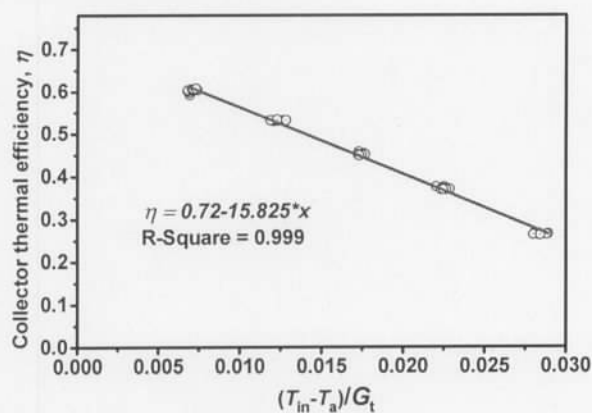
N = จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ (Year at the end of project)

E_n = พลังงานที่สามารถผลิตได้ในแต่ละปี

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าพลังงานรายปี [3]

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	หน่วย
ความเข้มรังสีอาทิตย์	G_t	800	W/m^2
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	T_a	30	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์	T_i	35	$^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิน้ำออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์	T_o	60	$^{\circ}\text{C}$
ค่าพลังงานรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย [13]	E	1,800	$\text{kWh/m}^2\text{-year}$

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล



รูปที่ 3 สมรรถนะทางความร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียม อะโนไดซ์ เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ [6]

สมรรถนะทางความร้อนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียม อะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ที่ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806-1 แสดงดังรูปที่ 3 ในงานวิจัยนี้พิจารณาที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (U_L) มีค่าคงที่ ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อน (η) กับ $(T_i - T_a)/G_t$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีพิจารณาที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (U_L) มีค่าไม่คงที่ จากสมรรถนะทางความร้อนพบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 0.72 ที่อุณหภูมิน้ำเข้ามีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($\Delta T = T_i - T_a = 0$) และผลคูณของแฟกเตอร์การดึงความร้อน (F_R) กับ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมหรือค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) มีค่าเท่ากับ $15.83 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ (ความชันของกราฟ) ดังนั้นสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรง คือ $\eta = 0.72 - 15.825x$ เมื่อแทน x คือ $(T_i - T_a)/G_t$ การเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ที่ผ่านการทดสอบโดยวิทยาลัยพลังงานทดแทน ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด (η_{max}) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบของบริษัท A-G และสูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศของบริษัท I แต่มีค่าต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของบริษัท H และ J ตามลำดับ

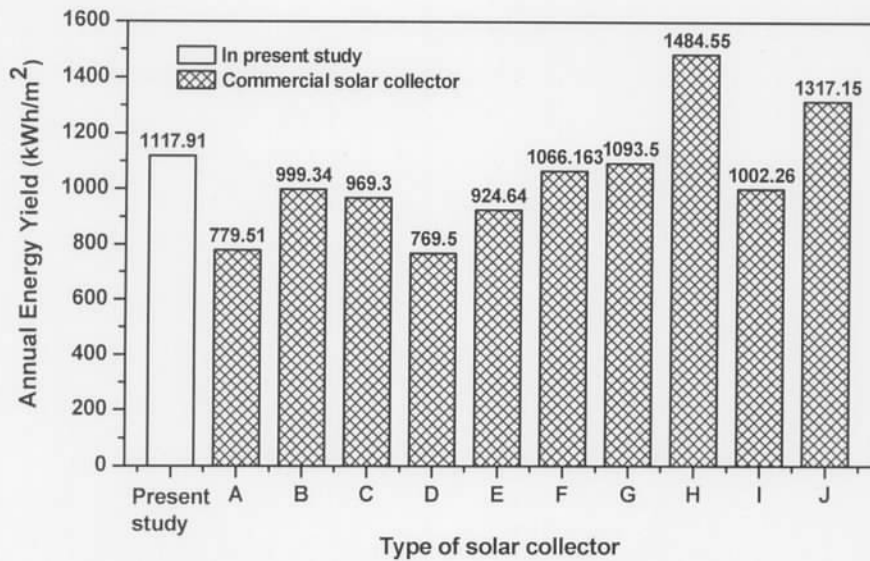
ค่าพลังงานรายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ถูกคำนวณจากสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คือ $\eta = 0.72 - 15.83x$ เมื่อแทน x คือ $(T_i - T_a)/G_t$ ผ่านตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าประสิทธิภาพต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 0.62 เมื่อคูณด้วยค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีของประเทศไทย (E) ทำให้ได้ค่าพลังงานรายปีของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ $1,117.9 \text{ kWh/m}^2$ งานวิจัยนี้มีพื้นที่ของตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 1.08 m^2 ดังนั้น

ทำให้ได้ค่าพลังงานรายปีที่ดินแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศนี้สามารถผลิตได้มีค่าเท่ากับ 1,207.3 kWh หรือ 4,346.3 MJ หรือคิดเป็นพลังงานที่ผลิตได้ตลอดอายุการใช้งาน (16 ปี) มีค่าเท่ากับ 19,316.8 kWh หรือ 6,9540.5 MJ เมื่อทำการเปรียบเทียบพลังงานรายปีที่สามารถผลิตได้ต่อพื้นที่ 1 m² ของดินแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศในงานวิจัยนี้กับค่าพลังงานรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยคำนวณจากสมการสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของทุกบริษัทดังตารางที่ 2 (บริษัท A-J) ผ่านตัวแปรต่างๆ ในตารางที่ 1 [8] ผลการคำนวณค่าพลังงานความร้อนรายปีของดินแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศจากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จากบริษัทต่างๆ

แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าค่าพลังงานความร้อนรายปีที่สามารถผลิตได้ของดินแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์สุญญากาศเปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบบริษัท A-H มีค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ผลิตได้สูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบของบริษัท A-G ยกเว้นบริษัท H และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิด Heat Pipe ของบริษัท I และ J นั้น พบว่าดินแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศนี้สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนรายปีอยู่ระหว่างค่าพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของบริษัท I และ J นอกจากนี้ค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทุกชนิดสอดคล้องกับผลสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมรรถนะทางความร้อนของดินแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์และตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ที่ผ่านการทดสอบโดยวิทยาลัยพลังงานทดแทน [8]

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์	
ความหนา 11.8 ไมโครเมตร	$\eta = 0.72 - 15.83(T_f - T_a)/G_i$
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	
Company A	$\eta = 0.57 - 21.91(T_f - T_a)/G_i$
Company B	$\eta = 0.62 - 10.37(T_f - T_a)/G_i$
Company C	$\eta = 0.64 - 16.24(T_f - T_a)/G_i$
Company D	$\eta = 0.45 - 3.60(T_f - T_a)/G_i$
Company E	$\eta = 0.65 - 21.81(T_f - T_a)/G_i$
Company F	$\eta = 0.65 - 9.23(T_f - T_a)/G_i$
Company G	$\eta = 0.66 - 8.40(T_f - T_a)/G_i$
Company H	$\eta = 0.88 - 8.84(T_f - T_a)/G_i$
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ Heat Pipe	
Company I	$\eta = 0.57 - 0.54(Tm^*) - 0.0036 G_i (Tm^*)^2$
Company J	$\eta = 0.80 - 2.77(Tm^*) - 0.0200 G_i (Tm^*)^2$



รูปที่ 4 ค่าพลังงานความร้อนรายปีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถผลิตได้

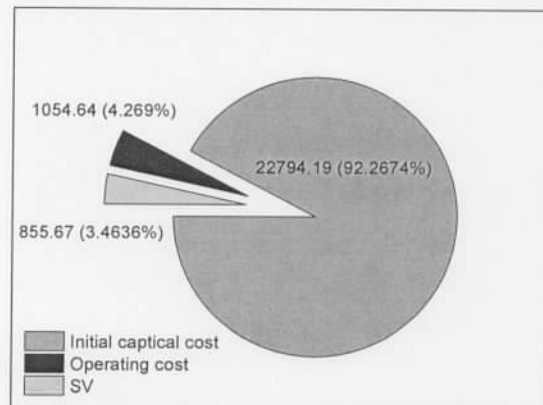
การผลิตพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนน้อยกว่า 500 kWh/m²) มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนตั้งแต่ 501-899 kWh/m² 3) มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนมากกว่า 900 kWh/m² [8] เห็นได้ว่าต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงที่ 3 ที่สามารถผลิตได้มากกว่า 900 kWh/m² ซึ่งเป็นกลุ่มที่สามารถผลิตความร้อนได้สูงสุด ดังนั้น สรุปได้ว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ มีศักยภาพในการผลิตพลังงานความร้อนหรือน้ำร้อนสำหรับการใช้งานในภาคครัวเรือน ภาคอุตสาหกรรมและอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนเช่นเดียวกันกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

การประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิต (LCC) ของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ พิจารณาจากต้นทุนและผลประโยชน์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มาทำการวิเคราะห์ โดยต้นทุนของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศในงานวิจัยนี้

ประกอบด้วยต้นทุน 2 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนแรก คือ เงินลงทุนเริ่มต้น (ค่าลงทุนอุปกรณ์และแรงงานในการติดตั้งระบบ) ประกอบด้วย ค่าอุปกรณ์ชุดผลิตน้ำร้อน 12,053.60 บาท และค่าแผ่นอะลูมิเนียม 770.80 บาท ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิดมีความจำเป็นต้องนำเข้าจากประเทศจีนส่งผลให้มีค่าขนส่งสินค้าและค่าดำเนินการต่างๆ รวมเป็นเงิน 9,600.00 บาท ค่ากระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์บนแผ่นอะลูมิเนียม 369.79 บาท รวมเงินลงทุนเริ่มต้นเท่ากับ 22,794.19 บาท โดยสามารถคิดเป็นร้อยละของเงินลงทุนเริ่มต้นตามแต่ละรายการเรียงลำดับสัดส่วนเงินลงทุนจากมากไปน้อยได้ดังต่อไปนี้ ค่าอุปกรณ์ชุดผลิตน้ำร้อน ร้อยละ 52.88 ค่าขนส่งสินค้าและค่าดำเนินการต่างๆ ร้อยละ 42.12 ค่าแผ่นอะลูมิเนียม ร้อยละ 3.38 และค่ากระบวนการทำฟิล์มอะโนไดซ์ ร้อยละ 1.62 ตามลำดับ และต้นทุนในการดำเนินการหรือบำรุงรักษาระบบเท่ากับร้อยละ 0.5 ของมูลค่าการลงทุนหรือ 1,054.64 บาท และส่วนที่สองคือผลประโยชน์ ประกอบด้วยมูลค่าซากปีสุดท้ายของระบบ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 10 ของมูลค่าการลงทุน เท่ากับ 855.67 บาท ผลประโยชน์ที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์คือมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้โดยได้จากการเปรียบเทียบมูลค่าของไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนในปริมาณที่เท่ากัน ผลการ

ประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิต (LCC) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 22,993 บาท สามารถคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ ของต้นทุนวัฏจักรชีวิต (รูปที่ 5) พบว่าร้อยละ 92.27 คือ เงินลงทุนเบื้องต้นซึ่งถือเป็นต้นทุนหลักของต้นแบบตัว เก็บรังสีอาทิตย์ สำหรับร้อยละ 4.37 คือค่าบำรุงรักษา และ ร้อยละ 3.46 คือมูลค่าซาก (ผลประโยชน์ของตัวเก็บรังสี อาทิตย์) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาต้นทุนวัฏจักรชีวิตของ ต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ พบว่ามีค่าที่ต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ของบริษัท I, II และ III ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 และ รูปที่ 6 เนื่องจากตัวเก็บรังสี อาทิตย์ส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ ส่งผลให้มีราคาสูง ตามไปด้วย อันเนื่องมาจากต้นทุนการผลิต ค่าขนส่งและ ภาษีนำเข้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของการดูดกลืนรังสี อาทิตย์ที่เป็นหัวใจหลักในการเปลี่ยนรังสีอาทิตย์ให้เป็น ความร้อน ซึ่งเมื่อมีการแตกหักหรือสูญเสียความเป็น สุญญากาศแล้วจำเป็นต้องเปลี่ยนทั้งชุดท่อสุญญากาศ สำหรับต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ รูปแบบใหม่นี้ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัว ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ มีข้อได้เปรียบคือสามารถผลิตได้เอง ด้วยวัตถุดิบและเทคโนโลยีภายในประเทศ ทำให้ราคาค่า ต้นทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าลดลง และที่สำคัญเมื่อ เกิดการแตกหักเสียหายของท่อสุญญากาศ ก็สามารถ

เปลี่ยนเพียงท่อแก้วสุญญากาศเท่านั้น ไม่จำเป็นต้อง เปลี่ยนในส่วนของการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ทำให้ค่า บำรุงรักษามีค่าลดลงตามไปด้วย และจากราคาที่ถูกลง ส่งผลให้ภาครัฐและภาคเอกชนมีความสนใจในการลงทุน ติดตั้งระบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์มากขึ้น ทำให้การใช้ พลังงานทดแทนภายในประเทศมีการเติบโตมากขึ้น รวมถึงเป็นการกระตุ้นให้ภาคอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม และอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนมีการเติบโตทางธุรกิจ ตามไปด้วย



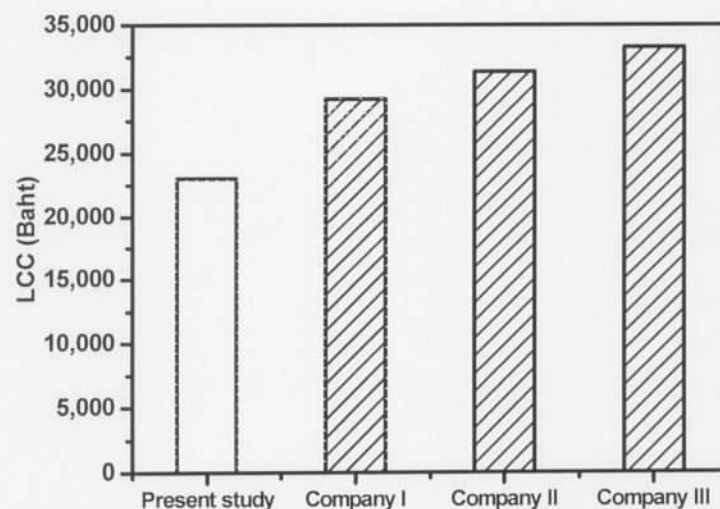
รูปที่ 5 ร้อยละของต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บ รังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่

ตารางที่ 3 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	หน่วย
เงินลงทุนเริ่มต้น	C_c	22,794.19	บาท
ต้นทุนในการดำเนินการ	C_n	1,054.64	บาท
มูลค่าซากปีที่สุดท้ายของโครงการ	SV	855.67	บาท
พลังงานที่สามารถผลิตได้ในแต่ละปี	E_n	1,207.97	kWh/ปี
อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราคิดลด	i	6.75	ร้อยละ
อายุการใช้งาน โครงการ	n	16	ปี
จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ	N	15	ปี

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

Type	เงินลงทุนเริ่มต้น (C_p)	ต้นทุนดำเนินการ (C_o)	มูลค่าซากปีสุดท้าย (SV)	ต้นทุนวัฏจักรชีวิต (LCC)
Present study	22,794.19	1,054.64	855.67	22,993.16
company I	29,000.00	1,341.76	1088.63	29,253.13
company II	31,200.00	1,352.06	1171.21	31,380.85
company III	33,000.00	1,526.83	1238.78	33,288.04



รูปที่ 6 ต้นทุนวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศและตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการคำนวณค่าพลังงานความร้อนรายปีและการประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้อะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวยึดกลืนรังสีอาทิตย์ พบว่าค่าพลังงานความร้อนรายปีมีค่าเท่ากับ $1,117.9 \text{ kWh/m}^2$ ซึ่งเป็นค่าที่มีศักยภาพเทียบเท่าค่าพลังงานความร้อนรายปีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ สำหรับผลการประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิต พบว่าต้นทุนวัฏจักรชีวิตหลักของต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่นี้มาจากเงินลงทุนเริ่มต้น

(92.27%) โดยมีค่าต้นทุนวัฏจักรชีวิต (LCC) เท่ากับ 22,993 บาท ซึ่งมีค่าต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่จำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ในประเทศไทยนำเข้าจากต่างประเทศส่งผลให้ต้นทุนสูงตามไปด้วย ดังนั้น สรุปได้ว่าต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศรูปแบบใหม่ที่ประยุกต์ใช้แผ่นอะลูมิเนียมอะโนไดซ์เป็นตัวยึดกลืนรังสีอาทิตย์ มีศักยภาพทั้งทางด้านพลังงานความร้อนที่ผลิตได้รายปีและทางเศรษฐศาสตร์ ที่สามารถแข่งขันในด้านเทคนิคและเชิงพาณิชย์กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่จำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด เพื่อใช้เป็นระบบ

ผลิตพลังงานความร้อนหรือน้ำร้อนในภาคครัวเรือน
ภาคอุตสาหกรรมและอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัย
เพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.)-ปริญญานิพนธ์ ปี 2557
(MSD57I0148) และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัย
แห่งชาติ (วช.) ผ่านทุนงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัย
นเรศวร ประจำปี 2558 (R2558B006) ที่สนับสนุนทุนวิจัย
ตลอดทั้งโครงการ และขอขอบคุณบริษัท แอลเมทไทย
จำกัด สำหรับการเป็นผู้ร่วมให้ทุนและให้การสนับสนุน
ในการเตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมอะโนไดซ์ นอกจากนี้
ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน และภาควิชา
วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับความ
อนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัย เครื่องมือ และอุปกรณ์
ทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bureau of Solar Energy Development and Department of Alternative Energy Development and Efficiency. "Solar Energy Technology," [Online], Available from http://www.dede.go.th/dede/.../usr/.../solar%20energy%20technology_paper.pdf, Cited 7 April 2556.
- [2] J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, 3rd ed., Editor. 2006, Hoboken, N.J. Wiley, 2006.
- [3] C.E. Kennedy, "Review of Mid to High Temperature Solar Selective Absorber Materials," National Renewable Energy Laboratory (NREL). (Colorado, NREL/TP-520-31267), 2002.
- [4] S.A. Kalogirou, "Solar thermal collectors and applications," in Progress in Energy and Combustion Science, pp.231-295, 2004.
- [5] A. Wazwaz, J. Salmi and R. Bes, "The effects of nickel-pigmented aluminium oxide selective coating over aluminium alloy on the optical properties and thermal efficiency of the selective absorber prepared by alternate and reverse periodic plating technique," Energy Conversion and Management, vol.51, pp.1679-1683, 2010.
- [6] P. Nunocha, T. Suriwong and T. Threrujirapong, "Development and application of anodized aluminium for selective absorber in evacuated tube collector (ETC)," Naresuan University Journal: Science and Technology, vol.22, No.2, pp.75-84, 2557.
- [7] P. Nunocha and T. Suriwong, "Economic Evaluation of Applying Anodized Aluminium as Solar Absorber in Evacuated Tube Collector (ETC)," The 7th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-7), Rajamangala University Of Technology Rattanakosin Hua Hin campus Prachuapkhirikhan, 2557.
- [8] C. Sirisamphanwong, R. Ngoenmeesri, N. Ketjoy and W. Cham sa-ard, "Determination of Annual Energy Yield of Solar Collector", Naresuan University journal, vol.20, pp.16-23, 2555.
- [9] K. Kongcharoen and T. Jitsanguan, "Economic Analysis of Project Investment on Hot Water Production from Integrated Solar Energy System : Case Study of Klang Hospital, Rayong Province," The 44th Kasertsart University Annual Conference, Kasertsart University Bangkok, pp.644-651, 2549.
- [10] C. Suttibud, "Life cycle assessment and life cycle costing of Jatropha curcas biodiesel production," in Industrial Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 2552.

- [11] W. Malee, "Life cycle environmental and costing assessment of proton exchange membrane fuel cell stack", Master thesis, M. Eng., Chiang Mai University Chiang Mai, 2553.
- [12] Kasikorn Bank "Minimum Loan Rate", [Online], Available from <http://www.kasikornbank.com/TH/RatesAndFees/Lending/Pages/Lending.aspx>, Cited 19 February 2558.
- [13] Electricity Generating Authority of Thailand, "Solar resource map of Thailand (2542)", [Online], Available from http://www3.egat.co.th/re/egat_pv/sun_thailand.htm, Cited 25 August 2557.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความฉบับนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความขอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดีในโอกาสต่อไป

รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

ศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

รศ.ดร.ดุสิต ชลศึกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผศ.ดร.ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ผศ.ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ดร.เอกรินทร์ พงพิณิจนา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ผศ.ดร.ไชยา คำคำ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไป สำหรับประชาชน

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

รูปแบบในการพิมพ์บทความ

บทความที่เสนอควรจัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word (หรือซอฟต์แวร์อื่น ที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน) 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) เป็นคอลัมน์เดียว ส่วนที่สองกำหนดเป็น 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 | - ส่วนของเนื้อความในบทคัดย่อ
และส่วนของเนื้อความทั้งหมด
ขนาด 14 ตัวปกติ |
| - ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
ขนาด 14 ตัวปกติ | - คำว่า “Abstract”
ขนาด 16 ตัวหนา |
| - สถานที่ทำงาน
ขนาด 12 ตัวปกติ | - ส่วนของเนื้อความใน Abstract
ให้ใช้ Angsana UPC ขนาด 16 ตัวปกติ |
| - คำว่า “บทคัดย่อ”
ขนาด 16 ตัวหนา | |

- 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 ให้ใช้ระยะห่างบรรทัด เป็นหนึ่งบรรทัด (Single space) หรือ หนึ่งบรรทัดครึ่ง

ชื่อบทความ ชื่อผู้เขียน และสถานที่ทำงาน
ให้จัดพิมพ์ในตำแหน่งกลางหน้ากระดาษ

หัวข้อและหมายเลขหัวข้อ
ให้จัดพิมพ์แบบชิดซ้าย (Right Justified)

บทคัดย่อและเนื้อเรื่อง

ให้จัดพิมพ์แบบเต็มขอบ
(Left & Right Justified)

สมการ หรือ พจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor
(รวมอยู่ใน Microsoft Word แล้ว)
โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับสมการ
ซึ่งอยู่ในวงเล็บเล็ก

คำสำคัญ (Keywords)

ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้อง
กับบทความที่นำเสนอโดยให้จัดพิมพ์
ใต้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์

ติดต่อขอส่งได้ที่ ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์

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

บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

ติดต่อสอบถามข้อมูลได้ที่

งานบริหารการวิจัย (วิศวกรรมลาดกระบัง)
ชั้น 2 อาคาร 6 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทรศัพท์ / โทรสาร 02-329-8317

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.....

E-mail.....

เอกสารประกอบการส่งบทความ

บทความต้นฉบับ 1 ชุด และ

สำเนา 3 ชุด (พร้อมลบชื่อผู้แต่งและที่อยู่)

แบบฟอร์มสั่งซื้อวัสดุสารลาดกระบ้ง และ สมัครสมาชิก

ชื่อ.....นามสกุล.....

สถานที่จัดส่งหนังสือ.....

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

สมัครสมาชิกวัสดุสารลาดกระบ้ง

- | | | | |
|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|
| ☐ ปี 2554 | ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2557 | ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2555 | ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2558 | ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2556 | ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2559 | ค่าสมัคร 200 บาท |

หมายเหตุ ปีละ 4 ฉบับ (รวมค่าจัดส่ง)

ต้องการซื้อวัสดุสารลาดกระบ้ง

- | | |
|---|--|
| ☐ 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.....
- ☐ ธนาคารดีสั่งจ่ายในนาม แผนกตำรา
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบ้ง เขตลาดกระบ้ง
กรุงเทพมหานคร 10520 ที่ทำการเคาน์เตอร์บริการเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง 00016
- ☐ ผ่านบัญชีออมทรัพย์ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขาซอยเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบ้ง เขตลาดกระบ้ง
กรุงเทพมหานคร 10520
ชื่อบัญชี “แผนกตำราและประชาสัมพันธ์” เลขที่ 088 - 2 15272 - 2

ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานบริหารการวิจัย (วัสดุสารลาดกระบ้ง) ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบ้ง เขตลาดกระบ้งกรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2329-8000 ต่อ 3464, 3465

(ท่านสามารถแฟกซ์ใบสั่งซื้อ และเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่เบอร์แฟกซ์ : 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 which are not exceed 8 pages with two-columns (one copy with author names, three copies without author names) of either Thai or English are to be submitted in camera ready form. The page charge from the 9th page is 500 Baht per page. 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. Choeysuwan and S. Choomchuay, "The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic," Ladkrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltess, "Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

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

Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

Editorial Staff

Mr.Komol 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