

# วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

## SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เมษายน พ.ศ. 2564



## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 พ.ศ. 2563-2567 เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 1905-4548 เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review

## วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศม) มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรและเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

## เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลองครักษ์ อำเภอองครักษ์

จังหวัดนครนายก 26120

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej>

อีเมล [journalengswu@gmail.com](mailto:journalengswu@gmail.com)

## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

### ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติ สถาพรประสาธน์

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

### รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

|                                                  |                                                |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์        | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมอลิน             | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด               | สถาบันสิรินธรวิทยเมธี                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช               | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)            |
| ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย                | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| ศาสตราจารย์ ดร. พานิช วุฒิปุณฺณ                  | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์                | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อริศม ฤกษ์บุตร                 | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปริชาชาญ       | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์ | มหาวิทยาลัยมหิดล                               |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลรัญญ์ตระกูล           | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์               | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร            | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล                   | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง              | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี                         |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร               | มหาวิทยาลัยศิลปากร                             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์                 | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ                   | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                         |

### บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช

### หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

### กองบรรณาธิการ

|                                     |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล           | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์  | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ทิฆัมภ์ เจริญพงษ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |

|                                                  |                                                |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ                   | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์           | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์             | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ         | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีมรินทร์         | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| อาจารย์ ดร.สุธิดา ทีปรักษพันธ์                   | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| อาจารย์นาวิ รุจิตามพ์                            | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์       | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน             | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน พลัด               | สถาบันสิริวิทยเมธี                             |
| ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช               | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)            |
| ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย                | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| ศาสตราจารย์ ดร. พานิช วุฒิพฤษ                    | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภาแดง                | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร                 | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ       | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์ | มหาวิทยาลัยมหิดล                               |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลรักษ์ตระกูล           | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์               | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร            | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล                   | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง              | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี                         |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร               | มหาวิทยาลัยศิลปากร                             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์                 | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ                   | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                         |

#### ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

## บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลากว่า 15 ปี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณาถ้อยแถลงและประเมินคุณภาพตามกระบวนการจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับนี้ ได้นำเสนอบทความจำนวนทั้งสิ้น 9 บทความ เป็นบทความวิจัยจำนวน 8 บทความ และบทความวิชาการจำนวน 1 บทความ โดยบทความทั้งหมดเป็นผลงานวิจัยพื้นฐานและผลงานวิจัยประยุกต์ในสาขาต่างๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์ จากสาขาวิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งผลงานที่เผยแพร่ในครั้งนี้เป็นผลงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานและการแก้ปัญหาเชิงปฏิบัติการที่เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นเวทีทางวิชาการ ที่จะกระตุ้นการผลิตผลงานและแลกเปลี่ยนเรียนรู้ของนักวิจัย นักวิชาการและผู้อ่านทุกท่าน ทั้งนี้ เพื่อการมีส่วนร่วมในการสร้างสรรค์งานวิจัยอันจะเป็นการส่งเสริมการพัฒนาประเทศ ตามแนวนโยบายประเทศไทย 4.0 ในโอกาสนี้กองบรรณาธิการขอขอบคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการประเมินบทความ ให้ความเห็นที่เป็นประโยชน์ และมีส่วนร่วมในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานของวารสารฯ ฉบับนี้เสมอ สุดท้ายนี้หากมีข้อเสนอแนะประการใดทางกองบรรณาธิการฯ ยินดีรับฟังข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

บรรณาธิการวารสาร

บทความวิจัย

|                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| การประยุกต์ใช้ยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มในการผลิตอิฐดินซีเมนต์<br>Applications of Natural Latex as Additive for Soil Cement Block Production<br>สุดนิรันดร์ เพชรรัตน์ รุ่งอรุณ บุญถ่าน รุ่งโรจน์ ฤกษ์ห่วย                                                                               | 1  |
| การวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันภายใต้วิธีการประมาณจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันที่แม่นยำสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี<br>Performance Analysis of Tag Anti-Collision Algorithms Under Accurate the Number of Colliding Tag Estimation Method for RFID Systems<br>นรรัตน์ วัฒนมงคล | 14 |
| การออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเซิร์ชปรับตัว<br>The Controller Design of LEDs Intensity Using Adaptive TABU Search Method<br>หทัยรัตน์ ทศน์วรรณ กองพันธ์ อารีรักษ์ จิตติพร มะณีโกวา สุภาลัย อารีรักษ์                                            | 26 |
| การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซี่ลอจิก<br>The Maximum Power Point Tracking of Stand-alone Photovoltaic System Using Fuzzy Logic<br>กรกฎ คงสวัสดิ์ เทพพนม โสกาเพิ่ม                                                                               | 37 |
| การระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก<br>Electrical Vehicle Battery Cooling by Thermoelectric Cooling Module<br>บุญยวีร์ สุขสุสร สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาล นามผล                                                                            | 50 |
| การอบแห้งใบมะกรูดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล<br>Kaffir Lime Leaves Drying Using Far Infrared-Vacuum Technique<br>ศรีมา แจ้คำ กิตติศักดิ์ วีนันทกิตต์ เอกภูมิ บุญธรรม                                                                                                      | 59 |
| การออกแบบและพัฒนาเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสาน<br>Design and Development of Bamboo Craft Splitting and Slicing Machine<br>กล้าณรงค์ สุขใจ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์                                                                                                 | 71 |
| การพัฒนาและทดสอบเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง<br>Development and Testing of Lotus Seeds Peeling Machine<br>จตุรงค์ ลังกาพินธุ์ สุนัน ปานสาคร รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ มาสสุภา โพธิ์รอด                                                                                                       | 82 |
| ทบทวนการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ลิเทียมสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า<br>Review Thermal Management System of Battery for Electrical Vehicles<br>สราวุฒิ สิริเกษมสุข สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาล นามผล*                                                                                          | 93 |

## การประยุกต์ใช้ยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มในการผลิตอิฐดินซีเมนต์

### Applications of Natural Latex as Additive for Soil Cement Block Production

สุคนิรันดร์ เพชรรัตน์\* รุ่งอรุณ บุญถ่าน รุ่งโรจน์ ฤกษ์ห่วย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Sudniran Phetcharat\* Roongarun Buntan Rungroj Ruekrai

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering,

Srinakharinwirot University

\*Corresponding author: Email: sudniran@g.swu.ac.th

(Received: December 25, 2020; Accepted: February 17, 2021)

#### บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบต่อบรรยากาศของอิฐดินซีเมนต์ที่ใช้ยางพาราเป็นสารผสมเพิ่ม โดยทดสอบกับดินสองชนิดที่ต่างกัน คือ ดินลูกรังบดละเอียด และดินร่วนปนทราย เตรียมตัวอย่างอิฐดินซีเมนต์โดยใช้ยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มด้วยปริมาณที่ต่างกัน คือ ร้อยละ 0, 2, 4, 5, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ และเปรียบเทียบสมบัติของอิฐดินซีเมนต์กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.602/2547 ผลทดสอบพบว่าอิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินลูกรังบดละเอียดปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่าความต้านแรงอัดสูงสุด คือ 10.96 เมกะปาสกาล ซึ่งมากกว่าค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ที่ไม่มีน้ำยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 และมีสมบัติอื่นตามมาตรฐานของอิฐดินซีเมนต์รับน้ำหนัก ส่วนอิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินร่วนปนทรายที่ไม่มีจุดพลาสติก เมื่ออัดขึ้นรูปแล้วทำให้อิฐดินซีเมนต์มีการแตกร้าว เมื่อใช้ยางพาราร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำเป็นสารผสมเพิ่ม ทำให้อิฐดินซีเมนต์มีลักษณะทางกายภาพที่ดี ไม่เกิดการแตกร้าวภายหลังการอัดขึ้นรูป และมีคุณสมบัติตามเกณฑ์ของอิฐดินซีเมนต์ไม่รับน้ำหนัก การวิจัยนี้สรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพอิฐดินซีเมนต์ด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ ทำให้อิฐดินซีเมนต์มีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยมีความต้านแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และยางพารายังทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานช่วยให้สามารถอัดขึ้นรูปอิฐดินซีเมนต์โดยไม่แตกร้าว ซึ่งผลปรากฏชัดเจนในกรณีดินที่มีขนาดละเอียด โดยเฉพาะดินร่วนปนทราย แต่อย่างไรก็ตามสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผลิตเป็นสำคัญ

**คำสำคัญ:** อิฐดินซีเมนต์ น้ำยางพารา วัสดุก่อสร้าง ดินลูกรัง ดินร่วนปนทราย

#### ABSTRACT

This article aims to study the impacts on the soil cement block from using natural latex additive as an admixture. Experiments were performed on soil cement blocks using two different types of soil, laterite and sandy loam. The soil cement block samples were prepared using different volumes of natural latex as admixture at 0, 2, 4, 5, 6, 8 and 10 percent by weight of water. The properties of soil

cement blocks were assessed against Thai Community Product Standards, TCPS 602/2547. The results found that the soil cement blocks produced using finely crushed laterite enhanced with 5 percent of natural latex additive had the highest compressive strength at 10.96 MPa. This was significantly higher than the compressive strength of soil cement block without additive at the level of 0.05 and consists of all the other properties according to the standard of the load-bearing bricks. The soil cement block that uses sandy loam which has no plastic limit properties, showed crack failures after press processed. The sample was improved using 5 percent natural latex then the property of the enhanced soil cement block showed improved properties and physical characteristics, there was no more crack failure and the product consisted of all the required characteristics of non-load bearing bricks. The analysis of the results from this research indicated that the mechanical properties of soil cement blocks were improved with added natural latex at 5 percent, it has statistically significant higher compression strength. The natural latex was also acted as the binding agent which enabled the soil cement block to be press processed without cracks. This was clearly evident for cases where the soil were well graded mixture, especially for sandy loam. However, the properties of soil cement blocks were primarily dependent on the type of soil and the volume of cement used in the production process.

**Keyword:** Soil Cement Block, Natural Latex, Construction Material, Laterite, Sandy Loam

## 1. บทนำ

ยางพาราเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่กำลังประสบปัญหาการตกต่ำต่อเนื่องมาหลายปี เนื่องจากปัจจัยด้านอุปสงค์และอุปทานไม่สมดุลกัน โดยแนวโน้มอุปทานของยางพาราขยายตัวในอัตราเร่งเพิ่มขึ้น จากการเพิ่มพื้นที่ปลูกยางในเอเชีย โดยเฉพาะประเทศไทย กัมพูชา ลาว พม่า และเวียดนาม ในขณะที่แนวโน้มอุปสงค์ขยายตัวในอัตราที่ลดลง [1] ซึ่งมีสาเหตุหลักเนื่องจากเทคโนโลยีในการพัฒนายางสังเคราะห์มีความก้าวหน้ามากขึ้น จึงสามารถใช้อย่างสังเคราะห์ในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นในการผลิตยางรถยนต์ [2] และอุตสาหกรรมรถยนต์มีการเติบโตค่อนข้างน้อย นอกจากนี้ ราคายางปรับตัวลดลงโดยได้รับอิทธิพลจากตลาดล่วงหน้าต่างประเทศ จากความกังวลเกี่ยวกับชะลอตัวของเศรษฐกิจโลก การแข็งค่าของค่าเงินบาทเมื่อเทียบกับดอลลาร์สหรัฐ [3] และยังไม่มีการปรับขึ้นราคาของยางรถยนต์ขึ้นอย่างเป็นรูปธรรม รัฐบาลไทยจึงมีนโยบายสนับสนุนงานวิจัยที่นำยางพาราไปใช้

ประโยชน์ เพื่อเพิ่มอุปสงค์ยางพาราภายในประเทศ โดยแนวทางการวิจัยที่ประยุกต์ใช้ยางพาราเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุก่อสร้างนั้นมีข้อพิจารณาจากสมบัติการเป็นโพลิเมอร์ของยางพารา ซึ่งเป็นโพลิเมอร์จากธรรมชาติที่มีราคาถูกกว่าโพลิเมอร์สังเคราะห์

โพลิเมอร์มีสมบัติเป็นสารหน่วงการใช้น้ำ มีความเหนียวและทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน จึงสามารถใช้เป็นสารผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ โดยมีรายงานการวิจัยที่แสดงผลการปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ด้วยโพลิเมอร์เคมโรด ร้อยละ 5 สามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ [4] วัสดุมวลรวมพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 3.5 และโพลิเมอร์เคมโรด ร้อยละ 5 มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 18 และกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 13 [5] การปรับปรุงวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างทางด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และโพลิเมอร์ ช่วยเพิ่มกำลังอัดของวัสดุประเภทลูกรังและหินคลุกสำหรับใช้ใน

งานโครงสร้างชั้นทางได้เป็นอย่างดี โดยใช้ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม ผสมกับโพลิเมอร์ ร้อยละ 3-5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ [6] จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาแสดงถึงแนวทางการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ด้วยสารผสมเพิ่มประเภทโพลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้ผลที่ดี

อย่างไรก็ตาม โพลิเมอร์สังเคราะห์มีราคาแพง จึงพิจารณาแนวทางเพื่อลดต้นทุน โดยการประยุกต์ใช้น้ำยางพาราทดแทนเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุก่อสร้างที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ เช่น การใช้น้ำยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงสมบัติของดินในด้านการรับกำลังแรงอัดในแนวแกนและแรงเฉือน เพื่อใช้ในการป้องกันดินถล่ม [7] การประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติผสมดินซีเมนต์ เพื่อลดการรั่วซึมของน้ำ [8] และการสร้างถนนตัวอย่างที่มียางพาราเป็นส่วนผสม [9] ซึ่งจากการวิจัยที่ผ่านมาแสดงผลการปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพาราสำหรับเป็นวัสดุรองพื้นทาง และวัสดุพื้นทางที่ได้ผลที่ดี ค่อนข้างดี เช่น ป้องกันการซึมผ่านน้ำได้ถนนได้ดี เพิ่มความยืดหยุ่นของถนน ทำให้ถนนแข็งแรง มีความคงทนรับน้ำหนักได้ดี ซึ่งจากข้อดีของการใช้น้ำยางพาราปรับปรุงสมบัติของดินซีเมนต์สำหรับวัสดุการทางแล้ว จึงเป็นข้อพิจารณาในการนำยางพารามาใช้ปรับปรุงสมบัติของอิฐดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างอาคาร

อิฐดินซีเมนต์ (Soil Cement Block) หรือบล็อกประสาน (Interlocking Block) เป็นวัสดุก่อที่อัดขึ้นรูปดินซีเมนต์ด้วยบล็อกเหล็กเพื่อให้คงรูปตามขนาดที่ต้องการ โดยส่วนใหญ่เป็นการผลิตในอุตสาหกรรมครัวเรือน มีขั้นตอนการผลิตไม่ยุ่งยากไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงในการผลิต จึงประหยัดพลังงานจากการเผาไหม้ ดินหลายแห่งในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยมีสมบัติเหมาะสมสำหรับการผลิตอิฐดินซีเมนต์ มีสีสวยงามแตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพของดินแต่ละแห่ง อิฐดินซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่ช่วยลดต้นทุนก่อสร้างได้ประมาณร้อยละ 15 - 20 ของอาคารที่มีพื้นที่ในการใช้สอยเท่ากัน [10] เนื่องจากช่วยลดปริมาณวัสดุก่อสร้าง ลดงานตกแต่งผิว ลดระยะเวลาก่อสร้าง และช่วยประหยัดค่าแรงในการก่อสร้าง

แต่การใช้งานอิฐดินซีเมนต์ยังไม่แพร่หลายนัก เนื่องจากเป็นวัสดุที่ผลิตในครัวเรือน จึงมีคุณภาพและสมบัติที่หลากหลายแตกต่างกันตามแหล่งผลิต เป็นวัสดุที่มีมวลมาก และมีค่าการซึมผ่านน้ำสูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน ที่ผ่านมามีการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิฐดินซีเมนต์ ให้มีความสำคัญกับการทดสอบสมบัติเชิงวิศวกรรมของอิฐดินซีเมนต์ [11], [12] การผลิตอิฐดินซีเมนต์ด้วยวัสดุประเภทปอชโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้ากะลาปาล์ม ทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนการผลิต [13], [14] เพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนและลดน้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ด้วยเยื่อกระดาษเหลือทิ้ง [15] งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงแนวทางการวิจัยที่มุ่งปรับปรุงสมบัติของอิฐดินซีเมนต์นั้น มีอย่างต่อเนื่อง

สำหรับการวิจัยนี้ ให้ความสำคัญกับการใช้น้ำยางพาราให้เกิดประโยชน์ โดยมุ่งเน้นศึกษาผลจากการใช้น้ำยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ โดยแสดงขั้นตอนการผลิตอิฐดินซีเมนต์ และเทคนิคในการใช้น้ำยางพาราปรับปรุงสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ โดยใช้ดินตัวอย่างสองชนิดที่แตกต่างกัน คือ ดินลูกรังบดละเอียดจากแหล่งดินในจังหวัดนครนายก และดินร่วนปนทรายจากแหล่งดินในจังหวัดนครราชสีมา โดยประเมินผลทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.602/2547 [16] การวิจัยนี้จึงเป็นอีกหนึ่งโครงการที่ศึกษาเพื่อขยายขอบเขตการใช้ประโยชน์จากน้ำยางพารา ซึ่งเป็นผลดีต่อเกษตรกรผู้ปลูกยางพาราอีกวิธีหนึ่งด้วย

## 2. วัสดุและวิธีการวิจัย

### 2.1 วัสดุการวิจัย

การวิจัยนี้ผลิตอิฐดินซีเมนต์ตัวอย่างจากดินลูกรังบดละเอียดจากแหล่งดินในเขตจังหวัดนครนายก และดินร่วนปนทรายจากแหล่งดินในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งดินทั้งสองชนิดมีที่ลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน ดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ใช้น้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์สำหรับงานโครงสร้างอาคาร น้ำยางพาราที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพอิฐดินซีเมนต์เป็นน้ำยางชั้น 60%

รักษาสภาพแบบแอมโมเนียสูง (HA) มีสมบัติทางกายภาพ ดังตารางที่ 1 และโปรตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ใน รูปแบบของสารละลายความเข้มข้น 10 %



รูปที่ 1 ดินลูกรังบดละเอียด  
จากแหล่งดินในจังหวัดนครนายก



รูปที่ 2 ดินร่วนปนทราย  
จากแหล่งดินในจังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของน้ำยางชั้นรักษาสภาพ ด้วยแอมโมเนีย

| Physical Property                   | Results   |
|-------------------------------------|-----------|
| Total Solids Content %              | 61.50 Min |
| Dry Rubber Content %                | 60.00 Min |
| Non-Rubber Content %                | 2.00 Max  |
| Ammonia Content (on total weight) % | 0.65-0.75 |
| pH Value                            | 11.00 Max |
| KOH Number                          | 0.85 Max  |
| Volatile Fatty Acid Number          | 0.05 Max  |
| M.S.T. @ 55% TS., Sec.              | 650 Min   |
| Specific Gravity at 25° C           | 0.94 Min  |
| Magnesium Content (on solids), ppm  | 60.00 Max |

## 2.2 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

การทดสอบเบื้องต้น เพื่อประเมินความเหมาะสมของ ดินในการใช้ผลิตอิฐดินซีเมนต์ ด้วยการทดสอบหรร้อยละ โดยปริมาตรของส่วนมวลละเอียดของดิน โดยนำดินใส่ใน กระบอกตวงแล้วเติมน้ำให้เต็มเขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้รอ จนดินตกตะกอนทั้งหมดและน้ำใส ดังรูปที่ 3 วัดขนาดของ ดินแต่ละชั้นที่ตกตะกอน และคำนวณอัตราส่วนโดย ปริมาตรของดินแต่ละชั้น จากนั้นทดสอบสมบัติทาง วิศวกรรมของดิน ประกอบด้วย การหาค่าพิกัดเหลวและ พิกัดพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM: D 2487 การหาค่า การกระจายตัวของเม็ดดิน ตามมาตรฐาน ASTM: D 422 และการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตาม มาตรฐาน ASTM: D 1557 จากนั้น เปรียบเทียบสมบัติของ ดินกับเกณฑ์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงเลขที่ ทล.-ม. 206/2532 มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ [17]



รูปที่ 3 การทดสอบอัตราส่วนมวลละเอียดของดิน

## 2.3 การเตรียมตัวอย่างอิฐดินซีเมนต์

การเตรียมตัวอย่างอิฐดินซีเมนต์ที่มียางพาราเป็น ส่วนผสมแตกต่างกัน 7 เงื่อนไขการทดลอง คือ ยางพารา ร้อยละ 0, 2, 4, 5, 6, 8 และ 10 ของน้ำหนักวัสดุผสมรวม โดยมีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างอิฐดินซีเมนต์ดังนี้

1. ตากดินให้แห้ง
2. ชั่งน้ำหนักดิน ทราย ปูนซีเมนต์ โดยเตรียม ส่วนผสมทั้งหมดไว้ในภาชนะผสม และผสมส่วนผสมทั้งหมด

ให้เข้ากัน (ส่วนผสมในการผลิตอิฐดินซีเมนต์นั้นจะได้จาก ผลการทดลอง โดยส่วนผสมของอิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดิน ลูกรีบดละเอียด แสดงดังตารางที่ 4 ส่วนการผลิตอิฐดิน ซีเมนต์จากดินร่วนปนทรายจะใช้อัตราส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์และยางพาราเช่นเดียวกับอิฐดินซีเมนต์ที่ผลิต จากดินลูกรีบดละเอียด)

3. วัดค่า PH ของน้ำ และของน้ำยางพารา ปรับค่า ความเป็นต่างของน้ำให้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำยางพารา ( $PH \approx 11$ ) โดยใช้สารละลายโปรตัสเซียมไฮดรอกไซด์ผสม น้ำ จากนั้นผสมน้ำยางพารากับน้ำตามปริมาณที่กำหนดไว้ ของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

4. นำของเหลวที่เตรียมไว้ในข้อที่ 3 มาผสมกับวัสดุ มวลรวมที่ผสมไว้แล้วในภาชนะผสม

5. นำส่วนผสมทั้งหมดมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดอิฐ ดินซีเมนต์

6. บ่มอิฐดินซีเมนต์ โดยผึ่งตัวอย่างในที่ร่ม 1 วัน จากนั้นพรมด้วยน้ำให้ชุ่ม นำตัวอย่างใส่ถุงพลาสติก วางไว้ในที่ร่ม และบ่ม 28 วัน

#### 2.4 การทดสอบสมบัติของอิฐดินซีเมนต์

การทดสอบสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ ประกอบด้วย การ ทดสอบความต้านแรงอัดและการทดสอบการดูดกลืนน้ำ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 109-2517 วิธีการชักตัวอย่างและการทดสอบวัสดุงานก่อซึ่งทำด้วย คอนกรีต [18]

#### 2.5 การวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลการทดสอบความต้านแรงอัด และการ ดูดกลืนน้ำกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน อิฐบล็อกประสาน มผช.602/2547 [16] โดยในกรณีที่เป้นอิฐรับน้ำหนักมีค่า ความต้านแรงอัดไม่น้อยกว่า 7 เมกะปาสคาล ส่วนอิฐไม่รับ น้ำหนักมีค่าความต้านแรงอัดไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะปาสคาล และการดูดกลืนน้ำ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานชนิดรับ น้ำหนักตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.602/2547

| น้ำหนักอิฐบล็อกประสาน<br>เมื่ออบแห้ง<br>(กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) | การดูดกลืนน้ำสูงสุด<br>เฉลี่ยจากอิฐบล็อกประสาน 5 ก้อน<br>(กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1,680 และน้อยกว่า                                               | 288                                                                              |
| 1,681 ถึง 1,760                                                 | 272                                                                              |
| 1,761 ถึง 1,840                                                 | 256                                                                              |
| 1,841 ถึง 1,920                                                 | 240                                                                              |
| 1,921 ถึง 2,000                                                 | 224                                                                              |
| มากกว่า 2,000                                                   | 208                                                                              |

การเปรียบเทียบทางสถิติ เพื่อวิเคราะห์ว่ายางพารามี ผลต่อสมบัติของอิฐดินซีเมนต์หรือไม่ ด้วยการทดสอบสมมติ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากร แบบจับคู่ (Paired test) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกรณีที่ตัวอย่างมีปัจจัยในการ ผลิตคล้ายคลึงกัน โดยทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ สมบัติอิฐดินซีเมนต์ที่ทดสอบ ประกอบด้วย ค่าความ หนาแน่นแห้ง ค่าความต้านแรงอัด และค่าการดูดกลืนน้ำ โดยเป็นการทดสอบแบบทางเดียว และกำหนดสมมติฐาน คือ

$H_0$ : ค่าเฉลี่ยของสมบัติที่ทดสอบของอิฐดินซีเมนต์ กลุ่มที่ 1 ไม่แตกต่างจากกลุ่มที่ 2 ( $\mu_1 = \mu_2$ )

$H_1$ : ค่าเฉลี่ยของสมบัติที่ทดสอบของอิฐดินซีเมนต์ กลุ่มที่ 1 มากกว่าหรือน้อยกว่ากลุ่มที่ 2 ( $\mu_1 > \mu_2$  หรือ  $\mu_1 < \mu_2$ )

โดยที่  $\mu_1$  หมายถึง ค่าเฉลี่ยของสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา

$\mu_2$  หมายถึง ค่าเฉลี่ยของสมบัติของอิฐดินซีเมนต์

การปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  และยอมรับ  $H_1$  เมื่อค่า Sig. หรือ p-Value < 0.05 โดยจะเป็นกรณีที่ค่าเฉลี่ยของสมบัติ อิฐดินซีเมนต์กลุ่มที่ 1 มากกว่ากลุ่มที่ 2 เมื่อค่า  $t > 0$  และ จะเป็นกรณีที่ค่าเฉลี่ยของสมบัติอิฐดินซีเมนต์กลุ่มที่ 1 น้อย กว่ากลุ่มที่ 2 เมื่อค่า  $t < 0$

### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 การทดสอบสมบัติของดินลูกรังบดละเอียด และ อัตราส่วนในการผลิตอิฐดินซีเมนต์

จากการทดสอบหาอัตราส่วนมวลละเอียดของดินลูกรังบดละเอียด พบว่า มีอัตราส่วนมวลละเอียด ร้อยละ 29 โดยปริมาตร อัตราส่วนตะกอนแข็ง ร้อยละ 71 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นดินที่มีอัตราส่วนมวลละเอียดมากกว่าร้อยละ 15 โดยปริมาตร ดังนั้น ดินลูกรังบดละเอียดนี้จึงไม่เหมาะสมในการผลิตอิฐดินซีเมนต์ จึงต้องทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการเพื่อหาแนวการปรับปรุงส่วนผสมดินลูกรังบดละเอียดนี้ ให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการผลิตอิฐดินซีเมนต์ โดยแสดงผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังบดละเอียด จากแหล่งดินในเขตจังหวัดนครนายก

| Engineering Property                     | Test Results            |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Liquid Limit (L.L.)                      | 36.1%                   |
| Plastic Limit (P.L.)                     | 24.7%                   |
| Plastic Index (P.I.)                     | 11.3%                   |
| Optimum Moisture Content (OMC)           | 12.4 %                  |
| Maximum Dry Density ( $\lambda_{dmax}$ ) | 1.794 g/cm <sup>3</sup> |
| เม็ดดินขนาดโตที่สุด                      | < 9.5 mm                |
| มวลส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200            | 44.13 %                 |

เปรียบเทียบสมบัติของดินลูกรังบดละเอียดกับเกณฑ์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงเลขที่ ทล.-ม.206/2532 มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ [17] พบว่า ตัวอย่างดินมีค่าพิกัดเหลว 36.1% ค่าพิกัดพลาสติก 24.7% และค่าดัชนีความเหลว 11.3% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดไว้คือ ค่าพิกัดเหลวไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลการทดสอบขนาดคละของดิน วัสดุมวลรวมนี้มีขนาดเม็ดโตที่สุดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (ตะแกรงเบอร์ 200) 44.13% ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ 40% ดังนั้น ตัวอย่างดินนี้มีความคละไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตอิฐดินซีเมนต์เนื่องจาก

มีส่วนของมวลละเอียดมากกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งในเบื้องต้นได้ผลิตอิฐดินซีเมนต์จากดินลูกรังบดละเอียดโดยใช้อัตราส่วนของดินต่อน้ำซีเมนต์เท่ากับ 6:1 โดยแสดงอิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินลูกรังบดละเอียด ดังรูปที่ 4 ซึ่งลักษณะทางกายภาพของอิฐดินซีเมนต์มีผิวภายนอกหยาบ ขรุขระ จึงไม่เหมาะสมกับการใช้เป็นวัสดุก่อ



รูปที่ 4 อิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินลูกรังบดละเอียด

จากผลการทดสอบสมบัติของดินและการทดลองผลิตอิฐดินซีเมนต์จากดินลูกรังบดละเอียด สามารถยืนยันว่า ตัวอย่างดินชนิดนี้ยังไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตอิฐดินซีเมนต์ จึงต้องปรับขนาดคละด้วยทรายเพื่อให้ดินลูกรังมีส่วนละเอียดน้อยลง ด้วยอัตราส่วนระหว่างดินลูกรังบดละเอียด : ทราย เท่ากับ 7 : 2 ซึ่งทำให้ดินตัวอย่างมีอัตราส่วนมวลของแข็ง ร้อยละ 76 โดยประมาณ เมื่อผลิตอิฐดินซีเมนต์จากดินที่ปรับขนาดคละแล้วทำให้มีลักษณะทางกายภาพที่ดี มีผิวเรียบสวยงาม ไม่แตกร้าว ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินลูกรังบดละเอียด ที่ปรับขนาดคละด้วยทรายละเอียด

จากผลการทดสอบเบื้องต้นดังกล่าว จึงได้ข้อสรุปของอัตราส่วนในการผลิตอิฐดินซีเมนต์ คือ อัตราส่วนระหว่างดินลูกรังบดละเอียดต่อทราย เท่ากับ 7:2 อัตราส่วนระหว่างดินตอปูนซีเมนต์ เท่ากับ 6 : 1 และปริมาณน้ำ ร้อยละ 10.48 (ปริมาณน้ำจากการทดสอบการขึ้นรูปอิฐดินซีเมนต์ ซึ่งน้อยกว่าปริมาณความชื้นที่ Optimum Moisture Content)

### 3.2 การผลิตอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารา (ดินลูกรังบดละเอียด)

การวิจัยนี้ ได้ทดลองปรับปรุงคุณภาพอิฐดินซีเมนต์ด้วยน้ำยางพาราในปริมาณที่แตกต่างกัน 7 เงื่อนไขการทดลอง คือ ร้อยละ 0, 2, 4, 5, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ แสดงส่วนผสมของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ดังตารางที่ 4 ทั้งนี้ ในขั้นตอนการผลิตอิฐดินซีเมนต์ก่อนการอัดขึ้นรูป พบลักษณะของวัสดุผสมที่ผสมกับน้ำยางพาราแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีความแตกต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างวัสดุผสมที่ผสมยางพาราร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ ดังรูปที่ 6-8 ตามลำดับ พบว่า วัสดุผสมจับตัวรวมกับยางพาราที่มีลักษณะคล้ายกากเป็นก้อนมวลรวมผสมกับยางพารา ซึ่งมีจำนวน และขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางพาราในส่วนผสม โดยเฉพาะกรณีที่ผสมยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ ดังรูปที่ 8 ซึ่งพบว่ามวลรวมจับตัวรวมกับยางพาราเป็นก้อนขนาดใหญ่ จำนวนมากกว่ากรณีอื่นในการทดลองนี้ แต่เมื่อนำวัสดุผสมไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดอิฐดินซีเมนต์แบบใช้แรงคนก็สามารถอัดขึ้นรูปได้ทุกกรณี และอิฐดินซีเมนต์ที่ได้มีลักษณะภายนอกที่ดี มีผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 6 วัสดุผสมดินซีเมนต์กับน้ำก่อนอัดขึ้นรูป



รูปที่ 7 วัสดุผสมดินซีเมนต์กับน้ำยางพารา ร้อยละ 5



รูปที่ 8 วัสดุผสมดินซีเมนต์กับน้ำยางพารา ร้อยละ 10



รูปที่ 9 ลักษณะทางกายภาพของอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา (กรณีดินลูกรังบดละเอียด)

ตารางที่ 4 ส่วนผสมในการผลิตตัวอย่างอิฐดินซีเมนต์จากดินลูกรังบดละเอียด

| ตัวอย่าง                                                                                                                                                                                 | ปริมาณส่วนผสมวัสดุรวม<br>(กิโลกรัม) |                 |                           | ปริมาณของเหลว<br>(กิโลกรัม) |                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|
|                                                                                                                                                                                          | ดินลูกรัง<br>บดละเอียด              | ทราย<br>ละเอียด | ปูนซีเมนต์<br>ประเภทที่ 1 | น้ำ                         | น้ำยางพารา<br>(60.80 %) |
| 1 อิฐดินซีเมนต์                                                                                                                                                                          | 14                                  | 4               | 3                         | 2.20                        | 0                       |
| 2 อิฐดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 2                                                                                                                                              | 14                                  | 4               | 3                         | 2.13                        | 0.07                    |
| 3 อิฐดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 4                                                                                                                                              | 14                                  | 4               | 3                         | 2.06                        | 0.14                    |
| 4 อิฐดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 5                                                                                                                                              | 14                                  | 4               | 3                         | 2.02                        | 0.18                    |
| 5 อิฐดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 6                                                                                                                                              | 14                                  | 4               | 3                         | 1.98                        | 0.22                    |
| 6 อิฐดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 8                                                                                                                                              | 14                                  | 4               | 3                         | 1.91                        | 0.29                    |
| 7 อิฐดินซีเมนต์ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 10                                                                                                                                             | 14                                  | 4               | 3                         | 1.84                        | 0.36                    |
| วัสดุรวมรวม 22 กิโลกรัม ปริมาณของเหลว 2.2 กิโลกรัม ปริมาณความชื้น 10.45 % wt.                                                                                                            |                                     |                 |                           |                             |                         |
| หมายเหตุ ปริมาณยางพาราในของเหลวคำนวณจากปริมาณเนื้อยางพาราในน้ำยาง ร้อยละ 60.8 (ทดสอบด้วยการอบแห้ง)<br>ปรับค่า PH ของน้ำให้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำยางพาราด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์ก่อนผสมน้ำยาง |                                     |                 |                           |                             |                         |

### 3.3 สมบัติของอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา

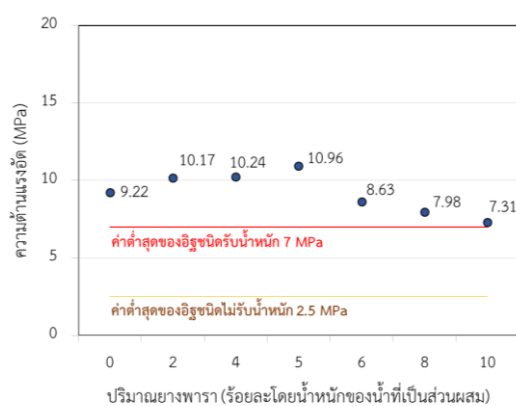
ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งของอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยยางพารา ดังตารางที่ 5 พบว่า ตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1.762 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่างอื่นที่มีค่าความหนาแน่นแห้ง 1.941-1.959 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 5 ความหนาแน่นแห้งของอิฐดินซีเมนต์ (ดินลูกรังบดละเอียด)

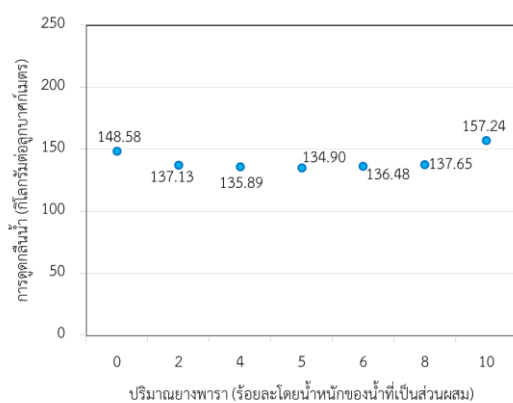
| ปริมาณยางพารา<br>(ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำ) | ความ<br>หนาแน่นแห้ง<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | จำนวน<br>ตัวอย่าง |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------|
| ร้อยละ 0                                  | 1.943                                       | 10                |
| ร้อยละ 2                                  | 1.945                                       | 3                 |
| ร้อยละ 4                                  | 1.946                                       | 3                 |
| ร้อยละ 5                                  | 1.959                                       | 10                |
| ร้อยละ 6                                  | 1.957                                       | 3                 |
| ร้อยละ 8                                  | 1.941                                       | 3                 |
| ร้อยละ 10                                 | 1.762                                       | 3                 |

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นคาดว่าลักษณะมวลรวมก่อนการอัดขึ้นรูปของอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ มีก้อนมวลรวมผสมกับยางพาราขนาดใหญ่ และจำนวนมากกระจายอยู่ในวัสดุรวมรวมก่อนการอัดขึ้นรูป ดังรูปที่ 8 ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นการขัดขวางการแทรกซึมของส่วนผสมในขณะอัดขึ้นรูป จึงอาจทำให้มีความหนาแน่นต่ำเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นที่มวลรวมจับตัวกับยางพาราเป็นก้อนขนาดเล็กและจำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ

ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 10 พบว่า อิฐดินซีเมนต์มีความต้านแรงอัด ตั้งแต่ 7.31-10.96 เมกะปาสคาล ซึ่งมากกว่า 7 เมกะปาสคาลทุกเงื่อนไขการทดลอง ดังนั้น จึงจัดเป็นอิฐดินซีเมนต์ชนิดรับน้ำหนัก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน แต่ทั้งนี้ พบว่า เงื่อนไขที่ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ มีความต้านแรงอัด 10.96 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่นในการทดลองนี้ ส่วนผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐดินซีเมนต์ทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าการดูดกลืนน้ำตามมาตรฐานอิฐชนิดรับน้ำหนัก ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ความต้านแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์



รูปที่ 11 การดูดกลืนน้ำของอิฐดินซีเมนต์

จากผลการทดสอบความต้านแรงอัด และการดูดกลืนน้ำที่ทุกเงื่อนไขการทดลองมีคุณลักษณะที่ต้องการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.602/2547 ประเภทอิฐรับ

น้ำหนัก และมีข้อพิจารณาว่า อิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำมีสมบัติที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ โดยมีความหนาแน่นแห้งสูงที่สุด ค่าการดูดกลืนน้ำต่ำที่สุด และมีค่ากำลังรับอัดสูงสุด โดยค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.87 เมื่อเทียบกับตัวอย่างอิฐดินซีเมนต์ ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา

### 3.4 การทดสอบทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบผลของยางพาราต่อสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ (ดินลูกรังบดละเอียด)

การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของอิฐดินซีเมนต์และอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา โดยใช้กระบวนการทางสถิติเพื่อทดสอบความต่างของค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นแห้ง ความต้านแรงอัด และการดูดกลืนน้ำระหว่างอิฐดินซีเมนต์กับอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ ด้วยการทดสอบสมมติผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากร แบบจับคู่ (Paired test) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบทีละคู่ของตัวอย่างอิฐดินซีเมนต์ที่ผลิต ผึ่งให้แห้ง บ่ม และทดสอบในวันเดียวกัน จึงมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของอิฐดินซีเมนต์คล้ายคลึงกัน โดยแสดงผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติผลต่างของค่าเฉลี่ยแบบจับคู่ของความหนาแน่นแห้งในตารางที่ 6 ความต้านแรงอัด ในตารางที่ 7 และการดูดกลืนน้ำ ในตารางที่ 8

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ยแบบจับคู่ (Paired Test) ของค่าความหนาแน่นแห้ง

|                                                 | Mean (g/cm <sup>3</sup> ) | S.D.    | N  | t-value | Sig.  |
|-------------------------------------------------|---------------------------|---------|----|---------|-------|
| อิฐดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 5 | 1.9585                    | 0.12806 | 10 | 1.565   | 0.152 |
| อิฐดินซีเมนต์                                   | 1.9428                    | 0.11707 | 10 |         |       |

ตารางที่ 7 ผลทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ยแบบจับคู่ (Paired Test) ของค่าความต้านแรงอัด

|                                                 | Mean (MPa) | S.D.    | N  | t-value | Sig.  |
|-------------------------------------------------|------------|---------|----|---------|-------|
| อิฐดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 5 | 10.9579    | 2.03099 | 14 | 2.398   | 0.032 |
| อิฐดินซีเมนต์                                   | 9.2150     | 1.65932 | 14 |         |       |

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบผลต่างค่าเฉลี่ยแบบจับคู่ (Paired Test) ของค่าการดูดกลืนน้ำ

|                                                 | Mean (g/cm <sup>3</sup> ) | S.D.      | N  | t-value | Sig.  |
|-------------------------------------------------|---------------------------|-----------|----|---------|-------|
| อิฐดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 5 | 0.13490                   | 0.0223779 | 10 | -1.603  | 0.143 |
| อิฐดินซีเมนต์                                   | 0.14858                   | 0.0301717 | 10 |         |       |

จากเปรียบเทียบสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ และอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ ด้วยกระบวนการทางสถิติ โดยพิจารณาที่ค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 (Significant; Sig.=0.05) พบว่าทั้งสองเงื่อนไขการทดลอง ความหนาแน่นแห้ง และการดูดกลืนน้ำไม่แตกต่างในทางสถิติ แต่อิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยยางพาราร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ มีความต้านแรงอัดมากกว่าอิฐดินซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 โดยพิจารณาจากค่า Sig.=0.032 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า t มีค่าเป็นบวก

### 3.5 การประยุกต์ใช้ยางพาราในการปรับปรุงคุณภาพอิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินร่วนปนทราย

การวิจัยในส่วนนี้แสดงผลจากการใช้ยางพาราเพื่อปรับปรุงคุณภาพอิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินร่วนปนทรายจากแหล่งดินในจังหวัดนครราชสีมา โดยในเบื้องต้นได้ทดสอบหาอัตราส่วนมวลละเอียด พบว่า ตัวอย่างดินร่วนปนทรายมีส่วนตะกอนของแข็ง ร้อยละ 93 และส่วนมวลละเอียด ร้อยละ 7 จึงเป็นดินที่มีส่วนของมวลละเอียดค่อนข้างน้อย จากนั้น ทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดิน ทดสอบค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดิน และการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด และความหนาแน่นแห้งสูงสุด พบว่า ดินร่วนปนทรายนี้มีขนาดเม็ดโตที่สุดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร และมีส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (ตะแกรงเบอร์ 200) 20.15% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน [17] ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 40% ดังนั้นดินร่วนปนทรายนี้จึงจัดว่าเป็นดินที่มีขนาดละเอียดดี แต่เป็นดินที่ไม่มีจุดพลาสติก แสดงผลทดสอบดังตารางที่ 9

ทั้งนี้เมื่อทดลองผลิตอิฐดินซีเมนต์โดยใช้อัตราส่วนระหว่างดินร่วนปนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 6:1 และปริมาณความชื้น ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม พบว่า อิฐดินซีเมนต์มีการแตกร้าวภายหลังการอัดขึ้นรูปลักษณะดังรูปที่ 12 ดังนั้น จึงทดลองปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ยางพารา ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ พบว่า อิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพาราร้อยละ 5

โดยน้ำหนักของน้ำ มีลักษณะกายภาพที่ดี ผิวเรียบ และไม่มียอยแตกร้าว ดังรูปที่ 13 ส่วนอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ มีรอยแตกจากการปูดบวม ดังรูปที่ 14 ลักษณะดังกล่าวย่อมเป็นผลเสียต่อความแข็งแรงของอิฐดินซีเมนต์ ดังนั้น สำหรับการผลิตอิฐดินซีเมนต์จากตัวอย่างดินร่วนปนทรายนี้ จึงไม่ควรปรับปรุงคุณภาพอิฐดินซีเมนต์ด้วยยางพารา ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ

ตารางที่ 9 สมบัติทางวิศวกรรมของดินร่วนปนทราย จากแหล่งดินในเขตจังหวัดนครราชสีมา

| Engineering Property                     | Test Results            |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Liquid Limit (L.L.)                      | Non Plastic             |
| Plastic Limit (P.L.)                     | Non Plastic             |
| Plastic Index (P.I.)                     | Non Plastic             |
| Optimum Moisture Content (OMC)           | 3.9 %                   |
| Maximum Dry Density ( $\lambda_{dmax}$ ) | 1.665 g/cm <sup>3</sup> |
| เม็ดดินขนาดโตที่สุด                      | < 2.0 mm                |
| มวลส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200            | 20.15 % wt.             |



รูปที่ 12 อิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินร่วนปนทราย



รูปที่ 13 อิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินร่วนปนทรายปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ



รูปที่ 14 อิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินร่วนปนทราย ปรับปรุงด้วยยางพารา ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำ

จากการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ ดังตารางที่ 10 พบว่า อิฐดินซีเมนต์มีความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย 1.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความต้านแรงอัดเฉลี่ย 4.96 เมกะปาสคาล และมีค่าการดูดกลืนน้ำ 104.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีคุณลักษณะตามเกณฑ์ของอิฐชนิดไม่รับน้ำหนัก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.602/2547

ตารางที่ 10 สมบัติของอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ (อิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินร่วนปนทราย)

| รายการทดสอบ     | ผลการทดสอบ |                   |
|-----------------|------------|-------------------|
| ความหนาแน่นแห้ง | 1.67       | g/cm <sup>3</sup> |
| ความต้านแรงอัด  | 4.96       | MPa               |
| การดูดกลืนน้ำ   | 104.70     | kg/m <sup>3</sup> |

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากอิฐดินซีเมนต์ 5 ก้อน

การใช้ยางพาราปรับปรุงคุณภาพดินร่วนปนทรายที่ไม่มีจุดพลาสติกในการผลิตอิฐดินซีเมนต์ ช่วยลดการแตกร้าวภายในหลังการอัดขึ้นรูป แต่การใช้ยางพาราในปริมาณที่มากเกินไป ก็ทำให้เกิดบวม แตกร้าว ซึ่งสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ยังมีข้อสังเกตว่าความต้านแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ก็ขึ้นกับสมบัติของดินด้วย ซึ่งการใช้ดินร่วนปนทรายผลิตอิฐดินซีเมนต์มีความต้านแรงอัดน้อยกว่า

อิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินลูกรังบดละเอียดจากแหล่งดินในจังหวัดนครนายก แม้จะใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณเท่ากัน

#### 4. สรุป

ผลจากการวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้ยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพของอิฐดินซีเมนต์ โดยใช้ตัวอย่างดินลูกรังบดละเอียด และดินร่วนปนทรายสามารถสรุปได้ดังนี้

- การใช้ยางพาราปรับปรุงคุณภาพอิฐดินซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมทำให้ความต้านแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยในกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำ อิฐดินซีเมนต์มีความต้านแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 เมื่อเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา

- ยางพาราทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน ลดการแตกร้าวของอิฐดินซีเมนต์ภายหลังการขึ้นรูป โดยผลปรากฏชัดเจนในกรณีที่ประยุกต์ใช้น้ำยางพาราปรับปรุงคุณภาพดินร่วนปนทราย ซึ่งเป็นดินที่ไม่มีจุดพลาสติก

- อิฐดินซีเมนต์ที่ผลิตจากดินต่างชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน แม้ใช้ปูนซีเมนต์ และยางพาราในอัตราส่วนเท่ากัน โดยกรณีที่เกิดจากดินลูกรังบดละเอียดมีสมบัติตามเกณฑ์ของอิฐดินซีเมนต์ชนิดรับน้ำหนัก ส่วนกรณีที่เกิดจากดินร่วนปนทรายมีคุณลักษณะตามเกณฑ์ของอิฐชนิดไม่รับน้ำหนัก

- การใช้ยางพารามากเกินไปเป็นผลเสียต่อสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ เนื่องจากยางพาราจับตัวกับวัสดุมวลรวมเป็นก้อนขนาดใหญ่จำนวนมาก ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นการขัดขวางการแทรกตัวของมวลรวมในขั้นตอนการอัดขึ้นรูป ซึ่งเป็นผลเสียต่อความหนาแน่น เกิดความไม่สม่ำเสมอของวัสดุในก้อนอิฐดินซีเมนต์ การหดตัว และขยายตัวของวัสดุแต่ละส่วนไม่เท่ากัน อิฐดินซีเมนต์จึงเกิดการแตกร้าวและปูดบวมภายหลังการอัดขึ้นรูป ซึ่งล้วนเป็นผลเสียต่อสมบัติทางวิศวกรรมของอิฐดินซีเมนต์

## 5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง “ศึกษาสมบัติเชิงกลและสภาพการนำความร้อนของอิฐดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราและประเมินความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุก่อสร้างประหยัดพลังงาน” ซึ่งได้รับอุดหนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2561

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Chantarakul and A. Chantane, “Problems and Solutions for Rubber Price fall,” *Rajapark Journal*, vol.14, no.33, pp.132-140, March-April 2020.
- [2] Matchon Online. (2017, Dec 27). The Problem of Rubber Requires Analysis of The Causes and Laying Out The Correct Solutions: By Dumrong Leenanuruxsa [Online]. Available: [https://matchon.co.th/columnists/news\\_779160](https://matchon.co.th/columnists/news_779160)
- [3] Rubber Authority of Thailand. (2019, Oct 24). Summary of The Situation of Rubber Prices in Q3/2019 and Trends in Q4/2019 [Online]. Available: <https://www.sritranggroup.com/misc/filemanager/source/2019/20191024-sta-news1-th.pdf>
- [4] J. Saowapakpiboon, Dennes T. Bergado and T. Kritpuckkraong, “Increasing Engineering Properties of Laterite Soil by Using Portland Cement Type 1 and Chemroad” in *the 15<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering*, Ubon Ratchathani, Thailand, 2010.
- [5] P. KHEAW-ON, “Compressive and Flexural Strengths of Recycled Pavement Base Material Stabilized with Cement and Admixtures,” M.S. thesis, Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2013.
- [6] S. Chareonwutirap, K. Hareonwutirap, D. Singhasanee, C. Kongker and I. Phummiphan, “Marginal Pavement Materials Stabilized with Portland Cement and Chemical Polymer Solution,” in *the 20<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering*, Chonburi, Thailand, 2015.
- [7] W. Laoangjan, and S. Srijan, “The Study Guide to Behavior of Silty Sand Soil Using High Ammonia Natural Rubber Mixing for Landslide Protection,” in *the 14<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering*, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2009.
- [8] P. Plangoen, “Application of Rubber Latex and Soil Cement Develop Drought Relieving Water Pond,” *Engng.J.CMU*, vol.25, no.2, pp.170-180, May-August 2018.
- [9] S. Pahusuwan, K. Inkliang, and B. Hanhongart, “A Study of Para Soil Cement Road Construction,” in *the 11<sup>th</sup> THAICID National Symposium*, Nonthaburi, Thailand, 2018, pp. 265-276.
- [10] J. Phetvipat, “Legend of Soil Cement Block and Interlocking Block Part 2,” *Witthayasat lae Theknoloji*, vol.21, no.2, pp.57-62, April-June 2006.
- [11] S. Seangatith, “Testing for Mechanical Properties of Soil-Cement Brick and Comparing with Masonry Bricks,” *Suranaree Journal of Social Science*, vol.6 no.2, pp.97-103, May-August 1999.
- [12] W. Kaewsaeng, “Mechanical Behaviour of Cement Stabilized Rammed Earth ( CSRE) under Flexural Load,” in *the 9<sup>th</sup> KU- KPS*

- Conference*, Nakhon Pathom, Thailand, 2012, pp. 1733-1742.
- [13] S. Saramakom, “ Usage of Fly Ash for Manufacturing Interlocking Block,” M.S. thesis, Civil Engineering, Suranaree University, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2013.
- [14] C. Charoennatkul, “Interlocking Blocks Containing Oil Palm Ash and Shells Waste,” *Journal of Community Development and Life Quality*, vol.2, no.1, pp.103-112, January-April 2014.
- [15] V. Sangrutsamee, “Development of Lightweight Interlocking Blocks from Paper Pulp Waste,” in *Built Environment Research Associates Conference (BERAC 3)*, Thailand, 2012, pp.12-20.
- [16] Thai Community Product Standards for Interlocking Block, TCPS 602/2547, 2004.
- [17] Standards for Highway Construction for Soil Cement Subbase, DS.-H 206/2532, 1989.
- [18] Thai Industrial Standard for Sampling and Testing Concrete Masonry Units TISI 109-2517, 1974.

## การวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันภายใต้วิธีการประมาณจำนวน แท็กที่เกิดการชนกันที่แม่นยำสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี

### Performance Analysis of Tag Anti-Collision Algorithms Under Accurate the Number of Colliding Tag Estimation Method for RFID Systems

นรรรัตน์ วัฒนมงคล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Norrrat Wattanamongkhon

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Longhad Bangsaen Road, Saensook, Mueang, ChonBuri 20131

\*Corresponding author Email: norrrat@eng.buu.ac.th

(Received: September 27, 2020; Accepted: February 17, 2021)

#### บทคัดย่อ

ในกระบวนการของการระบุตัวตนในระบบอาร์เอฟไอดีนั้นเมื่อมีแท็กจำนวนหนึ่งต้องการส่งสัญญาณไปหาเครื่องอ่านในเวลาใกล้เคียงกันจะเกิดการชนกันขึ้น ปัญหาการชนกันของแท็กมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากส่งผลถึงเวลาประวิงที่ใช้ในการระบุตัวตน การใช้พลังงานของแท็กในการติดต่อสื่อสาร หรือการใช้งานแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์ใหม่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีซึ่งประกอบด้วย 4 อัลกอริทึมคือ สล็อตอะโลฮาแบบปรับขนาดเฟรมได้ สล็อตอะโลฮาแบบปรับขนาดเฟรมและข้ามไม่ใช้สล็อตได้ อัลกอริทึมทรีแบบปรับขนาดเฟรมได้ และอัลกอริทึมทรีแบบปรับขนาดเฟรมและข้ามไม่ใช้สล็อตได้ จากผลการทดสอบพบว่าอัลกอริทึมทรีแบบปรับขนาดเฟรมและข้ามไม่ใช้สล็อตได้จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 0.52 เมื่อมีแท็กที่เกิดการชนกันในระบบจำนวน 100 แท็ก

**คำสำคัญ:** อาร์เอฟไอดี อัลกอริทึมต่อต้านการชน สล็อตอะโลฮา โปรโทคอลแบบปรับตัวได้

#### ABSTRACT

In the process of identification in RFID systems, a number of tags were required to send signals to nearby readers, a collision would occur. It is very important because it affects the access delay in identification, power consumption of tags, or bandwidth utilization. In this research, we present a novel mathematical models for the performance analysis of tag anti-collision algorithms for RFID systems, including AF-SA, AFS-SA, TA-AF and TA-AFSS. From the experimental results we found that the TA-AFSS algorithm provides the highest efficiency as 0.52 for the number of 100 collided tags in the system.

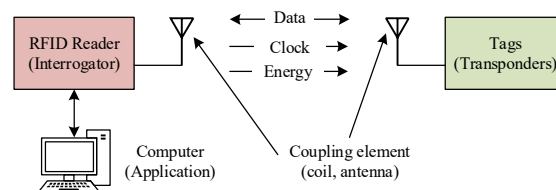
**Keyword:** RFID, anti-collision algorithm, slotted aloha, adaptive protocol.

## 1. บทนำ

อาร์เอฟไอดี [1] (Radio Frequency Identification: RFID) คือเทคโนโลยีระบุตัวตนอัตโนมัติแบบไม่สัมผัส สามารถระบุตัวตนของวัตถุเป้าหมายได้อย่างอัตโนมัติผ่านการสื่อสารข้อมูลแบบสองทาง (Full-duplex) โดยใช้สัญญาณคลื่นวิทยุแบบกระจายในทุกทิศทาง (Omni-directional) ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างสะดวก ถูกต้อง และรวดเร็ว แทนที่จะต้องใช้การนับหรือจดบันทึกด้วยมนุษย์ที่อาจเกิดข้อผิดพลาดได้ง่ายและยังทำงานในสิ่งแวดล้อมที่อันตรายได้ ปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยี RFID มาใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น กระบวนการผลิต ระบบคลังสินค้า โลจิสติกส์ ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบบริหารจัดการจราจร หรือระบบการสาธารณสุข ซึ่งต่างจากเทคโนโลยีระบุตัวตนแบบไร้สายชนิดอื่นๆ เช่น การอ่านบาร์โค้ด (Barcode) หรือคิวอาร์โค้ด (QR-code) ที่อาศัยคลื่นอินฟราเรดที่ต้องรับส่งสัญญาณในแนวเส้นตรง หากมีสิ่งกีดขวางมาบดบังจะไม่สามารถสื่อสารถึงกันได้

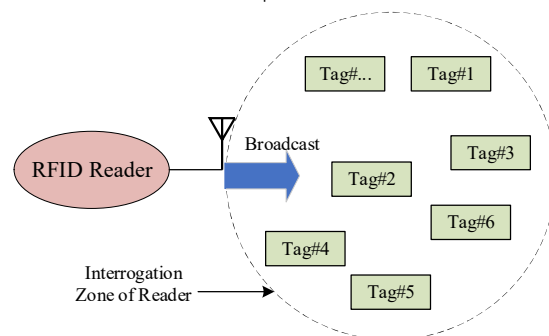
โดยทั่วไประบบ RFID ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือเครื่องอ่าน (Reader หรือ Interrogator) แท็กหรือทรานสปอนเดอร์ (Tag หรือ Transponder) มีลักษณะเป็นสติกเกอร์หรือชิปที่มีขนาดเล็กและระบบบริหารจัดการ (Management system) [1] ดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งเครื่องอ่านและแท็กจะมีอุปกรณ์สายอากาศอยู่ด้านในซึ่งถูกใช้สำหรับรับและส่งสัญญาณ โดยแท็กจะถูกติดหรือฝังลงในวัตถุที่ต้องการอ่านข้อมูล จากนั้นเครื่องอ่านจะรวบรวมและถ่ายโอนข้อมูลที่ได้รับมาจากแท็กไปยังระบบบริหารจัดการเพื่อทำการประมวลผลข้อมูลอย่างเป็นลำดับตามความต้องการที่แตกต่างกันของการนำไปใช้งาน ในระบบ RFID ทุกๆ แท็กจะมีหมายเลขประจำตัวของตนเองซึ่งได้จากการเข้ารหัสแมนเชสเตอร์ (Manchester coding) ดังนั้นเครื่องอ่านจะสามารถระบุตัวตนของแท็กที่ทราบเท่าที่มันยังได้รับหมายเลขประจำตัวของแท็กนั้นอยู่ ปัจจุบันแท็กที่ถูกนำมาใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นแบบพาสซีฟ (Passive tag) คือแท็กที่ไม่ต้องมีแหล่งพลังงานบรรจุไว้ที่ตัวเอง แต่จะใช้การเหนี่ยวนำพลังงานจากเครื่องอ่านผ่าน

สายอากาศที่ฝังอยู่ภายในโดยต้องอยู่ในระยะไม่ห่างกันนัก



รูปที่ 1 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ RFID

จากรูปที่ 2 ในขั้นตอนของการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและแท็กของระบบ RFID หนึ่งๆ หากมีแท็กจำนวนตั้งแต่ 2 แท็กขึ้นไปในรัศมีการแพร่กระจายสัญญาณของเครื่องอ่าน (Interrogation zone of reader) หรือมีแท็กหนึ่งอยู่ในรัศมีการส่งสัญญาณของเครื่องอ่านมากกว่าหนึ่งเครื่องจะเกิดการแลกเปลี่ยนข่าวสารผ่านช่องสัญญาณความถี่เดียวกันและในเวลาเดียวกัน จึงนำไปสู่ปัญหาการชนกันของแท็กเกิดข้อมูล ส่งผลให้ไม่มีแท็กใดเลยที่สามารถส่งแท็กเกิดของตนเองไปยังเครื่องอ่านได้สำเร็จ การชนกันของแท็กเกิดเป็นปัญหาที่สำคัญมากในระบบ RFID [1,2] เพราะส่งผลให้การใช้พลังงานของแท็กมากขึ้น มีข้อจำกัดในการประมวลผลและเวลาประวิงของการส่งข่าวสารก็มากขึ้นด้วย ยิ่งไปกว่านั้น ยังส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการพัฒนาและเกิดผลกระทบต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 2 รัศมีการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและแท็ก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์นำเสนออัลกอริทึมที่แก้ปัญหาการชนกันของแท็กได้อย่างมีประสิทธิภาพและสมการคณิตศาสตร์ที่สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมได้อย่างรวดเร็วสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี

ภายใต้สมมติฐานที่สามารถประมาณจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันได้อย่างแม่นยำ

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นงานวิจัยและรวบรวมข้อมูลในอดีตจนถึงปัจจุบันที่ผ่านมา มีนักวิจัยได้นำเสนอโพรโทคอลเพื่อแก้ปัญหาการชนกันในระบบ RFID แบบไร้สาย สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักคือ โพรโทคอลแก้ปัญหาการชนกันของแท็ก (Tag anti-collision protocols) และอีกกลุ่มคือโพรโทคอลแก้ปัญหาการชนกันของเครื่องอ่าน (Reader anti-collision protocols) [1-4] ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้สนใจกลุ่มที่เสนอโพรโทคอลแก้ปัญหาการชนกันของแท็ก เนื่องจากเป็นปัญหาที่มักเกิดขึ้นได้ทั่วไปเมื่อนำไปใช้งานจริง อัลกอริทึมที่นำเสนอในปัจจุบันจะอาศัยเทคโนโลยีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) เนื่องจากเป็นวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณที่มีความซับซ้อนน้อย โดยเราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ อัลกอริทึม ALOHA-based [5]-[7] และอัลกอริทึม Tree-based [8]-[11]

แนวคิดพื้นฐานของอัลกอริทึม ALOHA-based คือการแบ่งช่วงเวลาออกเป็นไทม์สล็อตเพื่อให้แท็กแต่ละตัวสามารถสื่อสารกับเครื่องอ่านได้ในแต่ละสล็อตโดยใช้อัลกอริทึมการปรับค่าความน่าจะเป็น (Probability anti-collision algorithms) จึงช่วยลดโอกาสการชนกันของแพ็กเก็ตลงได้ แทนที่จะอนุญาตให้แท็กแต่ละตัวสามารถติดต่อกับเครื่องอ่านที่มีอยู่เครื่องเดียวได้อย่างอิสระซึ่งจะส่งผลให้เกิดการชนกันบ่อยมาก ด้วยอัลกอริทึมนี้สามารถพัฒนาต่อได้ง่ายและนำไปประยุกต์เพื่อระบุตัวตนของแท็กจำนวนเท่าใดก็ได้ ดังนั้นอัลกอริทึม ALOHA-based จึงถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อแก้ปัญหาการชนกันสำหรับระบบ RFID ตัวอย่างอัลกอริทึมในกลุ่มนี้ที่ถูกนำเสนอ [5]-[7] เช่น ALOHA, Slotted ALOHA, Frame Slotted ALOHA (FSA) และ Dynamic Frame Slotted ALOHA (DFSA) อัลกอริทึมกลุ่มนี้อาจจะเกิดปัญหาที่มีบางแท็กไม่สามารถติดต่อกับ

เครื่องอ่านได้เลยซึ่งปัญหาเหล่านี้จะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนแท็กที่มากขึ้น ส่วนอีกกลุ่มหนึ่งคือ อัลกอริทึม Tree-based จะกำหนดค่าความน่าจะเป็นตายตัว (Deterministic anti-collision algorithms) โดยการประยุกต์ใช้หลักความเป็นคู่และความแน่นอน (Duality and certainty principle) เพื่อแก้ปัญหาการชนกันของแท็กโดยการแบ่งแยกแท็กที่เกิดการชนกันออกเป็นกลุ่มย่อยต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแท็กทุกตัวได้รับการระบุตัวตนสำเร็จ ซึ่งถือเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับอัลกอริทึม ALOHA-based ส่วนข้อด้อยคือมีการคำนวณที่ซับซ้อนและใช้เวลาประมวลผลนานกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อมีแท็กจำนวนมากอยู่ในรัศมีการสื่อสารของเครื่องอ่าน ตัวอย่างอัลกอริทึมในกลุ่มนี้ [8]-[11] เช่น Binary Tree (BT), Modified Binary Tree (MBT), Query Tree (QT) และ Optimal Query Tracking Tree (OQTT)

### 2.1 Slotted ALOHA (SA)

อัลกอริทึม SA เป็นอัลกอริทึมแรกที่ได้รับการพัฒนาต่อจาก ALOHA โดยจะให้ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) เพิ่มขึ้นจากเดิม 2 เท่า ในระบบ RFID เมื่อพิจารณาว่ามีเครื่องอ่านหนึ่งเครื่องและมีแท็กจำนวนหนึ่งอยู่ในรัศมีการส่งสัญญาณระหว่างกันโดยใช้ช่องสัญญาณสื่อสารร่วมกัน ซึ่งถูกจัดสรรเวลาเป็นไทม์สล็อต (Timeslot) ที่มีขนาดเล็กๆ จำนวนหนึ่ง โดยอนุญาตให้แท็กสามารถส่งแพ็กเก็ตข้อมูลได้ที่ตำแหน่งเริ่มของแต่ละสล็อตเท่านั้น (ซึ่งเดิมระบบ ALOHA จะอนุญาตให้แท็กส่งแพ็กเก็ตของตนได้ทันที ส่งผลให้เกิดการชนบ่อยครั้งเพราะในระหว่างส่งแพ็กเก็ตของแท็กแต่ละตัวหากมีการส่งซ้อนเหลื่อมกันแม้เพียงเล็กน้อย เครื่องอ่านก็จะพิจารณาว่าเกิดการชนกันทันที) ในขณะที่เครื่องอ่านจะทำหน้าที่ควบคุมจำนวนสล็อตและจัดสรรช่องทางการสื่อสารกับแท็กในช่วงเวลาที่จำกัดของแต่ละสล็อต หลังจากเครื่องอ่านส่งคำสั่งกระจายออกไป เมื่อไหร่ก็ตามที่แท็กได้รับสัญญาณนี้จะส่งหมายเลขประจำตัวของตนเองออกไปที่ตำแหน่งเริ่มต้นของสล็อต ถ้ามีเพียงแคแท็กเดียวตอบสนอง เครื่องอ่านก็จะสามารถระบุตัวตนของแท็กนั้นได้สำเร็จ (Success) แต่หาก

มีแท็กตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปส่งสัญญาณออกมาพร้อมกันจะเกิดการชนกันขึ้น (Collision) ส่งผลให้เครื่องอ่านไม่สามารถระบุตัวตนของแท็กใดได้เลย ดังนั้นแท็กที่เกิดการชนกันทั้งหมดจะต้องเริ่มต้นติดต่อกับเครื่องอ่านซ้ำไปเรื่อยๆ ซึ่งจะต้องใช้พลังงานและเวลาประวิงในการประมวลผลมากขึ้น ปัญหานี้จะรุนแรงมากขึ้น เมื่อมีจำนวนแท็กมากขึ้น นอกจากนั้นแล้ว ในกรณีที่ไม่มีแท็กใดเลยส่งสัญญาณกลับมาก็เครื่องอ่านจะเกิดสล็อตว่าง (Idle) ซึ่งจะเป็นการเสียโอกาสในการส่งข้อมูล

### 2.2 Frame Slotted ALOHA (FSA)

ข้อบกพร่องหลักของอัลกอริทึม SA คือประสิทธิภาพการทำงานจะลดลงมาก เมื่อจำนวนแท็กในระบบเพิ่มขึ้น โอกาสในการชนกันก็จะมากขึ้นตามไปด้วย อัลกอริทึม Frame Slotted ALOHA (FSA) จึงถูกนำเสนอเพื่อเอาชนะปัญหานี้ โดยกำหนดให้แท็กแต่ละตัวจะได้รับอนุญาตให้ส่งข้อมูลได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้นในแต่ละเฟรม [6] (ในหนึ่งเฟรมประกอบด้วยสล็อตจำนวนหนึ่งซึ่งมีจำนวนคงที่) เพื่อลดโอกาสในการชนลง จึงสามารถเพิ่มค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบได้

จากรูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม FSA ในหนึ่งเฟรมมี 3 สล็อต ในขณะที่มีแท็กที่เกิดการชนกันเริ่มต้นคือ A, B, ..., E เมื่อพิจารณาเฟรมแรกจะมีเพียงแท็ก C เท่านั้นที่ส่งสำเร็จ แท็กที่เหลือทั้งหมดจะสุ่มเลือกสล็อตอีกครั้งในเฟรมถัดไป ซึ่งมีแท็กที่ส่งแพ็กเก็ตสำเร็จคือ E ในขณะที่แท็ก A, B และ D ยังคงชนกันอยู่ จากนั้นแท็กที่เหลืออยู่จะดำเนินตามขั้นตอนเช่นนี้วนซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงเฟรมที่ 4 แท็กทุกตัวสามารถส่งแพ็กเก็ตได้สำเร็จ จากตัวอย่างนี้จะเห็นว่าในขั้นตอนการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กทั้งหมดนี้ระบบจะต้องใช้เวลาไปทั้งหมดเท่ากับ 12 สล็อต ในจำนวนนี้จะเกิดสล็อตว่างสะสมรวมเท่ากับ 3 สล็อต

| Frame#    | 1   |     |         | 2     |   |       | 3 |     |     | 4 |   |         |
|-----------|-----|-----|---------|-------|---|-------|---|-----|-----|---|---|---------|
| Slot#     | 1   | 2   | 3       | 1     | 2 | 3     | 1 | 2   | 3   | 1 | 2 | 3       |
| Tag#      | A,D | B,E | C       | A,B,D | E |       | A | B,D |     |   | D | B       |
| A,B,C,D,E |     |     | A,B,D,E |       |   | A,B,D |   |     | B,D |   |   | สิ้นสุด |

รูปที่ 3 ตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม FSA

### 2.3 Dynamic Frame Slotted ALOHA (DFSA)

ข้อเสียเปรียบหลักของอัลกอริทึม FSA คือโดยทั่วไปเครื่องอ่านจะไม่ทราบจำนวนแท็ก เนื่องจากทุกเฟรมจะมีความยาวเท่ากันหรือมีจำนวนสล็อตในแต่ละเฟรมคงที่ ดังนั้นจึงเกิดปัญหาที่สำคัญ 2 เหตุการณ์คือ 1. เมื่อจำนวนสล็อตในแต่ละเฟรมน้อยกว่าจำนวนแท็กที่มีอยู่มาก ดังนั้นอาจเกิดการชนกันในหลายสล็อตของเฟรม ส่งผลให้เครื่องอ่านไม่สามารถระบุตัวตนได้เป็นระยะเวลานาน และ 2. เมื่อจำนวนสล็อตของเฟรมมีค่ามากกว่าจำนวนแท็กที่มีอยู่จะเกิดสล็อตว่างจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้นำทฤษฎีนำเสนออัลกอริทึม Dynamic Frame Slotted ALOHA (DFSA) เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยประเด็นหลักที่นำเสนอคือความยาวของเฟรมจะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนแท็ก ร่วมกับใช้วิธีการประมาณจำนวนแท็กซึ่งมีความสำคัญอย่างมาก แต่วิธีการประมาณจำนวนแท็กไม่มีอัลกอริทึมที่กำหนดเป็นมาตรฐาน

จากรูปที่ 4 เมื่อใช้อัลกอริทึม DFSA ในการแก้ปัญหาการชน เมื่อมีแท็ก A, B, ..., E ในเฟรมแรกจะใช้ขนาด 5 สล็อต ซึ่งเท่ากับจำนวนแท็กที่เกิดการชนกัน โดยเหลืออีก 2 แท็กที่ยังส่งไม่สำเร็จ จากนั้นในเฟรมที่ 2 จะใช้เฟรมขนาด 2 สล็อต แต่ไม่ยังคงส่งไม่สำเร็จเช่นเดิม ดังนั้นในเฟรมที่ 3 จะใช้เฟรมขนาด 2 สล็อต เช่นเดิมและส่งได้สำเร็จในที่สุด โดยใช้เวลาไปทั้งหมดเท่ากับ 9 สล็อต และในจำนวนนี้จะเกิดสล็อตว่างสะสมเท่ากับ 2 สล็อต ซึ่งใช้จำนวนสล็อตในการแก้ปัญหการชนน้อยกว่าตัวอย่างในรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาจำนวนแท็กที่เกิดการชนเริ่มต้นเท่ากับ

| Frame#    | 1 |   |   |     |     | 2   |     | 3 |         |
|-----------|---|---|---|-----|-----|-----|-----|---|---------|
| Slot#     | 1 | 2 | 3 | 4   | 5   | 1   | 2   | 1 | 2       |
| Tag#      |   | E | C | B,D | A   | B,D |     | B | D       |
| A,B,C,D,E |   |   |   |     | B,D |     | B,D |   | สิ้นสุด |

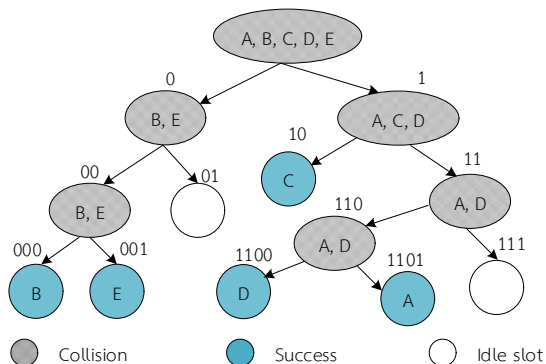
รูปที่ 4 ตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม DFSA

### 2.4 Binary tree algorithm (BTA)

ตามหลักการพื้นฐานของอัลกอริทึมต้นไม้ หลังจากที่เกิดการชนกันของแท็กขึ้นจะเข้าสู่กระบวนการแก้ปัญหาการชน แท็กอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการชนจะต้องรอ

จนกระทั่งปัญหาการชนนั้นได้รับการแก้ไข เริ่มต้นจะแบ่งแท็กที่เกิดการชนทั้งหมดออกเป็น 2 กลุ่มคือ 0 และ 1 ซึ่งจะพิจารณาจากหมายเลขประจำตัวแท็กทีละบิต โดยกลุ่มบิต 0 จะได้รับการพิจารณาก่อนเสมอ ในขณะที่แท็กในกลุ่มบิต 1 จะต้องรอจนกระทั่งแท็กทุกตัวในกลุ่มบิต 0 สำเร็จ (มีเพียงแท็กเดียวที่ส่งข้อมูลในสล็อตนั้น) ทุกๆ ครั้งที่เกิดการชนกันจะแบ่งแยกแท็กออกเป็น 2 กลุ่ม เช่นเดิมพร้อมกับพิจารณาบิตในลำดับถัดไป กระบวนการเช่นนี้จะวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแท็กทุกตัวได้รับการระบุตัวตนสำเร็จ

จากรูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม BTA เมื่อมีแท็กที่เกิดการชนกันเริ่มต้นคือ A, B, ..., E โดยจะเริ่มแก้ปัญหาการชนในกลุ่มบิต 0 ทางซ้ายมือก่อน เสมอในแนวลึกละเอียดกับรากของต้นไม้ จนกระทั่งแท็กเหล่านั้นส่งแพ็กเก็ตได้สำเร็จ จากนั้นจึงแก้ปัญหาการชนต่อไปในกลุ่มบิต 1 จากรูปนี้จะใช้เวลาในการแก้ปัญหาการชนกันไปทั้งหมด 12 สล็อต โดยมีสล็อตว่างจำนวน 2 สล็อต สำหรับแท็กที่เกิดการชนกันจำนวน 5 แท็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจากหลักการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กด้วยอัลกอริทึม Tree-based จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลกอริทึม ALOHA-based เนื่องจากวิธีการแบ่งแยกกลุ่มจะทำให้โอกาสในการชนกันของแท็กลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อัลกอริทึม ALOHA-based จะนำแท็กที่เกิดการชนกันทั้งหมดไม่ว่าเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดในสล็อตใดของเฟรมก็ตาม ก็จะต้องทำการสุ่มเลือกสล็อตเพื่อส่งแพ็กเก็ตในเฟรมถัดไปเสมอ จึงมีโอกาสเป็นไปได้สูงที่แท็กบางตัวอาจใช้เวลานานกว่าที่จะได้รับการระบุตัวตนสำเร็จ



รูปที่ 5 ตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม BTA

## 2.5 Adaptive Tree algorithm (ATA)

### 3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากงานวิจัยในอดีต [5-11] มักนำเอาเทคนิคการปรับขนาดเฟรมเองได้ (Adaptive frame size) และเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อต (Skipping slotted) มาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมให้สูงขึ้นทั้งในกลุ่ม ALOHA-based และ Tree-based ด้วยเหตุนี้เราจึงได้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์เพื่อใช้วิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันของแท็กในระบบ RFID จำนวน 4 อัลกอริทึม ซึ่งประกอบด้วย 1. Adaptive Frame Slotted Aloha (AF-SA) 2. Adaptive Frame and Skipping Slotted Aloha (AFS-SA) 3. Tree algorithm with Adaptive Frame (TA-AF) และ 4. Tree algorithm with Adaptive Frame and Skipping Slotted (TA-AFSS) ภายใต้สมมติฐานว่าเครื่องอ่านสามารถประมาณจำนวนแท็กที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ในระดับสล็อต เนื่องจากมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอวิธีการประมาณจำนวนแท็กที่มีความแม่นยำ [12-16] โดยอาศัยการประมวลผลภายหลังจากแท็กพยายามส่งแท็กเกิดไปยังเครื่องอ่านเพื่อคำนวณหาจำนวนแท็กที่เหลือน้อยในแต่ละเฟรมหรือในแต่ละสล็อต ดังนั้นอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงสามารถลดการใช้งานสล็อตลงได้อย่างชัดเจน และส่งผลให้แท็กได้รับการระบุตัวตนได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะแสดงสมการคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมที่นำเสนอในรูปของจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมด  $N$  แท็ก (Average number of required slots,  $\bar{L}_N$ ) ซึ่งค่านี้สามารถนำไปประเมินเวลาประวิงของระบบการใช้พลังงานในการสื่อสาร หรือปริมาณการใช้แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ สำหรับแท็กที่เกิดการชนกันทั้งหมดจำนวน  $N$  แท็ก (โดยที่  $N \geq 2$ ) และในหนึ่งเฟรมจะมีจำนวน  $M$  สล็อต เนื่องจากเรานำเสนออัลกอริทึมที่ปรับขนาดเฟรมของได้มาใช้เป็นเทคนิคพื้นฐาน ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้จำนวนสล็อตในแต่ละเฟรมเท่ากับจำนวนแท็ก ( $M = N$ ) ที่เกิดการชนกันทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 Adaptive Frame Slotted Aloha (AF-SA)

อัลกอริทึม AF-SA จะใช้หลักการเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้นำเสนอแล้วคือการปรับขนาดเฟรมตามจำนวนแท็กที่เกิดการชนกัน โดยเครื่องอ่านจะสามารถทราบจำนวนแท็กที่เหลือน้อยหลังจากประมวลผลเมื่อสิ้นสุดในแต่ละเฟรมโดยไม่สนใจว่าจะเกิดการชนกันที่สล็อตใด ดังนั้นก่อนเริ่มต้นการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กในแต่ละเฟรมเครื่องอ่านจะกำหนดจำนวนสล็อตในแต่ละเฟรมให้มีค่าเท่ากับจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันคงเหลือน้อยในปัจจุบันจนกระทั่งแท็กทุกตัวได้รับการระบุตัวตนสำเร็จ โดยขั้นตอนแก้ปัญหาการชนกันของอัลกอริทึม AF-SA จะเหมือนกับอัลกอริทึม DFSA โดยสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4 ดังนั้นจะสามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมด  $N$  แท็กได้เป็น

$$\bar{L}_N = N + p_c \bar{L}_c \quad (1)$$

สำหรับกรณีที่ ไม่เกิดการชนกันของแท็กเลยจะได้ว่า  $\bar{L}_0 = 0$  และ  $p_c$  คือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่แท็กเกิดการชนกันขึ้นทั้งหมดในแต่ละเฟรม โดยที่

$$p_c = \frac{(N-1)!}{N^{N-1}} \sum_{R_c}^N \left( \binom{N}{k_1, k_2, \dots, k_N} \frac{1}{\prod_{j=0}^N \left( \sum_{i=1}^N I(k_i = j) \right)!} \right) \quad (2)$$

$R_c$  คือรูปแบบของการสุ่มเลือกในแต่ละสล็อตเฉพาะกรณีที่เกิดการชนกันที่เป็นไปได้ทั้งหมด สามารถเขียนเงื่อนไขแทนด้วยสมการ (3)

$$R_c = \{k_1, k_2, \dots, k_N \mid \sum_{i=1, k_i > 1}^N k_i = c\} \quad (3)$$

จากสมการ (2) เทอมของ  $\sum_{k_1, k_2, \dots, k_N}^N (\cdot)$  คือผลรวมของการเลือกสล็อตของแท็กที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ  $k_1, k_2, \dots, k_N$

ซึ่งเป็นจำนวนแท็กที่สุ่มเลือกหมายเลขสล็อต 1,2,...,N ตามลำดับ เช่น ถ้าในหนึ่งเฟรมมีจำนวนสล็อตเท่ากับ 3 จะมีรูปแบบการเลือกสล็อตของแท็กที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 รูปแบบคือ 1)  $k_1=1, k_2=1, k_3=1$  2)  $k_1=2, k_2=1, k_3=0$  และ 3)  $k_1=3, k_2=0, k_3=0$  โดยที่  $\sum_{i=1}^N k_i = N$  เมื่อ  $N \geq 2$  และ  $k_i \geq 0$  และค่าสัมประสิทธิ์อเนกนาม (Multinomial coefficient) ในสมการ (2) มีค่าเท่ากับ

$$\binom{N}{k_1, k_2, \dots, k_N} = \frac{N!}{k_1! k_2! \dots k_N!} \quad (4)$$

ฟังก์ชันตัวบ่งชี้ (Indicator function) ในสมการ (2) คือ  $I(k_i = j)$  จะให้ค่าเป็น 1 เมื่อเงื่อนไขเป็นจริง และจะให้ค่าเป็น 0 เมื่อเงื่อนไขเป็นเท็จ

### 3.2 Adaptive Frame and Skipping Slotted

#### Aloha (AFS-SA)

อัลกอริทึม AFS-SA ได้รับการพัฒนาต่อจากอัลกอริทึม AF-SA โดยการเพิ่มเทคนิคการข้ามสล็อต (Skipping slot) ร่วมกับเทคนิคการปรับขนาดเฟรมตัวเอง ซึ่งสามารถเกิดเหตุการณ์ข้ามไม่ใช้งานสล็อตได้ 2 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 7 โดยรูปที่ 7(ก) กรณีที่มีจำนวนแท็กตั้งแต่ 2 แท็กขึ้นยังไม่ได้สุ่มเลือกสล็อตใดเลย จนกระทั่งเหลือสล็อตสุดท้ายซึ่งจะเกิดการชนกันอย่างแน่นอน และรูปที่ 7(ข) แท็กทั้งหมดได้สุ่มเลือกสล็อตไปในช่วงแรกแล้ว และยังมีเหลือสล็อตอีกจำนวนหนึ่งที่ไม่ถูกใช้งานแน่นอน จึงสามารถลดการใช้สล็อตเหล่านี้ได้

เราจะสามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมด  $N$  แท็กได้เป็น

$$\bar{L}_N = N + p_c \bar{L}_c - p_{skip} \bar{L}_{skip} \quad (5)$$

เมื่อ  $\bar{L}_c$  คือจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กในกรณีที่แท็กเกิดการชนกัน  $\bar{L}_{skip}$  คือจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กใน

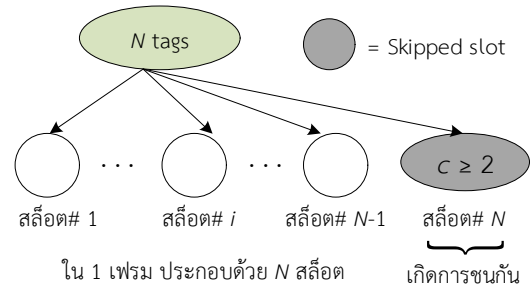
เหตุการณ์กรณีที่เกิดเหตุการณ์ข้ามไม่ใช้งานสล็อต และ  $p_{skip}$  คือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สามารถข้ามไม่ใช้งานสล็อตได้ซึ่งมี 2 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 7 โดยที่

$$p_{skip} = \frac{(N-1)!}{N^{N-1}} \sum_{R_{skip}} \left[ \binom{N}{k_1, k_2, \dots, k_N} \frac{1}{\prod_{j=0}^N \left( \sum_{i=1}^N I(k_i = j) \right)!} \right] \quad (6)$$

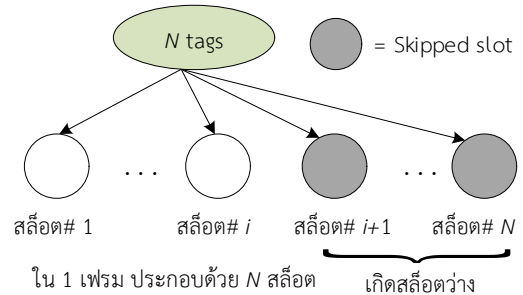
$R_{skip}$  คือรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการสุ่มเลือกในแต่ละสล็อตที่สามารถข้ามสล็อตไม่ใช้งานสล็อตได้ สามารถเขียนแทนด้วยสมการ (7)

$$R_{skip} = \{k_1, \dots, k_i, \dots, k_N \mid \begin{cases} k_N \geq 0 \text{ or} \\ k_{i+1} = k_{i+2} = \dots = k_N = 0 \end{cases} \quad (7)$$

สำหรับ  $p_c$  และ  $R_c$  ยังคงสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) และ (3) ตามลำดับเช่นเดิม



(ก) รูปแบบที่ 1



(ข) รูปแบบที่ 2

รูปที่ 7 รูปแบบเหตุการณ์การข้ามไม่ใช้งานสล็อต

### 3.3 Tree algorithm with Adaptive Frame (TA-AF)

เหตุผลที่สำคัญที่ทำให้สมรรถนะของอัลกอริทึม ต้นไม้ต่ำคือการกำหนดให้ขนาดของเฟรมมีค่าคงที่ (Fixed frame size, Q) และอยู่ในรูปกำลังสอง (ตามการเข้ารหัส แมนเชสเตอร์ที่เป็นเลขไบนารี) เช่น  $Q = 2, 4, 8, \dots$  ถึงแม้จะมีนักวิจัยนำเสนอว่าควรกำหนด Q มีค่าคงที่เป็นเท่าใด เพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีตลอดเวลา แต่เนื่องจากจำนวน แท็กที่เกิดการชนกันเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอทุกครั้งที่ผ่านการแก้ปัญหาการชนจนกระทั่งแท็กทุกตัวได้รับการระบุตัวตนสำเร็จจึงเกิดแนวความคิดการปรับขนาดเฟรมได้ตามจำนวนแท็กที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยอาศัยอัลกอริทึมที่สามารถประมาณจำนวนแท็กได้อย่างแม่นยำในทุกๆ สล็อต เราจึงได้นำเสนออัลกอริทึม TA-AF ซึ่งมีความแตกต่างจากอัลกอริทึมอื่นที่เคยเสนอมาตรงที่การกำหนดขนาดของเฟรมที่ไม่อยู่ในรูปของเลขจำนวนเต็มยกกำลังสอง เพราะหากแท็กสุ่มเลือกสล็อตได้สำเร็จแล้วจึงอ่านหมายเลขประจำตัวแท็กต่อเนื่องกันไป การทำเช่นนี้จะช่วยลดโอกาสการเกิดสล็อตว่างได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่หลักการแก้ปัญหาการชนในแนวสิกของกลุ่ทางซ้ายมือก่อน จากนั้นค่อยแก้ปัญหาการชนในกลุ่มขวามือต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ ซึ่งจะรอจนกระทั่งแท็กในกลุ่มซ้ายมือได้รับการระบุตัวตนสำเร็จทั้งหมดก่อน

เราจะสามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมดได้เป็น

$$\bar{L}_N = \frac{1}{(1 - N^{1-N})} \left[ N + \sum_{c=2}^{N-1} \binom{N}{c} \frac{(N-1)^{N-c}}{N^{N-1}} \bar{L}_c \right] \quad (8)$$

จากสมการ (8) จะอยู่ในรูปของสมการรีเคอร์ซีฟ (Recursive equation) เนื่องจากต้องมีการคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาค่า  $\bar{L}_c$  ซึ่งเราไม่สามารถหาค่า  $\bar{L}_N$  ใดๆ ได้โดยตรง ดังนั้นนอกจากนั้นเรายังสังเกตได้ว่ามีความแตกต่างกับสมการ (1) ซึ่งแท็กทั้งหมดที่เกิดการชนกันไม่ว่าตำแหน่งสล็อตใดจะนำไปแก้ปัญหาในเฟรมถัดๆ ไปเสมอ แต่ใน

สมการ (8) จะพิจารณาจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันในระดับสล็อตเพื่อแก้ปัญหาการชนจนกระทั่งสำเร็จ

### 3.4 Tree algorithm with Adaptive Frame and Skipping Slotted (TA-AFSS)

ในทำนองเดียวกัน อัลกอริทึม TA-AFSS ก็ได้รับการพัฒนาต่อจากอัลกอริทึม TA-AF โดยการเพิ่มเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตเข้าไปร่วมกับเทคนิคการปรับขนาดเฟรมได้เอง โดยการเกิดเหตุการณ์ข้ามไม่ใช้งานสล็อตสามารถพิจารณาได้จากอัลกอริทึม AFS-SA ในหัวข้อ 3.2 และรูปที่ 7 ดังนั้นเราจะสามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมดได้เป็น

$$\bar{L}_N = \frac{1}{(1 - N^{1-N})} \left[ N + \sum_{c=2}^{N-1} \binom{N}{c} \frac{(N-1)^{N-c}}{N^{N-1}} \bar{L}_c - p_{skip} \bar{L}_{skip} \right] \quad (9)$$

เมื่อ  $\bar{L}_{skip}$  คือจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กในเหตุการณ์กรณีที่เกิดเหตุการณ์ข้ามไม่ใช้งานสล็อต และ  $p_{skip}$  คือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สามารถข้ามไม่ใช้งานสล็อตได้ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (6)

### 3.5 การวัดประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม

นอกจากการประเมินความสามารถการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอจากจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กที่สามารถลดจำนวนการใช้สล็อตในการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กเมื่อพิจารณาที่จำนวนแท็กค่าหนึ่งแล้ว เรายังสามารถประเมินประสิทธิภาพ (Efficiency) การทำงานของอัลกอริทึมได้อีกมุมมองหนึ่ง ด้วยการนอร์มอลไลซ์ค่าจำนวนแท็กด้วยนวนการใช้สล็อตในการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กซึ่งจะเห็นความสามารถของอัลกอริทึมในภาพรวมทั้งหมด โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$Efficiency = \frac{N}{\bar{L}_N} \quad (10)$$

#### 4. ผลการทดลอง

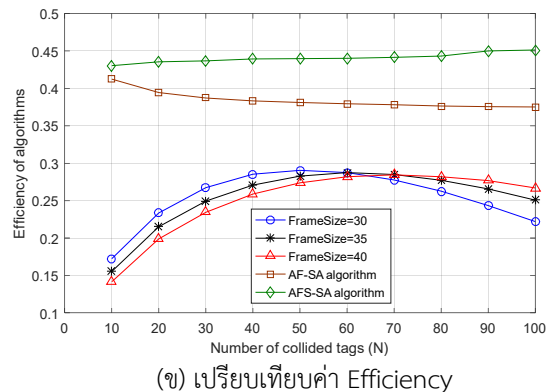
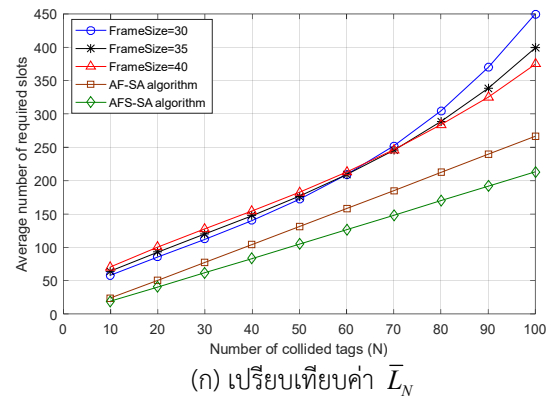
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึมที่นำเสนอและเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมบางส่วนที่มีผู้ที่ได้นำเสนอมาแล้ว โดยการเปรียบเทียบจำนวนการใช้สล็อตในการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กและค่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ในการทดลองเราจะกำหนดแกนนอนเป็นค่าจำนวนแท็กโดยเปลี่ยนค่าเป็น 10, 20, 30,..., 100 แท็ก ตามลำดับ

##### 4.1 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม AF-SA และ AFS-SA

จากรูปที่ 8 จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่า  $\bar{L}_N$  ของอัลกอริทึมที่เรานำเสนอคือ AF-SA และ AFS-SA รวมถึงการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม FSA ที่มีผู้นำเสนอมาแล้ว ซึ่งประกอบด้วยกรณีที่กำหนดจำนวนสล็อตต่อเฟรมให้คงที่เป็น 30, 35 และ 40 จากรูป 8(ก) เช่นที่ค่า  $N=100$  แท็ก เมื่อ Framesize เท่ากับ 30, 35 และ 40 สล็อตจะต้องใช้สล็อตเป็นจำนวนเฉลี่ยเท่ากับ 450, 400 และ 375 สล็อต เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าอัลกอริทึม FSA จะใช้จำนวนสล็อตในการแก้ปัญหาการชนมากกว่าอัลกอริทึมที่เราได้นำเสนอซึ่งมีค่าเท่ากับ 266 และ 213 ตามลำดับ เนื่องจากอัลกอริทึมสามารถปรับขนาดเฟรมได้ตามจำนวนแท็กที่มีอยู่ในเวลานั้น เพราะจำนวนสล็อตต่อเฟรมสำหรับแก้ปัญหาการชนกันจะมีค่าเหมาะสมกับจำนวนแท็กเพียงค่าหนึ่งเท่านั้น ในขณะที่อัลกอริทึมที่นำเสนอคือ AFS-SA ซึ่งมีเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตจะดีกว่า AF-SA อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อจำนวนแท็กในระบบมีจำนวนมากและจะต้องใช้จำนวนสล็อตในการแก้ปัญหามากขึ้น จึงเกิดเหตุการณ์ที่สามารถข้ามไม่ใช้งานสล็อตมากขึ้นด้วย

จากรูป 8(ข) จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ซึ่งจะเห็นว่าอัลกอริทึม FSA จะให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้นในช่วงแรกจนมีค่าสูงที่สุดและมีค่าลดลงตามจำนวนแท็กที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ โดยค่าสูงที่สุดนี้อธิบายได้ว่าจำนวนสล็อตต่อเฟรมสำหรับแก้ปัญหาการชนกันจะมีค่าเหมาะสมกับจำนวนแท็กเพียงค่าหนึ่งเท่านั้น เช่นที่ Framesize=30 สล็อต จะให้ค่า

ประสิทธิภาพสูงสุดเป็น 0.29 เมื่อมีจำนวน  $N=50$  แท็ก ส่วนอัลกอริทึมที่นำเสนอคือ AF-SA จะมีประสิทธิภาพลดลงเพียงเล็กน้อยต่อเนื่องไปตลอดตามจำนวนการเพิ่มขึ้นของแท็ก เหตุผลที่ประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากการใช้จำนวนสล็อตเพื่อแก้ปัญหาการชนกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดสล็อตที่ไม่ได้งานจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นอัลกอริทึม AFS-SA จึงมีส่วนช่วยลดการใช้งานสล็อตได้จำนวนมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นตามจำนวนแท็กที่เพิ่มขึ้นดังรูปนั่นเอง

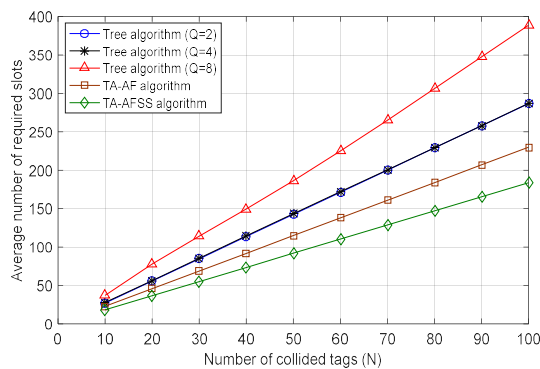


รูปที่ 8 สมรรถนะของอัลกอริทึม AF-SA และ AFS-SA

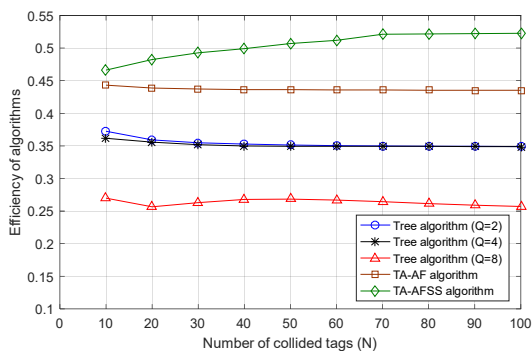
##### 4.2 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม TA-AF และ TA-AFSS

จากรูปที่ 9 จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่า  $\bar{L}_N$  ของอัลกอริทึมที่เรานำเสนอคือ TA-AF และ TA-AFSS รวมถึงการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม Tree algorithm ที่มีผู้นำเสนอมาแล้วซึ่งประกอบด้วยกรณี Q-ary = 2, 4 และ

8 สล็อต ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 9(ก) จะเห็นว่า กรณี  $Q\text{-ary} = 8$  สล็อต จะใช้สล็อตเพื่อแก้ปัญหาการชนกันมากที่สุดเท่ากับ 389 สล็อต ที่ค่า  $N=100$  แท้ ในขณะที่  $Q\text{-ary} = 2$  และ 4 สล็อต มีค่าใกล้เคียงกันมากต้องการใช้สล็อตเป็นจำนวนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 286 สล็อต โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอคือ TA-AF และ TA-AFSS จะใช้จำนวนสล็อตน้อยลงเป็น 230 และ 184 สล็อต ตามลำดับ เนื่องจากเทคนิคการปรับขนาดเฟรมและเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อต



(ก) การเปรียบเทียบค่า  $\bar{L}_N$



(ข) การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ

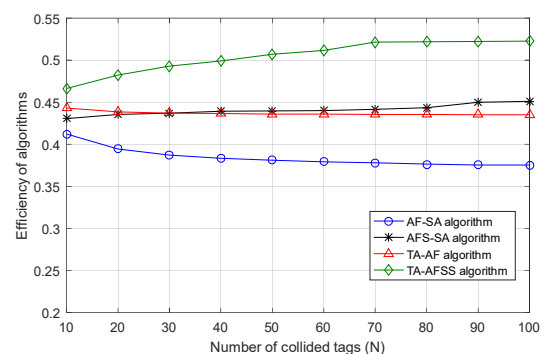
รูปที่ 9 สมรรถนะของอัลกอริทึม TA-AF และ TA-AFSS

จากรูปที่ 9(ข) จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ โดยภาพรวมจะเห็นว่าอัลกอริทึม TA-AF และ TA-AFSS จะให้ค่าประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่ ถึงแม้ว่าจำนวนแท็กจะเพิ่มมากขึ้น (ซึ่งแตกต่างจาก AF-SA และ AFS-SA อย่างชัดเจน) และมีความสอดคล้องกับจำนวนการใช้สล็อตในรูปที่ 9(ก) โดยเรียงลำดับ

ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากสูงสุดจนถึงต่ำสุดตามลำดับคือ TA-AFSS, TA-AF,  $Q = 2, 4$  และ 8 โดยเมื่อพิจารณาที่ค่า  $N=100$  แท้ จะมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.52, 0.43, 0.35, 0.35 และ 0.26 ตามลำดับ

#### 4.3 ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้งหมดที่นำเสนอ

จากรูปที่ 10 จะแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้งหมดที่นำเสนอในงานวิจัย เมื่อพิจารณาจากรูปจะพบว่าในภาพรวมจะมีประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึงแม้ว่าจะมีจำนวนแท็กในระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดีว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอทั้งหมดนี้มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการชนได้ดีในทุกๆ สถานการณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อัลกอริทึม TA-AFSS ที่มีเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตจะช่วยลดจำนวนการใช้สล็อตได้จำนวนมากและมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอย่างชัดเจน นอกจากนั้นผลลัพธ์นี้ยังแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตสามารถช่วยอัลกอริทึม AFS-SA ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเทียบเท่ากับ TA-AF ได้ ในกรณีที่แท็กในระบบมีจำนวนมากๆ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ค่า  $N=100$  แท้ เมื่อเรียงลำดับประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้งหมดจากสูงสุดจนถึงต่ำสุดตามลำดับคือ TA-AFSS, AFS-SA, TA-AF และ AF-SA จะมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.52, 0.45, 0.43 และ 0.37 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอทั้งหมด

## 5. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันสำหรับระบบอาร์เอฟเอไอซึ่ง

ประกอบด้วยอัลกอริทึม AF-SA, AFS-SA, TA-AF และ TA-AFSS โดยอาศัยเทคนิคการปรับขนาดเฟรมตัวเองและเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อต เราได้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมโดยพิจารณาจากจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมดและค่าประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม

จากผลการทดสอบพบว่าอัลกอริทึมทั้งหมดที่นำเสนอภาพรวมจะมีประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึงแม้ว่าจะมีจำนวนแท็กในระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดีว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอทั้งหมดนี้มีเสถียรภาพในการแก้ปัญหาการชนได้ดีในทุกๆ สถานการณ์ โดยอัลกอริทึม TA-AFSS มีประสิทธิภาพสูงสุด ในขณะที่ประสิทธิภาพของอัลกอริทึม TA-AF มากกว่า AFS-SA เล็กน้อยเมื่อมีแท็กที่เกิดการชนในระบบจำนวนมากๆ ส่วนอัลกอริทึม AF-SA มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด นอกจากนั้นยังสรุปได้ว่าเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นมากกว่าเทคนิคปรับขนาดเฟรมตัวเอง

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา สัญญาเลขที่ วจพ. 6/2560

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamental and applications in contactless smart cards and radio frequency identification, near-field communication*. The 3rd Edition, John Wiley and Sons, 2010.
- [2] D. K. Klair, K. W. Chin, R. Raad, "A survey and tutorial of rfid anti-collision protocols," *IEEE Commu. Surveys & Tutorial*, vol. 12, no. 3, pp. 400-421, 2010.
- [3] D. H. Shih, P. L. Sun, D. C. Yen, and S. M. Huang, "Taxonomy and survey of rfid anti-collision protocols: short survey," *Computer Commu.*, vol. 29, no. 11, 2006, pp. 2150–2166.
- [4] Z. Tang and Y. He, "Research of multi-access and anti-collision protocols in rfid systems," in *IEEE International Workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification*. Xiamen, China, 2007, pp. 377–380.
- [5] D. K. Klair, K.-W. Chin, and R. Raad, "An investigation into the energy efficiency of pure and slotted Aloha based rfid anti-collision protocols," in *IEEE WoWMoM*, Helsinki, Finland, 2007.
- [6] H. Wu and Y. Zeng, "Efficient framed slotted aloha protocol for rfid tag anticollision," *IEEE Trans. Automation Science and Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 581-588, 2011.
- [7] C. F. Lin and F. Y. S. Lin, "Efficient estimation and collision-group-based anticollision algorithms for dynamic frame-slotted aloha in rfid networks," *IEEE Trans. Automation Sci. and Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 840–48, Oct. 2010.
- [8] H. Wu, Y. Zeng, J. Feng, and Y. Gu, "Binary tree slotted aloha for passive rfid tag anti-collision," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 1, pp. 19–31, 2013.
- [9] J. Shin, B. Jeon, and D. Yang, "Multiple rfid tags identification with M-ary query tree scheme," *IEEE Comm. Letters*, vol. 17, no. 3, 2013.
- [10] X. Jia, Q. Feng, and C. Ma, "An efficient anti-collision protocol for rfid tag identification," *IEEE Communication Letter*, vol. 14, no. 11, pp. 1014–1016, 2010.

- [11] J. H. Choi, D. Lee, and H. Lee, "Query tree-based reservation for efficient rfid tag anti-collision," *IEEE Communication Letter*, vol. 11, no. 1, pp. 85–87, 2007.
- [12] J. B. Eom and T. J. Lee, "Accurate tag estimation for dynamic framed-slotted aloha in rfid systems," *IEEE Communication Letter*, vol. 14, no. 1, pp. 60–62, 2010.
- [13] W.T. Chen, "An accurate tag estimate method for improving the performance of a rfid anti-collision algorithm based on dynamic frame length aloha," *IEEE Trans. Automation Science and Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 9-15, 2009.
- [14] H. Wu and Y. Zeng, "Bayesian tag estimate and optimal frame length for anti-collision aloha rfid system," *IEEE Trans. Automation Science and Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 963-969, 2010.
- [15] T. F. La Porta, G. Maselli, and C. Petrioli, "Anti-collision protocols for single-reader rfid systems: temporal analysis and optimization," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 10, no. 2, pp. 267-279, 2011.
- [16] Y. C. Lai, L. Y. Hsiao, and B. S. Lin., "Optimal slot assignment for binary tracking tree protocol in rfid tag identification," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 23, no. 1, pp. 255–268, 2015.

## การออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี

### ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

### The Controller Design of LEDs Intensity

### Using Adaptive TABU Search Method

หทัยรัตน์ ทศน์วรรณ<sup>1</sup> กองพัน อารีรักษ์<sup>1\*</sup> ธิติพร มะชีโกวา<sup>2</sup> สุภาลัย อารีรักษ์<sup>3</sup>

<sup>1</sup>กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>3</sup>ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

Hathairat Tasworn<sup>1</sup> Kongpan Areerak<sup>1\*</sup> Thitiporn Machikowa<sup>2</sup> Subhalai Areerak<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Power Electronic, Energy, Machines and Control Research Group, School of Electrical

Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

<sup>2</sup>School of Crop Production Technology, Institute of Agricultural Technology,

Suranaree University of Technology

<sup>3</sup>Department of Biology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

\*Corresponding author Email: kongpan@sut.ac.th

(Received: October 17, 2020; Accepted: February 17, 2021)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เพื่อให้สามารถควบคุมความเข้มแสงที่ให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ผลจากงานวิจัยพบว่าผลตอบสนองความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี มีผลที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบจากวิธีการแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลการทดสอบจริง นำมาใช้ยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการออกแบบที่นำเสนอในงานวิจัย

**คำสำคัญ:** การออกแบบตัวควบคุม ความเข้มแสง แอลอีดี การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

#### ABSTRACT

This research presents the controller design of LEDs intensity using the adaptive TABU search. The aim of the research is the control the LEDs intensity within the response as fast as possible. The mathematical model of the proposed system derived from the generalized state – space averaging technique was used as the objective function for the adaptive TABU search algorithm. The results show that the LEDs intensity response is better than the response using the controller designed by

the conventional method. Moreover, the simulation and experimental results were used to validate the efficiency of the proposed controller design algorithm.

**Keyword:** Controller Design, Intensity, LEDs, Tabu Search.

## 1. บทนำ

ไดโอดเปล่งแสง (Light-emitting diodes , LEDs) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากหลอดแอลอีดี มีขนาดเล็ก อายุการใช้งานยาวนาน ปล่อยความร้อนน้อย และสามารถปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้หลากหลายกว่าแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดเมทัลฮาไลด์ หลอดโซเดียมความดันไอสูง และ หลอดอินแคนดรัสเซนต์ เป็นต้น ดังนั้นในปัจจุบันหลอดแอลอีดี จึงถูกประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเทียมในการเพาะปลูกพืชชนิดต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามพืชแต่ละชนิดมีความต้องการแสงที่แตกต่างกัน ดังนั้นต้องเลือกใช้แสงเทียมที่มีความยาวคลื่น และความเข้มแสงที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิด เพื่อให้พืชสามารถสังเคราะห์แสง และเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับตามธรรมชาติ [1] เช่น การให้แสงแอลอีดี สีแดง:ฟ้า (3:1) ที่ความเข้มแสง  $350 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  เป็นเวลา 16 ชั่วโมง/วัน กับสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ส่งผลให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีกว่าการเลี้ยงในแสงฟลูออเรสเซนต์ [2] การใช้แสงแอลอีดี สีแดง (6500K) : สีฟ้า (3000 K) (1:1) ที่ความเข้มแสง  $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  ส่งผลให้ต้นพืชมะเขือเทศพันธุ์ Purple มีอัตราการสังเคราะห์แสง และการเจริญเติบโตดีกว่าต้นที่ปลูกด้วยแสงชนิดเดียวกันที่ความเข้มแสง  $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  [3] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้แสง LED ในอัตราส่วนต่างๆเพื่อกระตุ้นให้พืชผลิตสารที่ต้องการเพิ่มขึ้น เช่น การให้แสงแอลอีดี สีแดง:สีฟ้า (3:1) ที่ความเข้มแสง  $215 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  กับต้นโหระพา ส่งผลให้ต้นโหระพามีสีที่สดใสมากขึ้น และการเจริญเติบโต รวมถึงการสังเคราะห์ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatiles) ได้ดีกว่าการใช้แสงสีแดง:สีฟ้า ที่อัตราส่วน 1:2 1:1 2:1 และ 4:1 [4] การปลูก

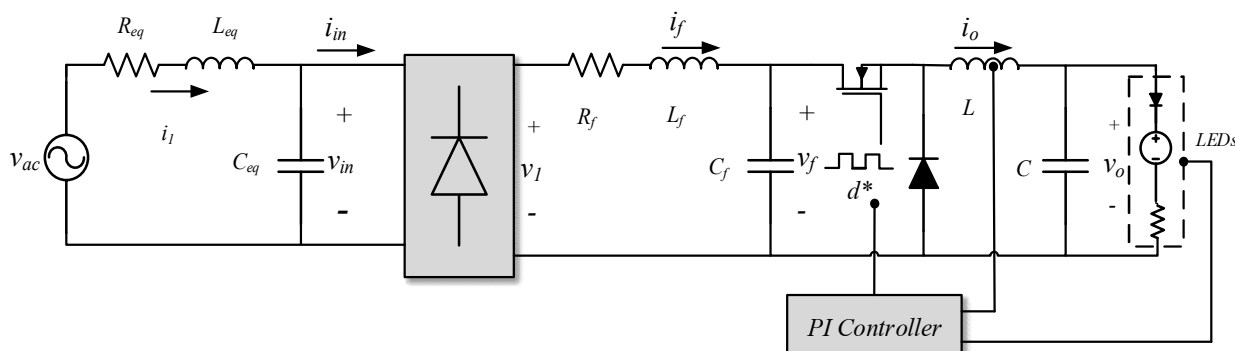
ผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดและเรดโอ๊คจากหลอดไฟแอลอีดี ที่ความเข้มแสง  $298.98 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ให้การเจริญเติบโตดีกว่าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ [5] เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของแอลอีดี ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ด้วยวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัพคัม ที่มีโหลดหลอดแอลอีดี ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัพคัม เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจร เมื่อนำมาออกแบบตัวควบคุมหรือวิเคราะห์เสถียรภาพ จะเกิดความยุ่งยากและซับซ้อน จึงต้องทำให้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป [6] เป็นวิธีที่ง่ายต่อการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง ดังนั้นงานวิจัยจึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัพคัม ที่มีโหลดเป็นแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี [7-10] ซึ่งจะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมไปเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเซิร์ชปรับตัว (adaptive tabu search: ATS) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS [11-12] นั้น จะส่งผลทำให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตนั้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี การ

ตรวจวัดแสงทำได้โดยการใช้เครื่องมือตรวจวัดแสงมาตรฐานคือ เครื่องวัดแสง (Lux meter) มีหลายรุ่นและหลายบริษัทที่ผลิตขึ้นที่สามารถวัดความเข้มของการส่องสว่างได้ ตั้งแต่ 0-20,000 Lux และคุณลักษณะของเครื่องวัดแสงต้องเป็นไปตามมาตรฐาน CIE 1931 ของคณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยความส่องสว่าง (International Commission on Illumination) หรือ ISO/CIE 10527 หรือเทียบเท่า จากข้อกำหนดดังกล่าวทำให้เครื่องมือวัดแสงส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องมือวัดความส่องสว่างโดยใช้เทคนิคตรวจวัดความส่องสว่างของแสงโดยใช้โมดูล GY-302 (Ambient Light Sensor Module) เป็นตัวเซนเซอร์รับแสงภายในหัววัดเพื่อนำไปประมวลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ในการวัดและเปรียบเทียบความส่องสว่างหรือตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแสง โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดความส่องสว่างจากแหล่งกำเนิดแสง โดยให้แสดงผลการวัดบนหน้าจอ LCD ขนาด 16x2 ตัวอักษร และสำหรับการประมวลผลจะทำการเก็บข้อมูลและประมวลผลโดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MEGA2560 [13-14] ข้อดีของเครื่องมือที่ประดิษฐ์นั้นคือ ใช้งานง่าย สะดวกปลอดภัย ง่ายต่อการบำรุงรักษา รวมถึงเป็นการนำเทคโนโลยีที่มีอยู่มาพัฒนาให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเป็นการลดการนำเข้าของสินค้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง

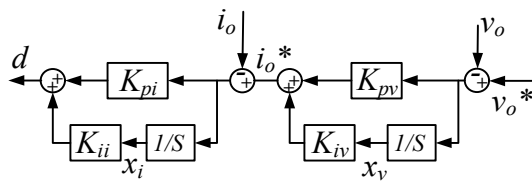
การวัดความหนาแน่นของแสงในขณะที่มีพืชมีการสังเคราะห์แสงช่วงระยะเรียก Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) มีหน่วยเป็น  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  จึงทำให้งานวิจัยนี้ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างในหน่วย Lux ทางไฟฟ้า และในหน่วย  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  ทางพืช พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมความเข้มแสงบนคอมพิวเตอร์ และผลการตอบสนองจากชุดทดสอบด้วย

## 2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

วงจรที่ใช้ควบคุมความเข้มแสงของหลอดไฟแอลอีดีแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $v_{ac}$ ) 220 V<sub>rms</sub> สายส่งกำลังฝั่งเอซี ( $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$ ,  $C_{eq}$ ) วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี ( $R_f$ ,  $L_f$ ,  $C_f$ ) ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคค์ ( $L$ ,  $C$ ) ที่มีโหลดเป็นแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี และควบคุมความเข้มแสง ( $I_o$ ) ที่ขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต และกระแสเอาต์พุต ( $i_o$ ) ด้วยตัวควบคุมพีไอสองตัวเรียงกันแบบคาสเคดแสดงดังรูปที่ 2 โดยจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว



รูปที่ 1 วงจรควบคุมความเข้มแสงที่พิจารณา



รูปที่ 2 ตัวควบคุมพีไอสองตัวเรียงกันแบบคาสเคด

นำสัญญาณควบคุม  $d$  (Control signal) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Sawtooth compare signal) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณพัลส์เบิดยูเอม (PWM) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง  $d^*$  และ  $d$  เป็นไปตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$d^* = \frac{d}{A_r} \quad (1)$$

เมื่อ  $d$  สัญญาณการควบคุม

$d^*$  ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์

$A_r$  ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปของ  $d^*$  แสดงดังสมการที่ (2) และกำหนดให้  $x_v$  และ  $x_i$  เป็นตัวแปรสถานะของลูการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูการควบคุมกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$d = -K_{pi}i_o - K_{pv}K_{pi}v_o + K_{iv}K_{pi}x_v + K_{ii}x_i + K_{pv}K_{pi}v_o^* \quad (2)$$

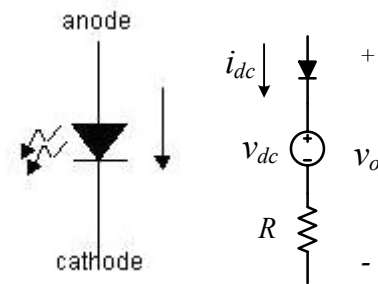
$$\dot{x}_v = -v_o + v_o^* \quad (3)$$

$$\dot{x}_i = -i_L - K_{pv}v_o + K_{iv}x_v + K_{pi}v_o^* \quad (4)$$

เมื่อ  $K_{pv}, K_{pi}$  ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ  
 $K_{iv}, K_{ii}$  ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอ  
 $x_v, x_i$  อัตราการเปลี่ยนแปลงวงรอบกระแสและแรงดันของวงจรแปรผันแบบบัทค์  
 $v_o$  แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปรผันแบบบัทค์  
 $v_o^*$  แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด

### 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยหลอดแอลอีดีมีสัญลักษณ์และแบบจำลองเชิงเส้น แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัญลักษณ์และแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี

จากแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (5)

$$v_o = v_{dc} + i_{dc}R \quad (5)$$

เมื่อ  $v_{dc}$  แรงดันไฟฟ้าของหลอดแอลอีดี

$i_{dc}$  กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอดแอลอีดี

$R$  ตัวต้านทานของหลอดแอลอีดี

จากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป switched model มีตัวแปรสถานะ 8 ตัว คือ  $i_1, v_{in}, i_f, v_f, i_o, v_o, x_v$  และ  $x_i$  พิจารณาเฉพาะส่วนประกอบมูลฐานในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และละทิ้งค่าแรงดันกระแสเชื่อมในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทำงานในโหมดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำต่อเนื่อง (CCM) ดังนั้นการกำหนดตัวแปรสเตทของแบบจำลองจึงเหลือเพียง 10 ตัว ดังนี้

$$\text{เมื่อ } k = 1 \quad \begin{aligned} i_1 &= x_1 + jx_2 \\ v_{in} &= x_3 + jx_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } k = 0 \quad i_f &= x_5 \\
 v_f &= x_6 \\
 i_o &= x_7 \\
 v_o &= x_8 \\
 x_v &= x_9 \\
 x_i &= x_{10}
 \end{aligned}$$

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}$  คือ ตัวแปรสถานะของแบบจำลอง GSSA สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรูปของแบบจำลองตัวแปรสถานะแสดงดังสมการที่ (6)

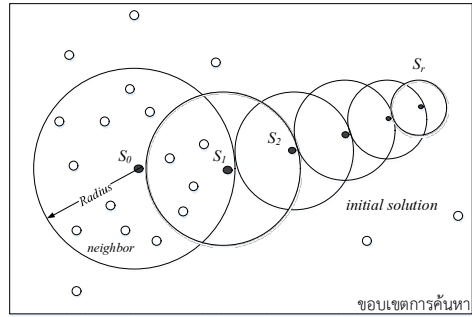
$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_1 + \omega x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_3 \\
 \dot{x}_2 &= -\omega x_1 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_4 - \frac{1}{2L_{eq}}v_m \\
 \dot{x}_3 &= \frac{1}{C_{eq}}x_1 + \omega x_4 \\
 \dot{x}_4 &= \frac{1}{C_{eq}}x_2 - \omega x_3 + \frac{2}{\pi C_{eq}}x_5 \\
 \dot{x}_5 &= -\frac{4}{\pi L_{eq}}x_4 - \frac{R_f}{L_f}x_5 - \frac{1}{L_f}x_6 \\
 \dot{x}_6 &= \frac{1}{C_f}x_5 + \frac{K_{pi}}{A_r C_f}x_7x_7 + \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_r C_f}x_7x_8 - \frac{K_{iv}K_{pi}}{A_r C_f}x_7x_9 \\
 &\quad - \frac{K_{ii}}{A_r C_f}x_7x_{10} - \frac{K_{pv}K_{pi}v_o^*}{A_r C_f}x_7 \\
 \dot{x}_7 &= -\frac{K_{pi}}{A_r L}x_6x_7 - \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_r L}x_6x_8 + \frac{K_{iv}K_{pi}}{A_r L}x_6x_9 \\
 &\quad + \frac{K_{ii}}{A_r L}x_6x_{10} + \frac{K_{pv}K_{pi}v_o^*}{A_r L} - \frac{1}{L}x_8 \\
 \dot{x}_8 &= \frac{1}{C}x_7 - \frac{1}{RC}x_8 + \frac{1}{RC}v_{dc} \\
 \dot{x}_9 &= -x_8 + v_o^* \\
 \dot{x}_{10} &= -x_7 - K_{pv}x_8 + K_{iv}x_9 + K_{pi}v_o^*
 \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ  $v_m$  ค่าแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่าย  
 $\omega$  ค่าความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

#### 4. การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (ATS)

##### 4.1 การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search: TS) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น อัลกอริทึมนี้ได้พัฒนาขึ้นโดย กองพัน อารีรักษ์ และสรารุณี สุจิตจร ในปี พ.ศ. 2545 (K-N. Areerak and S. Sujitjorn, 2002) โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบู่ธรรมดา คือ การเดินย้อนรอย (Back tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive radius) กลไกการเดินย้อนรายนั่นใช้แก้ปัญหาสำหรับการติดอยู่ในคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimum) สำหรับกลไกการปรับรัศมีการค้นหา จะทำการปรับลดรัศมีการค้นหาในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด อัลกอริทึมการค้นหาแบบ ATS ถูกสร้างขึ้นในรูปแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีหลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 4 การค้นหาคำตอบด้วย ATS

จากรูปที่ 4 สามารถเขียนเป็นขั้นตอนของอัลกอริทึมการค้นหาได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 โปรแกรมจะทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น (Initial solution) ซึ่งในกรณีนี้คือ  $K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}$  และ  $K_{ii}$  ตามจำนวนที่กำหนดไว้ภายในขอบเขตค้นหา เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดมาเป็นคำตอบเริ่มต้น ( $S_0$ ) โดยที่การประเมินคำตอบว่าดีหรือไม่นั้นพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ( $J$ ) ซึ่งรายละเอียดของการประเมินค่า

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมนี้จะแสดงในหัวข้อที่ 4.2 สำหรับกระบวนการค้นหาจะกำหนดให้  $S_{best}$  คือ ค่าตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาในรอบที่ผ่านมา ดังนั้นในรอบแรกนี้จึงกำหนดให้  $S_{best}$  มีค่าเท่ากับ  $S_0$

ขั้นตอนที่ 2 นำ  $S_0$  มาใช้เป็นตำแหน่งศูนย์กลางเพื่อใช้สุ่มคำตอบในบริเวณใกล้เคียง (Neighbour) ตามจำนวนที่กำหนดไว้ โดยการสุ่มจะอยู่ภายในรัศมีการค้นหา (Radius) จากนั้นนำคำตอบที่ดีที่สุดของการสุ่มในบริเวณใกล้เคียง ( $S_1$ ) มาเปรียบเทียบกับ  $S_{best}$  โดยประเมินจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตามเงื่อนไขคือ ถ้า  $S_1$  มีผลการประเมินที่ดีกว่า  $S_{best}$  ให้  $S_{best} = S_1$  มิเช่นนั้นแล้วให้  $S_{best} = S_{best}$  นอกจากนี้ยังมีการปรับลดรัศมีการค้นหา หากพบคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งการปรับลดรัศมีเป็นไปตามสมการที่ (7)

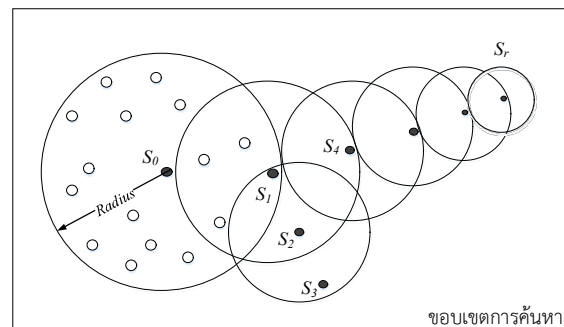
$$Radius(new) = \frac{Radius(old)}{DF} \quad (7)$$

เมื่อ  $DF$  คือ อัตราปรับลดรัศมี

ขั้นตอนที่ 3 ดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 โดยเปลี่ยนจาก  $S_0$  เป็น  $S_1$  และดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 โดยเปลี่ยนจาก  $S_1$  เป็น  $S_2$

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการซ้ำ ตามขั้นตอนที่ 3 โดยมีการเปลี่ยนแปลงจาก  $S_k$  เป็น  $S_{k+1}$  และทำซ้ำไปจนครบจำนวนรอบการค้นหา (Round) ที่กำหนดไว้ ซึ่งคำตอบในรอบสุดท้ายกำหนดให้เป็น  $S_f$  และในกรณีที่การค้นหาไม่พบคำตอบที่ดีขึ้น กลไกการเดินย้อนรอยจะถูกนำมาใช้โดยมีกระบวนการ คือ หากการค้นหาคำตอบพบว่ามีผลการประเมินค่าที่ทำให้  $S_{best} = S_{best}$  ติดต่อกันครบตามจำนวน  $b$  ที่กำหนดไว้ ให้  $S_k$  มีค่าเท่ากับ  $S_{k-b}$  ตัวอย่างการเดินย้อนรอยแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อกำหนดให้  $b$  เท่ากับ 2 และพบว่าคำตอบ  $S_1$  มีค่า  $W$  เท่ากับ 0.3 ซึ่งเป็นตำแหน่งของ  $S_{best}$  ในปัจจุบัน จากนั้นค้นหาคำตอบ  $S_2$  ได้ค่า  $W$

เท่ากับ 0.4 ดังนั้นคำตอบ  $S_1$  ยังคงมีผลการประเมินที่ดีกว่า  $S_2$  จึงกำหนดให้  $S_{best} = S_{best}$  จากนั้นดำเนินการค้นหาคำตอบ  $S_3$  ได้ค่า  $W$  เท่ากับ 0.35 ซึ่งยังคงเป็นคำตอบที่แย่กว่า  $S_1$  จึงกำหนดให้  $S_{best} = S_{best}$  เป็นครั้งที่ 2 ติดต่อกัน ซึ่งครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ กลไกการเดินย้อนรอยจึงเริ่มทำงาน โดยปรับให้คำตอบ  $S_3$  กลับไปอยู่ที่ตำแหน่งของ  $S_1$  เพื่อหาคำตอบในทิศทางเดินใหม่



รูปที่ 5 การเดินย้อนรอยขณะการค้นหาคำตอบด้วย ATS

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อครบจำนวนรอบการค้นหา คำตอบที่ดีที่สุด หรือ  $S_{best}$  จะถูกส่งมาเป็นคำตอบของกระบวนการค้นหา ซึ่งถือว่าสิ้นสุดกระบวนการ

นอกจากนี้อัลกอริทึมของ ATS จะมีพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาที่เหมาะสมกับระบบแต่ละชนิด ถ้าเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบยิ่งขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

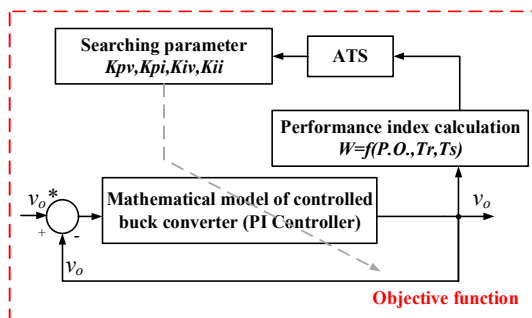
- Initial number neighbour คือ จำนวนการสุ่มคำตอบเริ่มต้นในการค้นหา โดยอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้
- Round คือ จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ
- Number neighbour คือ จำนวนการสุ่มคำตอบในแต่ละรอบการค้นหา โดยการสุ่มจะอยู่ภายในรัศมีการค้นหา
- Radius คือ รัศมีการค้นหาคำตอบรอบจุดคำตอบเดิม โดยมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของขอบเขตการค้นหา
- DF คือ อัตราปรับลดรัศมีเมื่อพบคำตอบตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยที่  $DF > 1$

#### 4.2 วิธีการค้นหาแบบดั้งเดิม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของอุปกรณ์กระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์แรงดันไฟฟ้าที่ต่อเรียงกันแบบ คาสเคด ( $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$ ,  $K_{ii}$ ) ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เป็นวิธีที่ขั้นตอนการออกแบบง่ายไม่ซับซ้อนและมีการผลตอบแทนที่ดี ซึ่งสมการของตัวควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบและค่าทางสมรรถนะของตัวควบคุม คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio:  $\zeta$ ) และ ความถี่ธรรมชาติของ  $\omega_n$  โดยที่  $\omega_{ni}$  คือ ความถี่ธรรมชาติของกระแสไฟฟ้า และ  $\omega_{nv}$  คือ ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า กำหนดให้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์  $\zeta = 0.8$ ,  $\omega_{nv} = 175$  rad/s และ  $\omega_{ni} = 3500$  rad/s ดังนั้นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ จะมีค่า  $K_{pv} = 0.0116$ ,  $K_{iv} = 6.738$ ,  $K_{pi} = 4.21$  และ  $K_{ii} = 9208.6$

#### 4.3 วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยด้วยการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เป็นการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำให้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตมีสมรรถนะดีที่สุด จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไว้สำหรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุม การค้นหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีตามูเชิงปรับตัวสามารถดำเนินการตามแผนภาพบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาด้วยวิธีตามูเชิงปรับตัว

จากรูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาด้วยวิธีตามูเชิงปรับตัว มีการออกแบบการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ( $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$ ,  $K_{ii}$ ) จากขอบเขตที่กำหนด ซึ่งในการค้นหาพารามิเตอร์ในแต่ละรอบนั้น ระบบจะตรวจสอบค่า  $W$  และจะทำการค้นหาจนกว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ( $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$ ,  $K_{ii}$ ) ที่ทำให้ผลการตอบสนองดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ค่า  $W$  มีค่าน้อยที่สุด

$$W(T_{Rp.u.}, T_{Sp.u.}, P.O., T_s) = \sigma T_R + \alpha T_S + \gamma P.O. \quad (8)$$

และ  $\sigma, \alpha, \gamma$  มีความสัมพันธ์คือ

$$\sigma + \alpha + \gamma = 1 \quad (9)$$

เมื่อ  $P.O.$  คือ การพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot)

$T_R$  คือ ช่วงเวลาขึ้น (rise time)

$T_s$  คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time)

$\sigma, \alpha$  และ  $\gamma$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของ  $T_R$ ,  $T_s$  และ  $P.O.$  ตามลำดับ

งานวิจัยนี้กำหนดค่าของ  $\sigma, \alpha$  และ  $\gamma$  ไว้ที่ 0.34, 0.33 และ 0.33 ตามลำดับ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจะพยายามค้นหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้ค่าวัตถุฟังก์ชัน  $W$  น้อยที่สุด

สำหรับขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์ ได้กำหนดจากค่าแบนด์วิธการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมกระแส ที่อยู่ระหว่างค่าแบนด์วิธจากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมดังนี้  $\omega_{nv} = 150 - 400$  rad/s และ  $\omega_{ni} = 1500 - 4500$  rad/s ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ค่า  $\omega_{ni}$  มีค่ามากกว่า  $\omega_{nv}$  ประมาณ 10 เท่า จะได้ขอบเขตล่างและขอบเขตบนของพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม  
[ $\omega_{nv} = 150\text{-}400 \text{ rad/s}$  และ  $\omega_{ni} = 1500\text{-}4500 \text{ rad/s}$ ]

| พารามิเตอร์ | ขอบเขต     |          |
|-------------|------------|----------|
|             | ขอบเขตล่าง | ขอบเขตบน |
| $K_{pv}$    | 0.0028     | 0.0908   |
| $K_{iv}$    | 4.95       | 35.2     |
| $K_{pi}$    | 1.8        | 5.143    |
| $K_{ii}$    | 1691.73    | 14062.5  |

การค้นหาค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวจะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่า คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การกำหนดพารามิเตอร์มีดังนี้

จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ  
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ  
รัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5  
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

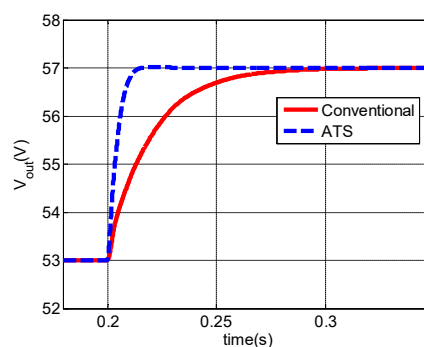
จากการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอัลกอริทึมการค้นหาค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวภายใต้ขั้นตอนการออกแบบข้างต้น นำไปออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีตามเชิงปรับตัว แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS

| พารามิเตอร์ของตัวควบคุม | วิธีการออกแบบ   |          |
|-------------------------|-----------------|----------|
|                         | วิธีแบบดั้งเดิม | วิธี ATS |
| $K_{pv}$                | 0.0116          | 0.0447   |
| $K_{iv}$                | 6.738           | 28.1829  |
| $K_{pi}$                | 4.21            | 4.4754   |
| $K_{ii}$                | 9208.6          | 1908.1   |
| $W$                     | 0.0655          | 0.007391 |

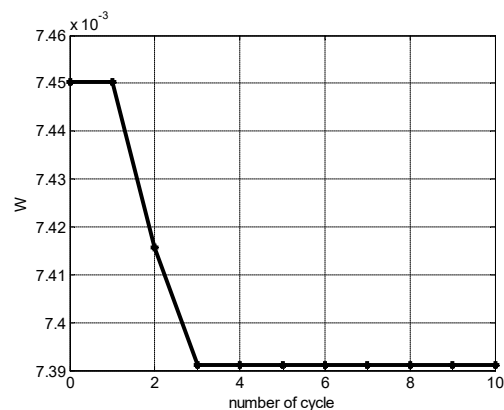
## 5. ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งทำการเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS โดยใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 2 ในการจำลองสถานการณ์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด ( $v_o^*$ ) จาก จาก 53 V ไปเป็น 57 V ที่เวลาเท่ากับ 0.2 วินาที ตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จากรูปที่ 7 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ได้อย่างถูกต้อง เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่ผ่านการทดสอบมาออกแบบตัวควบคุมพีไอ พบว่าค่า  $W$  มีการลู่เข้าดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การลู่เข้าของค่า  $W$  ด้วยวิธี ATS

## 6. ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์และผลการทดสอบ

### 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (Lux) กับค่า PPFD ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )

การวัดค่าความเข้มแสงทางพืชในขณะที่พืชทำการสังเคราะห์แสงมีหน่วยเป็น  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  แต่เซนเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบคือโมดูล GY-302 ที่มีหน่วยเป็น Lux จึงจำเป็นต้องมีการแปลงหน่วย ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงทางไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็น Lux กับหน่วย  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  ทางพืช จะดำเนินการผ่านการทดสอบโดยอาศัยเครื่องมือวัดวัดค่าทั้งสอง ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (Lux) กับค่า PPFD ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )

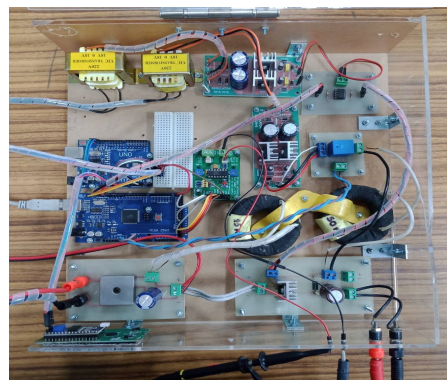
| $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ | Lux  |
|-------------------------------------|------|
| 80                                  | 4380 |
| 100                                 | 5500 |
| 120                                 | 6670 |
| 140                                 | 7640 |
| 160                                 | 8790 |

นำค่าที่ได้จากการทดสอบ (ตารางที่ 2) ไปหาสมการความสัมพันธ์ พบว่ามีค่าความสัมพันธ์คือ 1 Lux มีค่าเท่ากับ  $0.018 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  หรือ  $1 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  มีค่าเท่ากับ 55.56 Lux

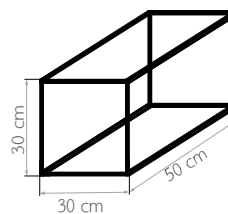
### 6.2 การสร้างชุดทดสอบ

การทดสอบการเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมความเข้มแสงเอด์พุต ที่มีความสัมพันธ์กันกับแรงดันไฟฟ้าเอด์พุต ของระบบดังรูปที่ 1 ซึ่งหลังจากการออกแบบรวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบ จึงได้ชุดทดสอบจริงที่ใช้ในงานวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยการทดสอบสำหรับควบคุมความเข้มแสงเอด์พุตของวงจร ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO รุ่น MEGA 2560 ในการประมวลผล และใช้โมดูล GY-302 เป็นเซนเซอร์วัดความเข้มแสงซึ่งมีหน่วยเป็น Lux ทำการ

แปลงให้เป็นหน่วยของ  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  โดยคุณตัวปรับคูณเท่ากับ 0.018 โดยโครงสร้างของชุดควบคุมความเข้มแสงหลอดแอลอีดีนี้เป็นชั้นวางของกว้าง 50 ซม. x 30 ซม. สูง 30 ซม. สามารถประยุกต์วางต่อกันเป็นชั้นๆได้ ชุดไฟส่องสว่าง ใช้หลอดแอลอีดีแบบเส้น (LED STRIP) ขนาดกำลังไฟฟ้า 12 วัตต์ที่ต่อเรียงกันแบบขนาน 3 เส้น และอนุกรมกัน 5 ชุด ดังรูปที่ 10 จะได้ค่าความเข้มแสงสูงสุดที่  $180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$



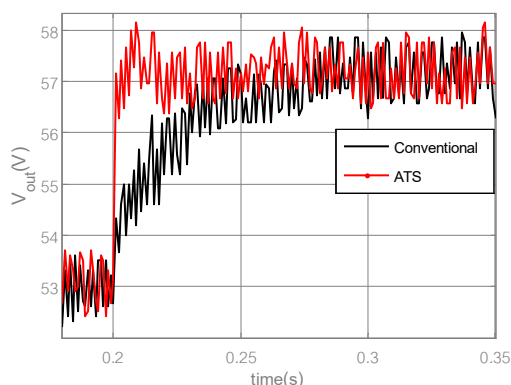
รูปที่ 9 ชุดทดสอบตัวควบคุมความเข้มแสง



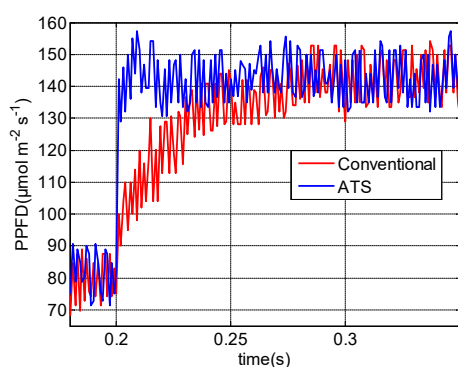
รูปที่ 10 แบบโครงสร้างกล่องและการออกแบบกล่องปลูก  
ผักที่ใช้ในงานวิจัย

### 6.3 ผลการทดสอบจากชุดทดสอบ

ทำการทดสอบควบคุมความเข้มแสงเอด์พุตของหลอดแอลอีดี โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจาก  $80 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  ไปเป็น  $140 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  ที่เวลา 0.2 วินาที โดยเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธี ATS เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุม ผลการตอบสนองของแรงดันเอด์พุตตกคร่อมแอลอีดี รวมถึงผลการตอบสนองของความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี



รูปที่ 11 ผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่  
ตกคร่อมหลอดแอลอีดีของชุดทดสอบ



รูปที่ 12 ผลการตอบสนองความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี  
ของชุดทดสอบ

ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบดังรูปที่ 11 และ 12 มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งผลเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าชุดทดสอบที่อาศัยการออกแบบด้วย ATS ให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ทั้งแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมแอลอีดี และความเข้มแสงเอาต์พุต

## 7. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี โดยไฟเส้นแอลอีดีแบบ 12 V ที่มีความเข้มแสงสูงสุดของชุดทดสอบมีค่า  $180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  เพื่อให้ได้ค่าความเข้มแสงที่ทำให้ได้ผลตอบสนองทางพลวัตที่เร็วที่สุด ผ่านการออกแบบตัว

ควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบตัวควบคุม ยืนยันผลการตอบสนองของความเข้มแสงด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลจากชุดทดสอบจริง ที่ควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO รุ่น MEGA 2560 เป็นตัวประมวลผลและใช้โมดูล GY-302 เป็นเซนเซอร์วัดความเข้มแสง แสดงให้เห็นว่าการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม งานวิจัยนี้สามารถใช้กับระบบได้จริง อีกทั้งยังควบคุมค่าความเข้มแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

## 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] G.D. Massa, H.-H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Mitchell, "Plant productivity in response to LED lighting." *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 43 (7), pp. 1951–1956, Dec. 2008.
- [2] S. Jaturongloumlart, J. Promya and J. Varith, "Modeling of Spirulina Growth Rate with LED Illumination and Applications," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 24 (1), pp. 142-151, Jan-Apr. 2017.
- [3] T. Jamaree, P. Kanjanapachot, S. Jaturongloumlart and S. Sakornvasee, "The effect of LED light on growth of Petunia hybrida Vilm 'Purple' under a semi-closed

- plant production system,” *The National Academic Conference*, Vol. 3, Mar. 2017, pp. 184-191.
- [4] G. Pennisi, S. Blasioli, A. Cellini, L. Maia, A. Crepaldi, I. Braschi, F. Spinelli, S. Nicola, J. A. Fernandez, C. Stanghellini, L.F.M. Marcelis, F. Orsini, and G. Gianquinto, “Unraveling the Role of Red:Blue LED Lights on Resource Use Efficiency and Nutritional Properties of Indoor Grown Sweet Basil.” *Front. Plant Sci.*, No. 10, Vol. 305, pp. 1-14, Mar. 2019.
- [5] P. Petchthai and T. Thongket, “Effect of Light Intensity and Light-Exposure Duration on Growth and Quality of Lettuce,” *Songklanakarin Journal of Plant Science*, Vol. 4, No. 3, Jul-Sep. 2017.
- [6] S. Udomsuk, K-N. Areerak and K-L. Areerak, “Mathematical Model of a Single-Phase Uncontrolled Rectifier Feeding a Buck Converter” *European Journal of Scientific Research*, vol. 50, no. 1, pp. 89-98, Feb. 2011.
- [7] G. Li, S. Yu and J. Shi, “Dynamic response analysis of buck driver for LED based on second-order model,” *IET Journal*, No. 24, Vol. 52, pp. 2005–2007, Nov. 2016.
- [8] R. Lin, “Modeling and Compensator Design of LED Driver Systems,” in *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-6, Nov. 2017.
- [9] M. Leng and G. Zhou, “Stability Analysis for Peak Current-Mode Controlled Buck LED Driver Based on Discrete-Time Modeling,” *IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS*, Vol. 6, pp. 1567-1580, Sep. 2018.
- [10] M. Fernando Menke, Á. Raniere Seidelmand R. Varella Tambara, “LLC LED Driver Small-Signal Modeling and Digital Control Design for Active Ripple Compensation,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 66, pp. 387 – 396, Jan. 2019.
- [11] T. Sopapirm, K-N. Areerak, K-L. Areerak, and A. Srikaew, "The Application of Adaptive Tabu Search Algorithm and Averaging Model to the Optimal Controller Design of Buck Converters", *World Academy of Science Engineering and Technology*, issue 60, pp. 477-483, Dec. 2011.
- [12] S. Chonsatidjamroen, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, “The Optimal Cascade PI Controller Design of Buck Converters,” in *2012 IEEE 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2012, pp. 1-4.
- [13] N. Sirithong, S. Katathikarnkul and S. Khongpugdee, “Design and Development Lux Meter,” *Thaksin University Journal*, No. 17, vol. 3 (special), pp. 44-50, Dec. 2014.
- [14] A. Leelaratsamee and S. Detchjarat, “A Smart Lighting Control System Using DALI Protocol,” *Journal of Energy Research*, No. 8, Vol. 2, pp. 45-53, Feb. 2011.

# การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซีลอจิก

## The Maximum Power Point Tracking of Stand-alone Photovoltaic System Using Fuzzy Logic

กรกฎ คงสวัสดิ์\* เทพพนม โสภะเพิ่ม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Korakod Kongsawat\* Thappanom Sopapirm

Department of electrical power engineering, Mahanakorn university of technology

\*Corresponding author Email: Winrunner45@gmail.com

(Received: December 25, 2020; Accepted: March 8, 2021)

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซีลอจิก ที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบัก เพื่อพัฒนาให้ระบบมีการตอบสนองที่รวดเร็ว ดังนั้นจึงมีการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานกับวิธีการรบกวนและสังเกต พบว่าวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีฟัซซีลอจิกนั้นมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีการรบกวนและสังเกตในช่วงสภาวะเริ่มต้นการทำงานของระบบและช่วงสภาวะความเข้มแสงที่มีการเปลี่ยนแปลง ระบบจึงสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจึงได้มีการสร้างชุดทดสอบที่ได้ออกแบบขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการรบกวนและสังเกต

**คำสำคัญ:** การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด วิธีการรบกวนและสังเกต วิธีฟัซซีลอจิก

### Abstract

This paper presents the maximum power point tracking of stand-alone photovoltaic system using fuzzy logic method. That will be applied in buck converter circuit for developing system to faster convergence Therefore, computer simulations are simulated in order to compare performance characteristics of perturbation and observation methods found that fuzzy logic method faster convergence than the perturbation and observation method state during the system initialization and the irradiance condition changes, so the system can effectively the maximum power of the photovoltaic system and therefore creating equipment that was designed. The results reviewed that fuzzy logic method could track rapid maximum power and accurate than with perturbation and observation method.

**Keyword:** Maximum power point tracking, Perturbation and observation, Fuzzy logic.

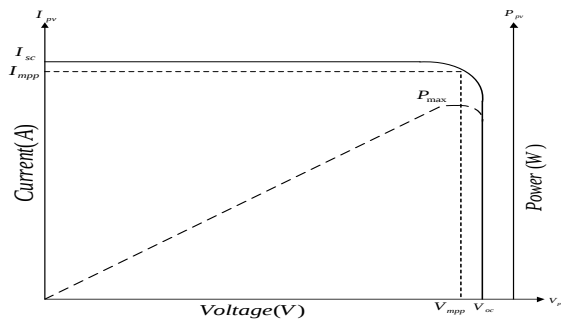
## 1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell หรือ Photovoltaic : PV) [1] ถือเป็นพลังงานที่มีความเป็นที่ยอมรับ เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีเสียงรบกวนในขณะผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยจะอาศัยปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ ( $W/m^2$ ) ที่ตกกระทบกับแผงโซลาร์เซลล์ (PV Panel) ซึ่งส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic system) มีอยู่ 2 ระบบคือระบบอิสระ (Stand-alone system) และระบบเชื่อมต่องาน (Grid connection) แต่ในบทความนี้จะเลือกใช้งานระบบอิสระเพื่อลดความซับซ้อนของระบบ โดยจะมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบัพคัพที่มีโพลเป็นแบบเตอร์ ในขณะที่สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบปกติจะไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในแต่ละสถานะความเข้มแสง (Maximum Power Point: MPP) จึงมีการพัฒนาระบบที่สามารถควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทุกสถานะความเข้มแสง (Maximum Power Point Tracking: MPPT) จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน มีการพัฒนาอัลกอริทึมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดหลากหลายวิธีที่ถูกนำมาใช้งานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น วิธีแรงดันเปิดวงจร (Fractional Open Circuit Voltage:  $V_{oc}$ ) [2] วิธีกระแสลัดวงจร (Fractional Short Circuit Current:  $I_{sc}$ ) [2] วิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: IncCond) [2] วิธีรบกวนและสังเกต (Perturbation and observation [3-6] วิธีอ้างอิงกระแส (Current based Method) [7] และวิธีฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic Method) [8-12] เป็นต้น โดยวิธีรบกวนและสังเกตเป็นวิธีที่มีความนิยมในอดีตที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและอัลกอริทึมไม่มีความซับซ้อนในการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวมีการตอบสนองที่ค่อนข้างช้าในสถานะเริ่มต้นการทำงานของ

ระบบและช่วงที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงอีกทั้งยังมีการแกว่งของสัญญาณรอบ ๆ จุดปฏิบัติการ จึงมีการพัฒนาวิธีฟัซซีลอจิกเพื่อที่จะปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของระบบ พบว่าระบบมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกต โดยวิธีฟัซซีลอจิกจะอาศัยการรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มาคำนวณหาค่าความผิดพลาดและค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเข้าสู่ระบบโดยอาศัยการตัดสินใจผ่านค่าความเป็นสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีที่ได้กำหนดไว้ในตัวควบคุมและจะให้เอาต์พุตเป็นแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) โดยจะให้การอนุมานกฎด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย Takagi-Sugeno ที่จะสามารถจ่ายแรงดันอ้างอิงค่าสูง ๆ ได้ในกรณีระบบมีค่าความผิดพลาดมาก ๆ และในขณะเดียวกันในกรณีที่ระบบมีค่าความผิดพลาดน้อย ๆ ระบบก็จะสามารถจ่ายแรงดันอ้างอิงที่ค่าต่ำ ๆ ให้มีความเหมาะสมกับสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งแตกต่างจากวิธีรบกวนและสังเกตที่จะส่งแรงดันอ้างอิงได้เพียงแค่ค่าเดียวตามที่ผู้ออกแบบได้กำหนด โดยแรงดันอ้างอิงดังกล่าวนั้นจะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟัซซีเพื่อทำการสร้างสัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle : D) ของวงจรแปลงผันแบบบัพคัพให้ระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทุกสถานะความเข้มแสง โดยจะมีการจำลองสถานการณ์การบนคอมพิวเตอรืและนำผลการจำลองสถานการณ์ของวิธีฟัซซีลอจิกไปเปรียบเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกตพบว่าวิธีที่นำเสนอมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกตในทุกสถานะความเข้มแสง นอกจากนี้ได้มีการออกแบบสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบในสภาวะแวดล้อมเสมือนจริงโดยใช้แสงเทียม จากการทดสอบพบว่าวิธีฟัซซีลอจิกมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกต ในสถานะเริ่มต้นการทำงานของระบบ สภาวะที่มีการเพิ่มความเข้มแสงและสภาวะที่มีการลดความเข้มแสงส่งผลให้ระบบสามารถควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. คุณสมบัติเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ ซึ่งจะสามารถแสดงกราฟคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการกำหนดความเข้มแสงที่ค่ามาตรฐานที่ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร ( $\text{W/m}^2$ ) และอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) ได้ดังรูปที่ 1



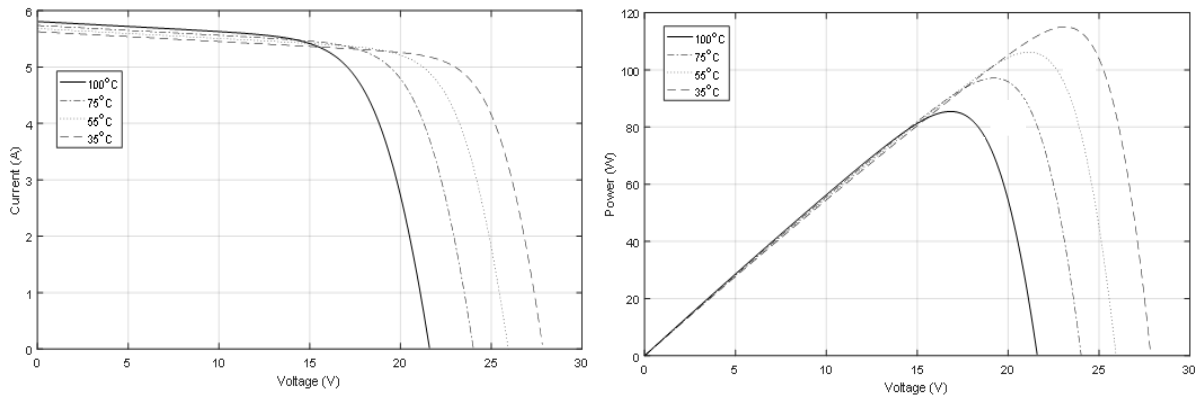
รูปที่ 1 กราฟคุณสมบัติเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 เมื่อมีการกำหนดค่าความเข้มแสงดังกล่าว เซลล์แสงอาทิตย์จะมีจุดที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตามสถานะความเข้มแสงที่ตกกระทบ (Maximum power point : MPP) ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญคือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{mpp}$ ) และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{mpp}$ ) ซึ่งถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมในขณะนั้น จึงจำเป็นต้องมีการใช้ระบบที่สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยหลักการควบคุมค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังและตัวแปรสำคัญที่จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าได้แตกต่างกันคือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจะส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ถ้าหากความเข้มแสงมีค่าน้อยเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้น้อยแต่ถ้าหากความเข้มแสงมีค่ามากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสามารถจ่าย

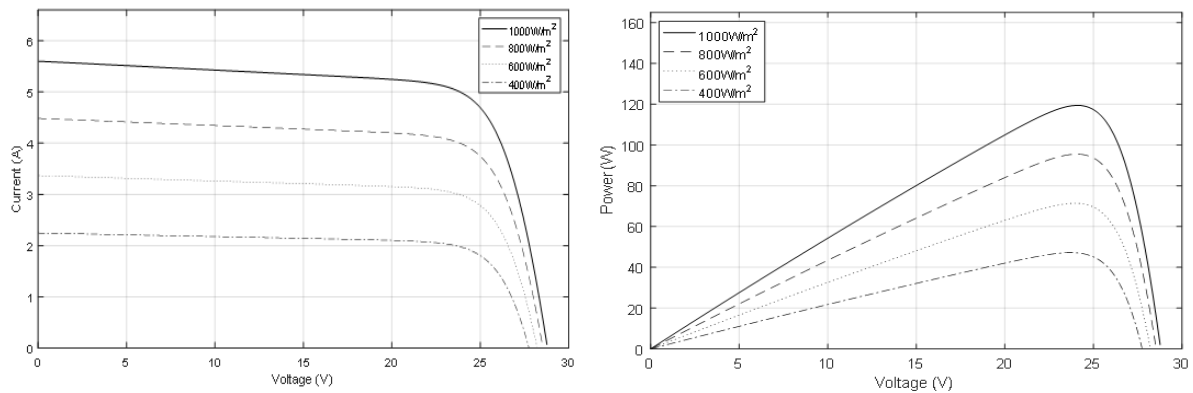
กำลังไฟฟ้าได้มากตามความเข้มแสงที่ตกกระทบได้ดังรูปที่ 2 และพิจารณาที่อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าหากอุณหภูมิสูงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะนั้นจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยลงดังรูปที่ 3

## 3. การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าตามสถานะความเข้มแสงที่ตกกระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ระบบควบคุมทั่วไปจะไม่สามารถควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมจึงจำเป็นต้องใช้ระบบที่มีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทุกสถานะแวดล้อม โดยอัลกอริทึมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี วิธีที่มีความนิยมคือวิธีรบกวนและสังเกตซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานแต่มีการตอบสนองที่ช้าและมีการแกว่งของสัญญาณรอบ ๆ จุดปฏิบัติการ เนื่องจากมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงได้เพียงค่าเดียว แต่ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีพีซีแอลจิกซึ่งเป็นวิธีที่มีการตอบสนองที่รวดเร็วเพราะจะมีการกำหนดย่านแรงดันอ้างอิงได้หลายค่าตามที่ผู้ออกแบบกำหนดไว้ซึ่งสามารถทำให้ระบบจ่ายแรงดันอ้างอิงได้เหมาะสมกับค่าความผิดพลาดที่จะประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบัสคัทและใช้โหลดเป็นแบตเตอรี่ซึ่งเป็นระบบอิสระ การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดที่คำนวณจากแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวต้องการให้ระบบมีค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์หรือเท่ากับศูนย์ โดยในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมค่าความผิดพลาดจะไม่เท่ากับศูนย์หรือระบบยังไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ จึงเป็นหน้าที่ของตัวควบคุมที่จะทำการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

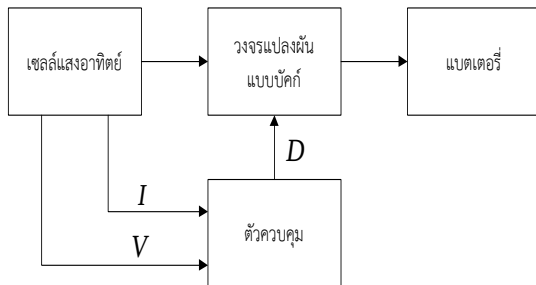


รูปที่ 2 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ



รูปที่ 3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสง

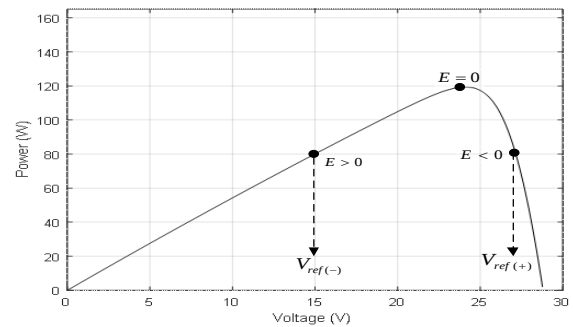
ในระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 4 ส่วนคือเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรแปลงผันแบบบักค์ ตัวควบคุมและแบตเตอรี่



รูปที่ 4 ระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบอิสระที่จะมีการเก็บพลังงานเข้าสู่

แบตเตอรี่โดยอาศัยการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีอัลกอริทึมเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ ในสภาวะแวดล้อม ณ ขณะนั้นเพื่อทำให้ระบบสามารถค้นหาค่าจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ในส่วนของทฤษฎีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 5



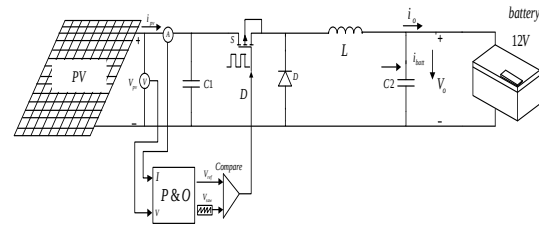
รูปที่ 5 กราฟทฤษฎีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากรูปที่ 5 เมื่อตัวควบคุมรับค่าความผิดพลาดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งถ้าหากค่าความผิดพลาดมากหมายถึงจุดการทำงานอยู่ห่างไกลจากจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยระบบจะทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาดของระบบ ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่าศูนย์  $E > 0$  หรือ  $\Delta P / \Delta V > 0$  ระบบจะทำการลดแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) หรือลดค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคเพื่อที่จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์หรือเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าหากค่าความผิดพลาดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าศูนย์  $E < 0$  หรือ  $\Delta P / \Delta V < 0$  ระบบจะทำการเพิ่มแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) หรือเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคเพื่อที่จะลดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์หรือเท่ากับศูนย์

### 3.1 วิธีรับทวนและสังเกต

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีรับทวนและสังเกตจะอาศัยการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และคำนวณหาค่าความผิดพลาดเพื่อที่จะเพิ่มหรือลดแรงดันอ้างอิงที่ได้ถูกกำหนดไว้โดยผู้ออกแบบและนำแรงดันอ้างอิงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยในการสร้างค่าวัฏจักรหน้าที่และส่งไปยังวงจรแปลงผันแบบบัคเพื่อที่จะควบคุมพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงของวิธีดังกล่าวให้มค่าน้อยจะทำให้ระบบมีการตอบสนองที่ช้าและถ้าหากกำหนดให้น้อยจนเกินไประบบจะไม่สามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะขณะนั้น แต่ในทางกลับกันถ้าหากผู้ออกแบบมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงมากระบบก็จะมี การตอบสนองที่เร็วขึ้นแต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการกำหนดแรงดันอ้างอิงมากจนเกินไประบบจะมีการแกว่งของสัญญาณและจะไม่สามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในสภาวะขณะนั้น ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีฟัซซี่ลอจิกที่สามารถควบคุมการปรับค่าแรงดันอ้างอิงให้สามารถปรับขนาดแรงดันอ้างอิงได้ตามค่าความผิดพลาดของระบบโดยอาศัยการตัดสินใจของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่มีการกำหนดย่านของเอาต์พุตตามผู้ออกแบบและในส่วน

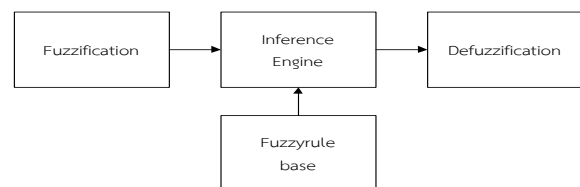
ของภาพรวมของระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีรับทวนและสังเกตได้ดังรูปที่ 6



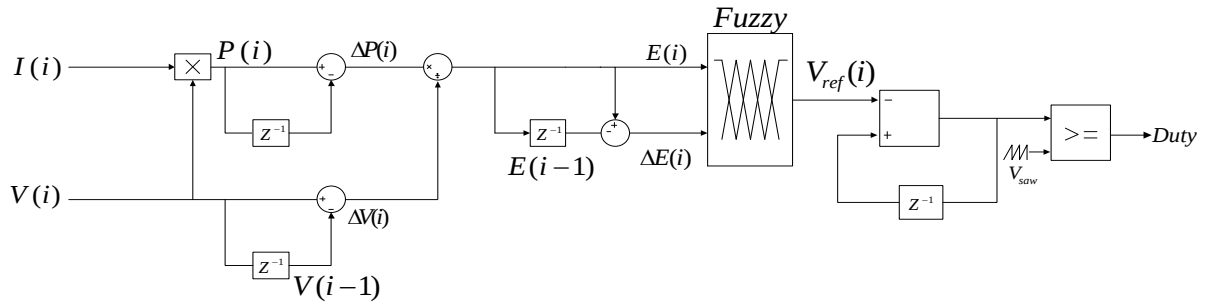
รูปที่ 6 ระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีรับทวนและสังเกต

### 3.2 วิธีฟัซซี่ลอจิก

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีฟัซซี่ลอจิกจะอาศัยการรับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งภาพรวมของระบบเหมือนกับวิธีรับทวนและสังเกตแต่จะมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันโดยตัวควบคุมฟัซซี่จะมีค่าอินพุตซึ่งถูกนำมาป้อนให้กับตัวควบคุมฟัซซี่ทั้งหมดสองอินพุตคือค่าความผิดพลาด ( $E$ ) และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด ( $\Delta E$ ) โดยนำค่าอินพุตทั้งสองเข้าสู่กระบวนการฟัซซี่ (Fuzzification) และนำค่าที่ได้เข้าสู่กระบวนการประเมินกฎ (Linguistic rules) เมื่อได้ผลลัพธ์จะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเป็นการอนุมานกฎ (Defuzzification) ด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย Takagi-Sugeno ที่สามารถเลือกย่านการทำงานตามค่าความผิดพลาดโดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่ามาก ๆ ระบบจะทำการเพิ่มค่าแรงดันอ้างอิงให้มาก ๆ และเมื่อระบบเข้าสู่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดหรือเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวระบบจะจ่ายแรงดันอ้างอิงใกล้เคียงกับศูนย์หรือเท่ากับศูนย์ ชุดบล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมฟัซซี่และระบบภายในของตัวควบคุมฟัซซี่ดังรูปที่ 7 และ รูปที่ 8



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก



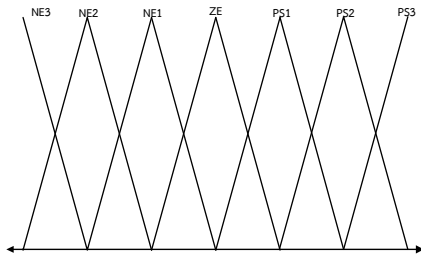
รูปที่ 8 ระบบภายในของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

จากรูปที่ 8 เมื่อระบบรับค่าความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดและให้เอาต์พุตเป็นแรงดันอ้างอิงเพื่อนำสัญญาณที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟัซซีเพื่อให้ระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำ สมการคำนวณค่าความผิดพลาด ( $E$ ) ที่ประกอบไปด้วยค่ากำลังไฟฟ้า ( $P$ ) แรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด ( $\Delta E$ ) ที่ประกอบไปด้วยค่าความผิดพลาดปัจจุบัน ( $E$ ) และค่าความผิดพลาดก่อนหน้า ( $E_{i-1}$ ) เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2)

$$E(i) = \frac{P(i) - P(i-1)}{V(i) - V(i-1)} \quad (1)$$

$$\Delta E(i) = E(i) - E(i-1) \quad (2)$$

ในส่วนของค่าตัวแปรทางภาษาทางด้านของอินพุตทั้งสองอินพุตกำหนดให้เป็นฟังก์ชันสามเหลี่ยม เนื่องจากทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานที่จะมีการกำหนดค่าตัวแปรเชิงภาษาทั้งหมด 7 ภาษาเพื่อให้มีความเหมาะสมกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา ดังรูปที่ 9

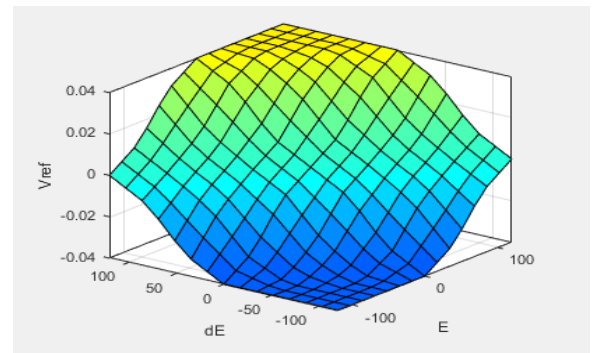


รูปที่ 9 ค่าตัวแปรเชิงภาษาทางด้านอินพุตของตัวควบคุม

จากรูปที่ 9 ค่าตัวแปรทางภาษาที่กำหนดมีทั้งหมด 7 ตัวแปร ดังนี้ NE3 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นลบมาก ๆ), NE2 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นลบปานกลาง), NE1 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นลบน้อยหรือเข้าใกล้ศูนย์), ZE1 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นศูนย์หรืออยู่ที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด), PS3 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นบวกมาก ๆ), PS2 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นบวกปานกลาง), PS1 (หมายถึงระบบมีค่าเป็นบวกน้อยหรือเข้าใกล้ศูนย์) ค่าตัวแปรเชิงภาษาทางด้านอินพุตดังกล่าวจึงได้ถูกรวมทั้งหมด 49 กฎ และภาพพื้นผิวสามมิติได้ดัง ตารางที่ 1 และรูปที่ 10 ตามลำดับ

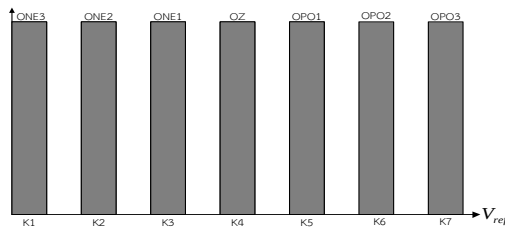
ตารางที่ 1 แสดงกฎระหว่างอินพุตและเอาต์พุต

| Input Fuzzy | $\Delta E$ |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------------|------|------|------|------|------|------|
|             | NE3        | NE2  | NE1  | ZE   | PO1  | PO2  | PO3  |
| E           | NE3        | ONE3 | ONE3 | ONE3 | ONE3 | ONE2 | ONE1 |
|             | NE2        | ONE3 | ONE3 | ONE3 | ONE2 | ONE1 | OZ   |
|             | NE1        | ONE3 | ONE3 | ONE2 | ONE1 | OZ   | OPO1 |
|             | ZE         | ONE3 | ONE2 | ONE1 | OZ   | OPO1 | OPO2 |
|             | PS1        | ONE2 | ONE1 | OZ   | OPO1 | OPO2 | OPO3 |
|             | PS2        | ONE1 | OZ   | OPO1 | OPO2 | OPO3 | OPO3 |
|             | PS3        | OZ   | OPO1 | OPO2 | OPO3 | OPO3 | OPO3 |



รูปที่ 10 พื้นผิว 3 มิติ ทางด้านอินพุตและเอาต์พุต

จากตารางที่ 1 จะได้กฎทั้งหมด 49 กฎซึ่งจะมีการกำหนดเอาต์พุตด้วยการอนุมานโดยการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ยที่มีลักษณะเป็นแท่งตรงโหนดดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ฟังก์ชันแสดงความสัมพันธ์ทางด้านการเอาต์พุต

จากรูปที่ 11 ค่าตัวแปรทางภาษาทางด้านเอาต์พุตจะกำหนดทั้งหมด 7 ตัวแปร ดังนี้ ONE3 (หมายถึงระบบต้องการลดแรงดันอ้างอิงมาก ๆ), ONE2 (หมายถึงระบบต้องการลดแรงดันอ้างอิงปานกลาง), ONE1 (หมายถึงระบบต้องการลดแรงดันอ้างอิงน้อยมาก ๆ), OZ (หมายถึงระบบไม่มีการเพิ่มหรือลดแรงดันอ้างอิง), OPO3 (หมายถึงระบบต้องการบวกแรงดันอ้างอิงมาก ๆ), OPO2 (หมายถึงระบบต้องการบวกแรงดันอ้างอิงปานกลาง), OPO1 (หมายถึงระบบต้องการบวกแรงดันอ้างอิงน้อยมาก ๆ) จากนั้นจะคำนวณหาค่าเอาต์พุตด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ยประกอบไปด้วย ค่าความสัมพันธ์สมาชิกเอาต์พุต  $\mu(k_m)$  และค่าคงที่เอาต์พุตที่เป็นแท่งตรงโหนด ( $k_m$ ) ดังสมการที่ (3)

$$x_{WA} = \frac{\sum_{m=1}^m \mu(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^m \mu(k_m)} \quad (3)$$

#### 4. การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB จะมีการจำลองสถานการณ์เพื่อทำการเปรียบเทียบระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งหมด 2 วิธี คือวิธีรบกวนและสังเกตกับวิธีฟัซซี่ลอจิกและในส่วนของการพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

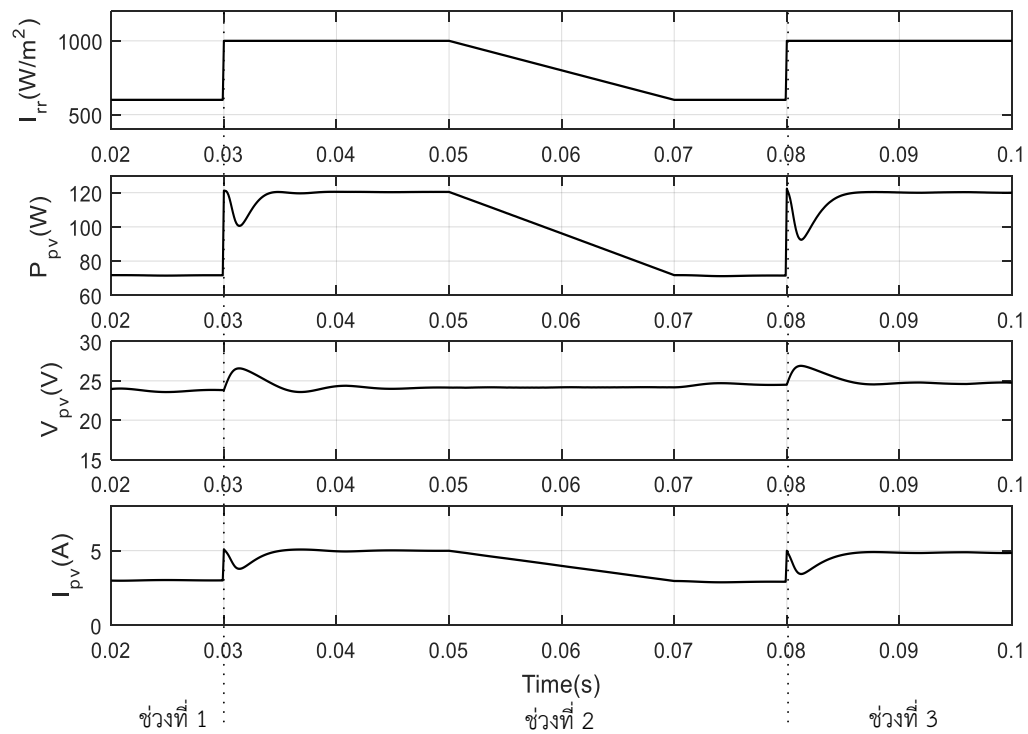
| เซลล์แสงอาทิตย์     | ค่า         |
|---------------------|-------------|
| $V_{mpp}$           | 24.1 V      |
| $I_{mpp}$           | 4.98 A      |
| $V_{oc}$            | 28.8 V      |
| $I_{sc}$            | 5.56 A      |
| $P_{max}$           | 120 W       |
| วงจรแปลงผันแบบบัสค์ | ค่า         |
| $C_1$               | 500 $\mu$ F |
| $C_2$               | 100 $\mu$ F |
| $L$                 | 1 mH        |
| $f_{sw}$            | 10 kHz      |
| $V_{batt}$          | 12 V        |

#### 4.1 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีฟัซซี่ลอจิก

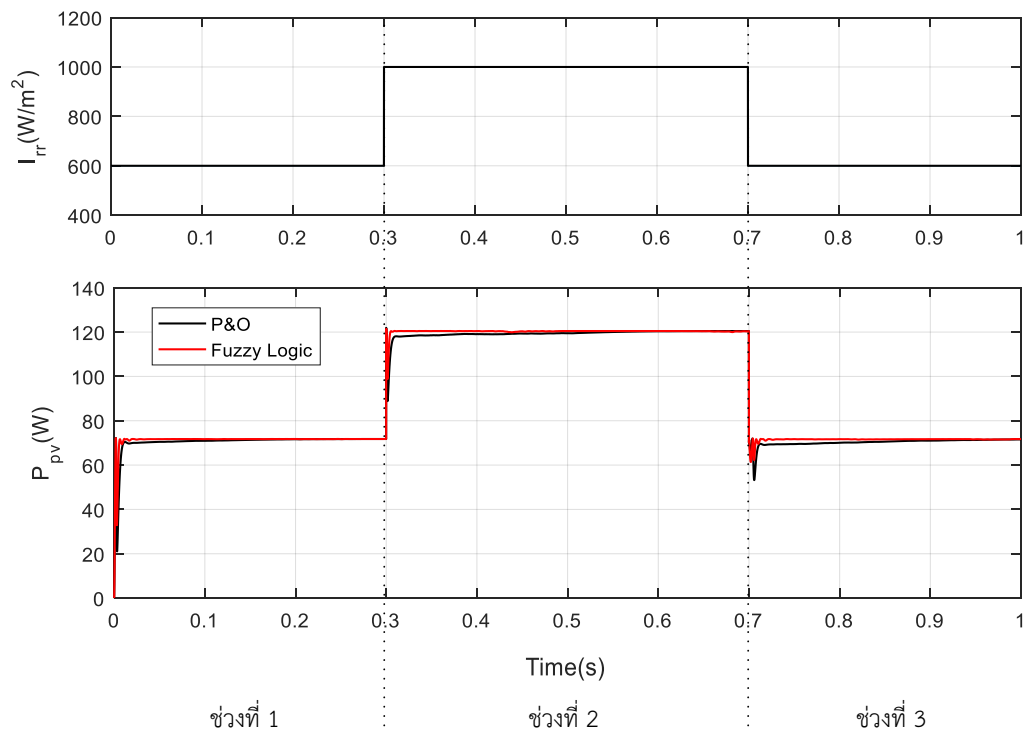
ในการจำลองสถานการณ์จะมีทั้งหมด 3 ช่วงที่อุณหภูมิ 25 °C ช่วงที่ 1 จะป้อนความเข้มแสงที่ 600 W/m<sup>2</sup> และเพิ่มเป็น 1000 W/m<sup>2</sup> (ที่เวลา 0.03วินาที) ในช่วงที่ 2 จะลดความเข้มแสงแบบลาดเอียงจากความเข้มแสง 1000 W/m<sup>2</sup> ลงมาที่ความเข้มแสง 600 W/m<sup>2</sup> (ที่เวลา 0.05วินาที) และในช่วงที่ 3 จะเพิ่มความเข้มแสงจาก 600 W/m<sup>2</sup> กลับไปที่ 1000 W/m<sup>2</sup> พบว่าระบบสามารถตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วที่ได้ดังรูปที่ 12

#### 4.2 ผลการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์จะมีทั้งหมด 3 ช่วงที่อุณหภูมิ 25 °C ช่วงที่ 1 จากความเข้มแสง 0 W/m<sup>2</sup> เพิ่มเป็น 600 W/m<sup>2</sup> และช่วงที่ 2 จะเพิ่มความเข้มแสงจาก 600 W/m<sup>2</sup> เป็น 1000 W/m<sup>2</sup> (ที่เวลา 0.3 วินาที) และในช่วงที่ 3 จะลดความเข้มแสงจาก 1000 W/m<sup>2</sup> เป็น 600 W/m<sup>2</sup> เนื่องจากเป็นค่าความเข้มแสงที่นิยมใช้ในการจำลองสถานการณ์เพราะเป็นค่าความเข้มแสงค่ากลางและค่าสูงสุดดังรูปที่ 13



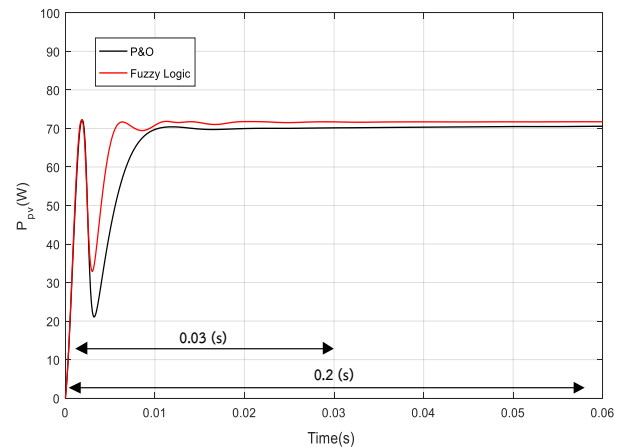
รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีฟัซซีลอจิกที่มีการเปลี่ยนสถานะความเข้มแสง



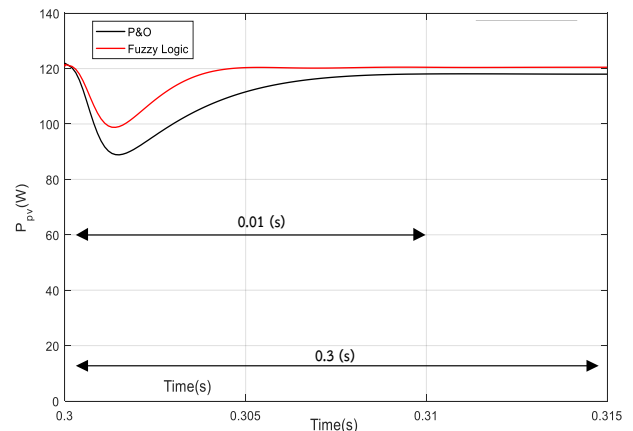
รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่มีการเปรียบเทียบวิธีฟัซซีลอจิกกับวิธีรบกวนและสังเกต

จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งหมด 3 ช่วงที่มีการเปรียบเทียบวิธีฟัซซีลอจิกกับวิธีรบกวนและสังเกตพบว่าวิธีรบกวนและสังเกตมีการตอบสนองที่ช้ากว่าวิธีฟัซซีลอจิกเนื่องจากวิธีรบกวนและสังเกตเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวจะเกิดการแกว่งของสัญญาณรอบ ๆ จุดปฏิบัติการ ดังนั้นการลดการแกว่งของสัญญาณรอบ ๆ จุดปฏิบัติการจึงต้องกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงให้มีค่าน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อตอบสนองของระบบที่ช้าลง พิจารณาในช่วงที่ 1 ที่ความเข้มแสง  $0-600 \text{ W/m}^2$  ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.03 วินาที แต่วิธีรบกวนและสังเกตสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.2 วินาที และพิจารณาในช่วงที่ 2 ที่มีการเพิ่มความเข้มแสง  $600 \text{ W/m}^2$  ถึง  $1000 \text{ W/m}^2$  พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 0.01 วินาทีแต่วิธีรบกวนและสังเกตสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เวลา 0.3 วินาที พิจารณาในช่วงที่ 3 ที่จะมีการลดความเข้มแสงจาก  $1000 \text{ W/m}^2$  ลดลงเหลือ  $600 \text{ W/m}^2$  พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกมีการตอบสนองที่รวดเร็วและยังมีการเกิดสภาวะชั่วคราวที่น้อยกว่าวิธีรบกวนและสังเกตที่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 0.03 วินาที แต่วิธีรบกวนและสังเกตมีการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว 0.3 วินาที และยังมีการแกว่งของสัญญาณมากกว่าวิธีฟัซซีลอจิกซึ่งเกิดจากการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงได้เพียงค่าเดียวในสภาวะสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาวิธีรบกวนและสังเกตจึงไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน ซึ่งแตกต่างจากวิธีฟัซซีลอจิกที่จะมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงได้หลายย่านตามสภาวะแวดล้อมในขณะนั้นที่จะอาศัยการประเมินของตัวควบคุมฟัซซีที่จะตัดสินใจจากจุดการทำงานอยู่ไกลจากจุดปฏิบัติการที่จะเพิ่มแรงดันอ้างอิงที่มีขนาดที่มาก ๆ และเมื่อระบบเริ่มเข้าใกล้จุดปฏิบัติการระบบจะตัดสินใจให้ปรับแรงดันอ้างอิงให้น้อยมาก ๆ หรือเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งส่งผลให้ระบบมีการแกว่งของสัญญาณน้อยในขณะที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวและยังมีการตอบสนองที่รวดเร็วและแม่นยำทั้ง

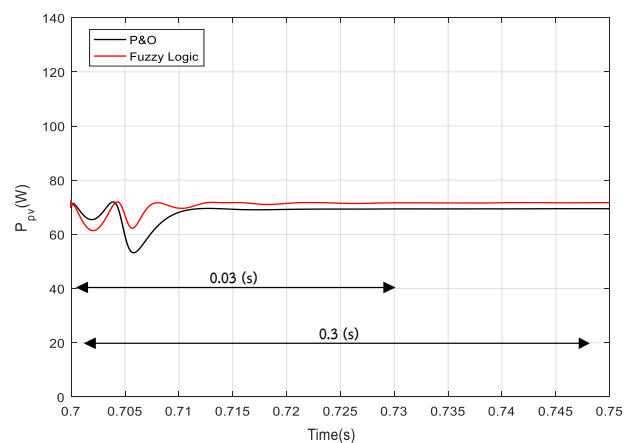
ในสภาวะเริ่มต้นของระบบและสภาวะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 3 ช่วง ดังรูปที่ 14 รูปที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ



รูปที่ 14 ช่วงเริ่มต้นการทำงานของระบบ



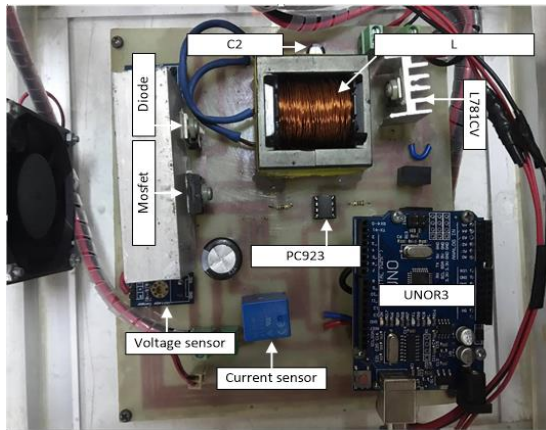
รูปที่ 15 ช่วงเพิ่มความเข้มแสง



รูปที่ 16 ช่วงลดความเข้มแสง

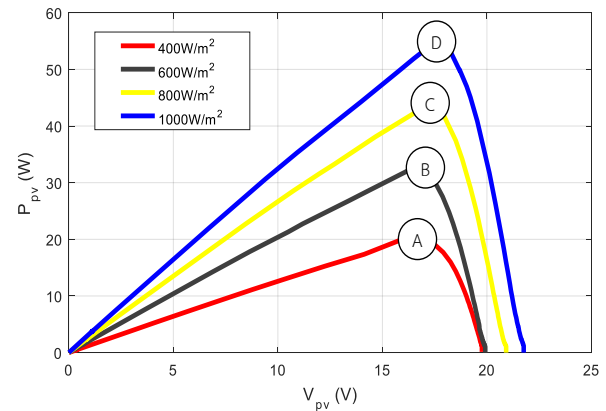
## 5. การสร้างชุดทดสอบ

การสร้างชุดทดสอบเพื่อใช้ในการยืนยันว่าการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีพีชชีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริงและยังมีการตอบสนองที่รวดเร็วโดยการสร้างชุดทดสอบจะประกอบไปด้วยเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่จะนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการคำนวณหาค่าความผิดพลาดและสร้างสัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่และเข้าสู่ตัวไอซี PC923L เพื่อนำสัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่ได้ไปขับสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังรูปที่ 17

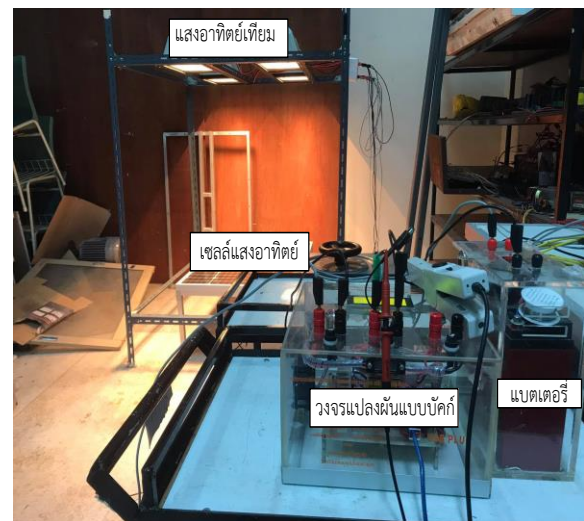


รูปที่ 17 ภาพรวมชุดฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น

ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการจำลองโดยใช้แสงเทียมเนื่องจากในการเขียนอัลกอริทึมมีความจำเป็นต้องใช้ความเข้มแสงที่มีความคงที่ ซึ่งในบทความนี้จะเลือกการนำเสนอความเข้มแสงที่  $400 \text{ W/m}^2$   $600 \text{ W/m}^2$   $800 \text{ W/m}^2$  และ  $1000 \text{ W/m}^2$  โดยการใช้มิเตอร์วัดค่าความเข้มแสงรุ่น SM206-SOLAR ที่จะวัดค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละเซลล์และจะทำการพล็อตกราฟคุณลักษณะเฉพาะของแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่อง Power Meter WT500 เป็นไปตามรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ตามลำดับ



รูปที่ 18 กราฟคุณลักษณะแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า

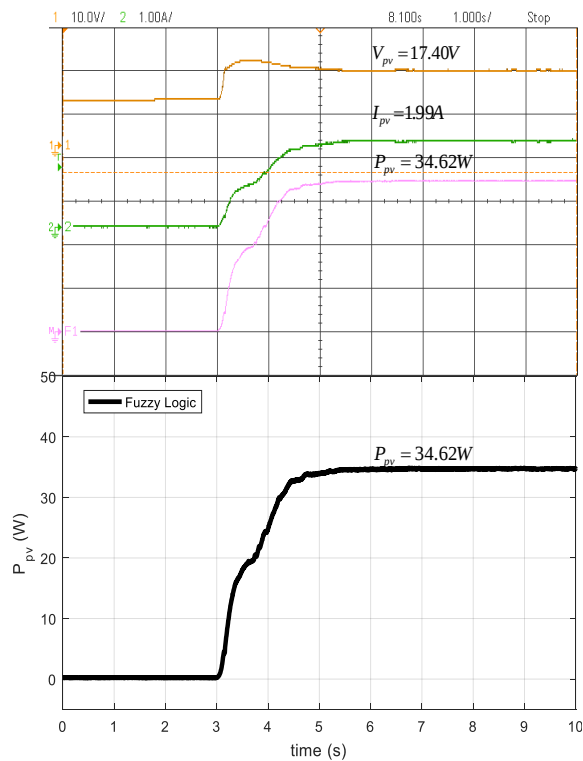
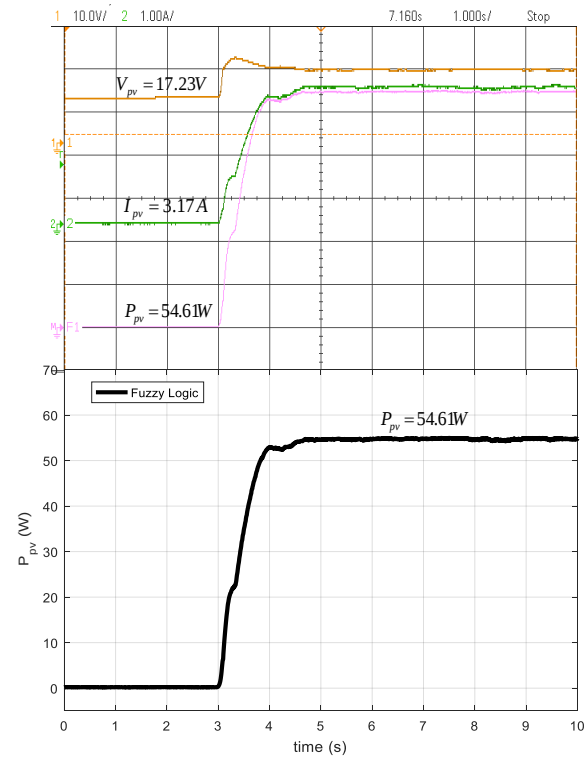
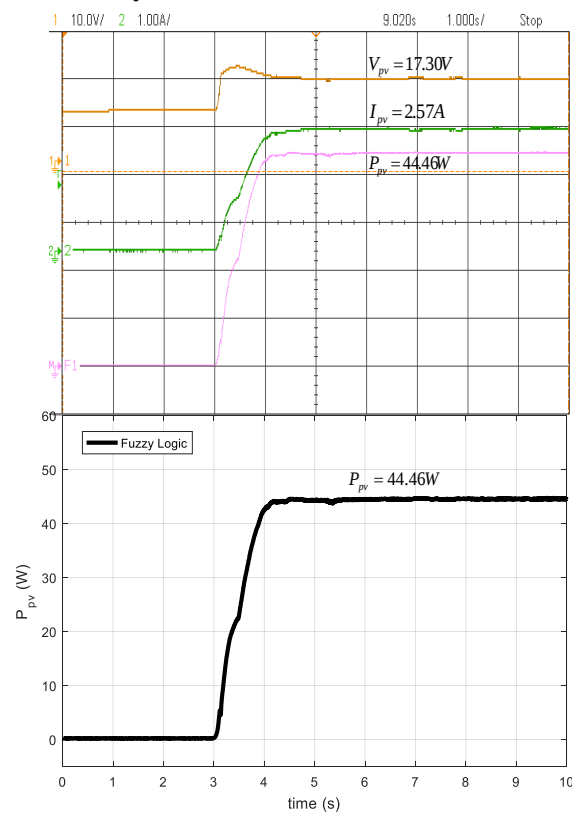


รูปที่ 19 การทดสอบโดยใช้แสงเทียมในห้องปฏิบัติการ

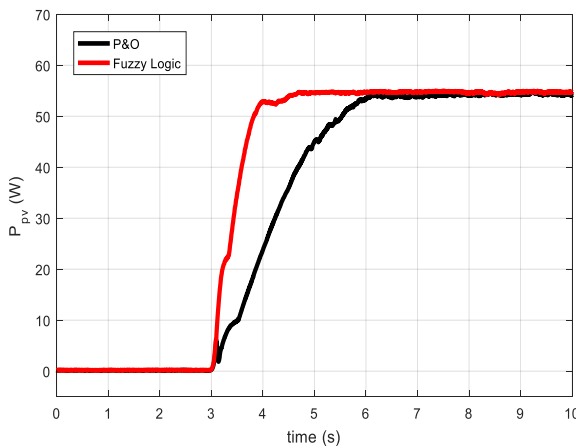
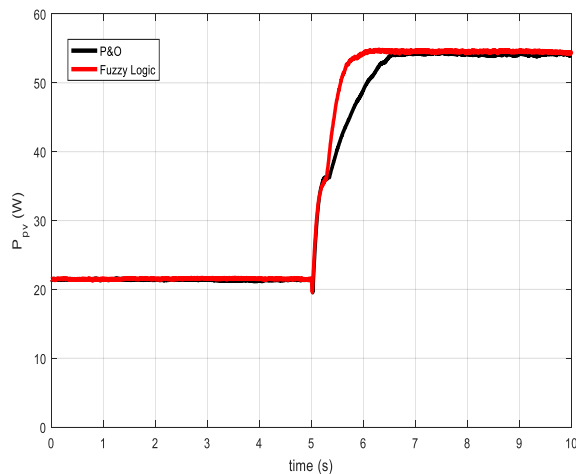
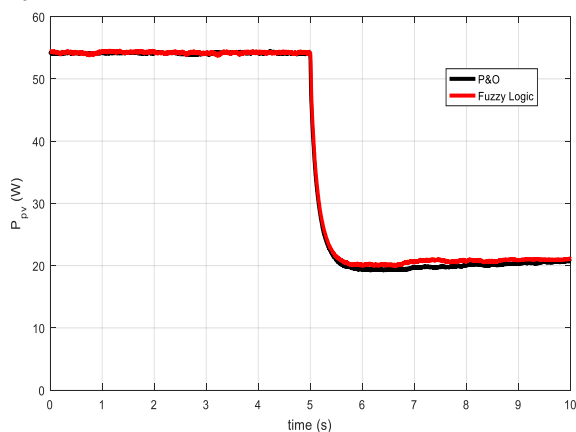
## 6. ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากการทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีพีชชีลอจิกที่มีการเปรียบเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกตโดยจะมีการแสดงการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีพีชชีลอจิกในช่วงเริ่มต้นของระบบพร้อมกับแสดงภาพจากกล้องวิดีโอเพื่อยืนยันว่ามีการทดสอบจริงที่มีการจ่ายความเข้มแสงที่  $0-600 \text{ W/m}^2$   $0-800 \text{ W/m}^2$  และ  $0-1000 \text{ W/m}^2$  ตามลำดับ โดยจะอาศัยหม้อแปลงแบบปรับค่าได้ที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามย่านความเข้มแสงที่กำหนดที่ได้มีการวัดค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ตกกระทบกับแผงโซลาร์เซลล์ผลการทดสอบทั้งหมด 3 ความเข้มแสงดังรูปที่ 20 รูปที่ 21 และรูปที่ 22 ตามลำดับ

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564

รูปที่ 20 ความเข้มแสง 600  $W/m^2$ รูปที่ 22 ความเข้มแสง 1000  $W/m^2$ รูปที่ 21 ความเข้มแสง 800  $W/m^2$ 

จากการทดสอบทั้งหมด 3 ความเข้มแสงเพื่อที่จะยืนยันว่าชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จริงโดยอาศัยกราฟคุณลักษณะเฉพาะแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 18 และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มแสง 0-600  $W/m^2$  ในรูปที่ 20 จะได้  $I_{pv} = 1.99 A$  และ  $P_{pv} = 34.62 W$  และพิจารณาที่ความเข้มแสง 0-800  $W/m^2$  ในรูปที่ 21  $I_{pv} = 2.57 A$  และ  $P_{pv} = 44.46W$  และพิจารณาที่ความเข้มแสง 0-1000  $W/m^2$  รูปที่ 22  $I_{pv} = 3.17 A$  และ  $P_{pv} = 54.61 W$  พบว่าระบบการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างแม่นยำ ในรูปที่ 23 รูปที่ 24 และรูปที่ 25 จะมีการนำเสนอผลการทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทั้งในช่วงเพิ่มความเข้มแสงและลดความเข้มแสงเพื่อที่จะยืนยันว่าวิธีฟัซซีลอจิกที่สร้างขึ้นสามารถเข้าสู่จุดสภาวะคงตัวได้รวดเร็วกว่าวิธีบวกลบและสังเกต

รูปที่ 23 ช่วงเริ่มต้นของระบบ 0-1000 W/m<sup>2</sup>รูปที่ 24 ช่วงเพิ่มความเข้มแสง 400 W/m<sup>2</sup>- 1000 W/m<sup>2</sup>รูปที่ 25 ช่วงลดความเข้มแสง 1000 W/m<sup>2</sup>-400 W/m<sup>2</sup>

จากรูปที่ 23 พิจารณาช่วงความเข้มแสงจาก 0-1000 W/m<sup>2</sup> พบว่าวิธีฟัซซีลอจิก (เส้นสีแดง) มีการเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดีและเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกต (เส้นสีดำ) เนื่องจาก

วิธีรบกวนและสังเกตในสภาวะเริ่มต้นการทำงานของระบบมีการตอบสนองที่ช้าและเมื่อพิจารณาช่วงความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 24 โดยการเพิ่มความเข้มแสงจาก 400 W/m<sup>2</sup>- 1000 W/m<sup>2</sup> พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกตและเมื่อพิจารณาลดความเข้มแสงดังรูปที่ 25 จากความเข้มแสง 1000 W/m<sup>2</sup>-400 W/m<sup>2</sup> พบว่าวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ทันทีเมื่อมีการลดความเข้มแสงแต่วิธีรบกวนและสังเกตยังใช้เวลาในการค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ช้ากว่าวิธีรบกวนและสังเกต

## 7. สรุป

การตามรอยจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซีลอจิกที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบักค์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์บนโปรแกรม MATLAB และได้มีการสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าวิธีฟัซซีลอจิกมีการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกตในสภาวะเริ่มต้นการทำงานของระบบและช่วงสภาวะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงทั้งในช่วงเพิ่มความเข้มแสงและช่วงลดความเข้มแสง ซึ่งวิธีรบกวนและสังเกตมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงได้เพียงค่าเดียวจึงไม่เหมาะสมกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมอยู่ตลอดเวลาแต่ในทางกลับกันวิธีฟัซซีลอจิกสามารถค้นหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วในสภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาโดยการอาศัยการตัดสินใจของตัวควบคุมฟัซซีและให้อาตรูปเป็นแรงดันอ้างอิงที่มีเกณฑ์กำหนดหลายค่าเพื่อให้เหมาะสมกับทุกสภาวะแวดล้อมโดยในแต่ละค่านั้นมีการออกแบบให้มีการเพิ่มแรงดันมากหรือเพิ่มแรงดันอ้างอิงน้อยในกรณีที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมระบบจะจ่ายแรงดันอ้างอิงมากและลดค่าแรงดันอ้างอิงลงเมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว การตามรอยจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีฟัซซีลอจิกจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] T.J. Deceglie, M.G. Deceglie, I. Subedi, N.J. Podraza and I.M. Slauch, "Reducing operating temperature in photovoltaic modules," *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 8, pp. 532-540, Oct. 2018.
- [2] P. Gaur, Y.P. Verma and P. Singh, "Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic applications A comparative study," in *2<sup>nd</sup> International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences*, Chandigarh, India, 2015, pp. 1-5.
- [3] P. Wongyai, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic," in *The 37<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference*, Khon Kaen, Thailand, 2014, pp. 545-548.
- [4] A. Mohapatra, B. Nayak and C. Saiprakash, "Adaptive perturb & observe MPPT for PV system with experimental validation," in *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and systems*, Bhubaneswar, India, 2019, pp. 257- 261.
- [5] M. Gunasekaran, V. Krishnamy, S. Selvam, D.J. Almakhlles and N. Anglani, "An adaptive resistance perturbation based MPPT algorithm for photovoltaic application," *IEEE Access*, Vol 8, pp. 196890-196901, Oct. 2020.
- [6] P. Premkumar and U. Subramaniam, "Improved perturb and observation maximum power point tracking technique for solar photovoltaic power generation systems," *IEEE Syst. J.*, pp.1-13, Jul. 2020.
- [7] C. Thueanpangthaim, P. Wongyai, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "The maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system using current based approach," in *5<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress*, Pattaya, Thailand, 2017, pp. 1-4.
- [8] A. Al Nabulsi and R. Dhaouadi, "Efficiency optimization of a DSP-based standalone PV system using fuzzy logic and dual-MPPT control," *IEEE Tran. Ind. Informat.*, Vol.8, pp. 573-584, Aug. 2012.
- [9] C. Panpean, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "The control of para rubber rolling machine via fuzzy logic controller," in *The 39<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference*, Phetchaburi, Thailand, 2016, pp. 501-504.
- [10] H. Ying and F. Lin, "Online self-learning fuzzy discrete event systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol. 28, pp. 2185-2194, Sep. 2020.
- [11] L. Farah, A. Hussain, A. Kerrouche, C. Ieracitano, J. Ahmad and M. Mahmud, "A high-efficient fuzzy-based controller with high reduction input and membership functions for a grid-connected photovoltaic system," *IEEE Access*, Vol. 8 pp. 163225-163237, Aug. 2020.
- [12] M. Aly and H. Rezk, "A differential evolution - based optimized fuzzy logic MPPT method for enhancing the maximum power extraction of proton exchange membrane fuel cell," *IEEE Access*, Vol.8 pp. 172219-172232, Sep. 2020.

## การระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความร้อน เทอร์โมอิเล็กทริก

### Electrical Vehicle Battery Cooling by Thermoelectric Cooling Module

บุญยวีร์ สุขสุสร\* สกกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาล นามผล

ห้องปฏิบัติการเทอร์โม-ของไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TFHT), ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 63 ถนนรังสิต-นครนายก

อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก, 26120

Punyawee Suksusron\* Songkran Wiriyaart Paisarn Naphon

Thermo-Fluid and Heat Transfer Enhancement Lab. (TFHT), Department of Mechanical

Engineering, Srinakharinwirot University, 63 Rangsit-Nakhornnayok Rd., Ongkharak

Nakhorn-Nayok 26120, Thailand

\*Corresponding author Email: punyawee.suksusron@g.swu.ac.th, songkranw@g.swu.ac.th

(Received: December 2, 2020; Accepted: March 9, 2021)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกกับการใช้ของไหลเฟอร์โรเป็นของไหลหล่อเย็น ในการออกแบบการทดลองจะศึกษาตัวแปรตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ ใช้น้ำและของไหลเฟอร์โรเป็นของไหลหล่อเย็น อัตราการไหลของของไหลหล่อเย็น ความเข้มข้นของอนุภาคเฟอร์ไรต์ในน้ำที่อัตราส่วน 0.005% และ 0.015% โดยปริมาตร เพื่อออกแบบและทำนายคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลและเพื่อหาหลักการไหลที่เหมาะสมสำหรับนำมาผลิตของไหลหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อน ส่วนการทางด้านร้อนจะเป็นชุดแบตเตอรี่ที่ใช้เซลล์แบตเตอรี่ทรงกลมชนิด 18650 ขนาดแรงดัน 3.7 – 4.2 โวลต์ และ ความจุขนาด 3.4 แอมป์ต่อชั่วโมง จะต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมและขนาน โดยต่อแบบอนุกรม 6 ก้อนและต่อแบบขนาน 10 แพค เพื่อให้ได้แรงดันระหว่าง 22.2 – 25.2 โวลต์ ที่ความจุ 34,000 แอมป์ต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ของไหลเฟอร์ไรต์ที่ความเข้มข้น 0.015% เป็นของไหลหล่อเย็นประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากกว่าของไหลเฟอร์ไรต์ที่ความเข้มข้น 0.005% และ น้ำ ประมาณ 20% และ 30% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวนี้จะสามารถผลิตน้ำเย็นก่อนไหลเข้าสู่ชุดแบตเตอรี่ จากผลการทดลองนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาระบบระบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าได้ในอนาคต

**คำสำคัญ:** เทอร์โมอิเล็กทริก ของไหลเฟอร์โร การระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

#### ABSTRACT

In this paper, a study on electrical vehicle battery cooling by the thermoelectric module using ferrofluid ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) as a coolant is presented. The parametric study that affects the heat transfer and flow characteristic at the hot side mainly focuses the heat sink with water and ferrofluid concentration 0.005% and 0.015% as the coolants, the mass flow rate of coolant that providing the optimum heat

transfer characteristic for EV battery cooling is investigated. The battery pack was embedded at the cold side of the thermoelectric cooler module is a cylindrical 18650 cell type has connected a series of 6S and a parallel of 10P(6S10P). The total output voltage/current of the battery pack will be 22.2 – 25.2 V /34Ah is obtained. The result has shown that Ferrofluids as a coolant is better than that water in thermal performance. Moreover, Ferrofluid concentration of 0.015% has a higher thermal performance than that of 0.005% and water of 20% and 30% are obtained. The obtained results will be a guidance for improvement in the EV battery cooling in the future.

**Keyword:** Thermoelectric cooling, Ferrofluid, Electrical Vehicle Battery, Heat sink.

## 1. บทนำ

การระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีข้อดีที่เหนือกว่าอุปกรณ์ระบายความร้อนทั่วไป รวมถึงขนาดที่กะทัดรัด น้ำหนักเบา ความน่าเชื่อถือสูง สามารถทำความเย็นและความร้อนได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียเปรียบหลักของการระบายความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก คือมีต้นทุนต่อหน่วยสูงและให้ประสิทธิภาพของพลังงานต่ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดกับการนำไปประยุกต์ใช้ [1] เทอร์โมอิเล็กทริกส์คูเลอร์ (TEC) คือ การแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นอุณหภูมิ ปรากฏการณ์ Peltier–Seebeck ร่วมกับปรากฏการณ์ของ Thompson เป็นผลมาจากเทอร์โมอิเล็กทริกส์ กล่าวคือเทอร์โมอิเล็กทริกส์ เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของความร้อนเป็นไฟฟ้า (Seebeck effect) และไฟฟ้าเป็นความร้อน (Peltier effect) ความสามารถในการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพและศักยภาพนั้นทำให้ระบบการระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ได้รับความสนใจจากคนทั่วโลกมากขึ้นเพื่อนำด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกส์ไปใช้ในการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [2][3][4][5][6] โดยให้นำเทอร์โมอิเล็กทริกส์ไปใช้ในการระบายความร้อนส่วนใหญ่จะคำนึงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายความร้อนที่ด้านร้อน โดยระบบการถ่ายเทความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ จะใช้ร่วมกับของไหลที่จะเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีการพัฒนาของไหลชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน [7][8] ของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน

ร้อนที่ได้รับความสนใจในปัจจุบันได้แก่ อากาศ, น้ำ, ของไหลนาโน เป็นต้น ของไหลนาโน คือ อนุภาคนาโนที่มีการกระจายตัวในของเหลว (nanofluids) เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเพิ่มความสามารถในการนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าน้ำและอากาศ [9] ในปัจจุบันของเหลวเป็นที่นิยมอย่างมากในการใช้เป็นสารหล่อเย็นในระบบอุตสาหกรรม การศึกษาทางวิชาการและทางอุตสาหกรรมจำนวนมากศึกษาการกำจัดความร้อนโดยใช้ของเหลวและการปรับปรุงประสิทธิภาพในการจัดการความร้อน การลดความต้านทานความร้อนแบบหมุนเวียนโดยการเพิ่มพื้นผิวแลกเปลี่ยนหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลและคุณสมบัติทางกายภาพทางความร้อนของสารหล่อเย็นเหลว [10][11] ดังนั้นการศึกษาจำนวนมากจึงเน้นไปที่การจัดการคุณสมบัติของของเหลวหล่อเย็นใหม่ ๆ เช่น ของไหลเฟอร์โร (Ferrofluids) ซึ่งมีการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับของเหลวแบบดั้งเดิม ของไหลเฟอร์โรนั้นได้นักวิทยาศาสตร์เป็นจำนวนมาก [12] ของไหลเฟอร์โรเป็นสารละลายที่อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนเมตรแขวนลอยอยู่ในของเหลวพื้นฐาน ได้นั้นถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบหมุนเวียนเมื่อใช้สนามแม่เหล็ก

ดังนั้นการใช้ของไหลเฟอโรในระบบระบายความร้อนจึงน่าสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีสนามแม่เหล็กอยู่ในระบบระบายความร้อนด้วย [13] นอกจากนี้ การใช้ของไหลร่วมกับครีบบระบายความร้อนแบบต่าง ๆ โดยออกแบบลักษณะของช่องการไหลภายในชุดครีบบระบายความร้อนที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนครีบบวกกว่า ทำให้มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าผลของความเร็วมีค่าลดลงขณะที่ความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้น

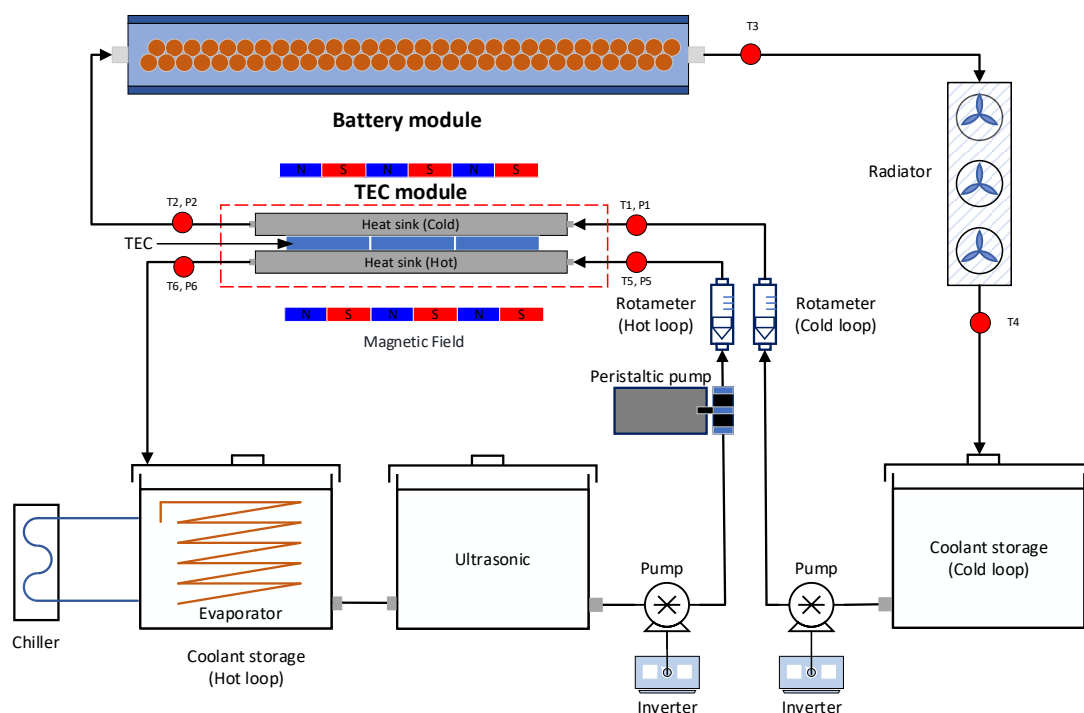
จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้ระบบการถ่ายเทความร้อนโดยเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อใช้ระบายความร้อนนั้นมีจำนวนมาก แต่การนำเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับของไหลเฟอโรยังคงมีน้อย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด งานวิจัยนี้จึงเน้นไปที่การใช้ของไหลเฟอโร โดยมีความเข้มข้นของอนุภาคเฟอโรที่ 0.005% และ 0.015% โดยปริมาตร

## 2. ขั้นตอนการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมและอุปกรณ์การทดลอง โมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักได้แก่ ชุดทดสอบ (ชุดครีบบระบายความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก/แบตเตอรี่) ระบบน้ำระบายความร้อน ระบบน้ำเย็น ชุดเก็บข้อมูลการทดลอง และระบบควบคุมทางไฟฟ้า ในการทดลองจะเริ่มจากการปรับอุณหภูมิระบบน้ำระบายความร้อน ระบบน้ำเย็นการให้ได้อุณหภูมิตามต้องการอยู่ที่  $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  จากนั้นจึงเปิดการทำงานของปั๊มที่ใช้ในการทดลองและปรับอัตราการไหลของของไหลทั้งด้านร้อนและด้านเย็นอยู่ที่ 30, 40, 50 L/hr สำหรับด้านร้อนของไหลจะไหลออกจากถัง Ultrasonic โดยถัง Ultrasonic จะสั้นเพื่อไม่ให้ของไหลเฟอโรไม่เกิดการตกตะกอน จากนั้นของไหลผ่านปั๊มเข้าไปยัง Peristaltic pump โดย Peristaltic pump มีหน้าที่ทำการเปลี่ยนลักษณะการไหลแบบราบเรียบให้กลายเป็น

การไหลแบบเป็นจังหวะ แล้วของไหลจะไหลเข้าไปสู่อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Rotameter) เพื่อควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ที่ 30, 40, 50 L/hr ตามลำดับจากนั้นจะผ่านตัววัดอุณหภูมิที่ T5 และตัววัดแรงดันตกคร่อม P5 เพื่อวัดอุณหภูมิของของไหลและแรงดันตกคร่อมของของไหลก่อนเข้าฮีทซิงค์

จากนั้นของไหลที่ใช้จะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในฮีทซิงค์ และไหลออกมาที่ตัววัดอุณหภูมิที่ T6 และตัววัดแรงดันตกคร่อม P6 เพื่อวัดอุณหภูมิของของไหลและแรงดันตกคร่อมของของไหลที่ไหลออกจากฮีทซิงค์ และระบายความร้อนออกจากของไหลที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อนเรียบร้อยแล้วที่ชุดระบายความร้อนที่ติดตั้งพัดลมระบายความร้อน (Evaporator) โดยจะมีการติดตั้งระบบ Chiller เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่  $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำมากขึ้น ส่วนด้านเย็นเมื่อทำการเปิดระบบปั๊มที่ใช้ในการทดลองแล้วน้ำจะไหลออกจากถังกักเก็บหรือ Coolant Storage ผ่านปั๊มเข้าไปสู่ตัววัดอัตราการไหลหรือ Rotameter เพื่อควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ที่ 30, 40, 50 L/hr จากนั้นของไหลจะไหลผ่านตัววัดอุณหภูมิที่ T1 และตัววัดแรงดันตกคร่อม P1 เพื่อวัดอุณหภูมิของของไหลและแรงดันตกคร่อมของของไหลก่อนเข้าฮีทซิงค์ หลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนภายในฮีทซิงค์ของไหลจะไหลออกมาที่ตัววัดอุณหภูมิที่ T2 และตัววัดแรงดันตกคร่อม P2 เพื่อวัดอุณหภูมิของของไหลและแรงดันตกคร่อมของของไหลที่ไหลออกจากฮีทซิงค์และแรงดันตกคร่อม ของไหลได้จากด้านเย็นนั้นจะนำไปใช้ในการระบายความร้อนให้กับชุดแบตเตอรี่ น้ำที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากการระบายความร้อนให้กับชุดแบตเตอรี่จะไหลผ่านตัววัดอุณหภูมิ T3 และไหลเข้าสู่ชุดระบายความร้อนที่ติดตั้งพัดลมระบายความร้อน (Evaporator) จากนั้นของไหลจะไหลผ่านตัววัดอุณหภูมิ T4 ก่อนจะไหลกลับไปเข้าสู่ถังพักหรือ Coolant Storage เพื่อเริ่มต้นการทำงานอีกครั้ง



รูปที่ 1 ไดอะแกรมและอุปกรณ์การทดลองโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเช่น อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า, อุปกรณ์วัดอัตราการไหล, อุปกรณ์วัดความดัน และอุปกรณ์บันทึกข้อมูล เป็นต้น นั้นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 และคุณสมบัติของของไหลเฟอร์ไรต์ที่ใช้ในการทดลองหรือที่ใช้ในการระบายความร้อนนั้นมีคุณสมบัติตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ

| เครื่องมือ            | ความแม่นยำ | ความคลาดเคลื่อน |
|-----------------------|------------|-----------------|
| อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า      | 0.2        | $\pm 0.5$       |
| อุปกรณ์วัดอัตราการไหล | 0.1        | $\pm 0.2$       |
| อุปกรณ์วัดความดัน     | 0.02       | $\pm 0.2$       |
| อุปกรณ์บันทึกข้อมูล   | 0.1        | $\pm 0.1$       |

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของอนุภาคเฟอร์ไรต์ ( $Fe_3O_4$ )

| อนุภาคนาโนเฟอร์ไรต์ $Fe_3O_4$ |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| ขนาดของอนุภาค                 | 23 nm                    |
| ชนิดของอนุภาค                 | กลม                      |
| ความหนาแน่น                   | 5180 kg / m <sup>3</sup> |
| พื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก          | 39 m <sup>2</sup>        |
| ค่าการนำความร้อน              | 9.7 W / m.K              |
| สี                            | ดำ                       |
| มวลโมเลกุล                    | 231.53 g / mol           |
| จุดเดือด                      | 2623 °C                  |
| จุดหลอมเหลว                   | 1538 - 1597 °C           |
| ความร้อนจำเพาะ                | 670 J / kg               |

### 3. การคำนวณ

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนในชุดครีบระบายความร้อนจะสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อนำผลการคำนวณที่ได้มาวาดเป็นกราฟเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลอง โดยจะมีสมการหลักที่ใช้อยู่ทั้งหมด 6 สมการดังที่ได้แสดงในสมการที่ 1-6

$$\dot{m} = \rho Q_w \quad (1)$$

โดยที่  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล ( $kg/s$ )

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ ( $kg/m^3$ )

$Q_w$  คือ อัตราการไหลของน้ำ ( $m^3/s$ )

$$Q_{total} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (2)$$

โดยที่  $Q_{total}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม ( $W$ )

$\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล ( $kg/s$ )

$C_p$  คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ ( $J/kg \cdot K$ )

$\Delta T$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )

$$Re = \frac{\rho Q_w D_e}{\mu A} \quad (3)$$

โดยที่  $Re$  คือ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ ( $kg/m^3$ )

$Q_w$  คือ อัตราการไหลของน้ำ ( $m^3/s$ )

$D_e$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $m$ )

$\mu$  คือ ความหนืดพลวัต ( $N \cdot s/m^2$ )

$A$  คือ พื้นที่ผิวของทางเข้า ( $m^2$ )

$$h = \frac{Q_{total}}{A_{total} (T_b - T_i)} \quad (4)$$

โดยที่  $h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

( $W/m \cdot K$ )

$Q_{total}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม ( $W$ )

$A_{total}$  คือ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ( $m^2$ )

$T_b$  คือ อุณหภูมิที่ฐานครีบ ( $^{\circ}C$ )

$T_i$  คือ อุณหภูมิที่ทางเข้า ( $^{\circ}C$ )

$$Nu = \frac{h D_e}{k_w} \quad (5)$$

โดยที่  $Nu$  คือ นัสเซลล์นัมเบอร์

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

( $W/m \cdot K$ )

$D_e$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $m$ )

$k_w$  คือ ค่าการนำความร้อนของน้ำ ( $W/m \cdot K$ )

$$COP = \frac{Q}{P} \quad (6)$$

โดยที่  $COP$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

$Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน ( $W$ )

$P$  คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ( $W$ )

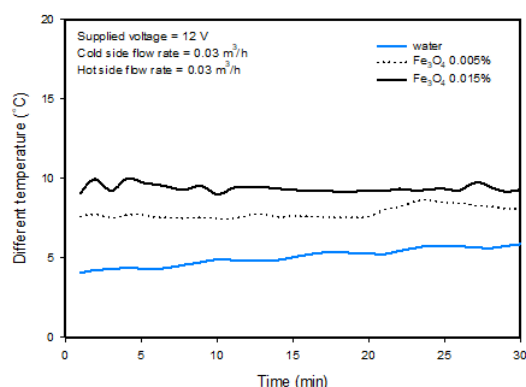
### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ในการสรุปผลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นจะนำเสนอคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนกรณีของไหลต่างกัน (น้ำ ของไหลเพอร์โร) โดยที่ความเข้มข้นของของไหลเพอร์โรมีความเข้มข้นต่างกัน 0.005% และ 0.015% โดยปริมาตร ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน

โดยรูปที่ 2 จะแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก ( $T_6 - T_5$ ) ที่ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกที่แปรผันตามเวลา แรงดันไฟฟ้าที่ให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 12 โวลต์ และอัตราการไหลด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ  $0.03 m^3/h$  และอัตราการไหลด้านร้อนเท่ากับ  $0.03 m^3/h$  โดยของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำของไหลเพอร์โรที่มีความเข้มข้น 0.005% และ 0.015% โดยปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำของไหลเพอร์โรความเข้มข้น 0.005% และ 0.015%

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - เมษายน พ.ศ. 2564

พบว่า ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่าผลต่างของอุณหภูมิทางเข้ากับทางออก ( $T_6 - T_5$ ) ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกสูงที่สุดตลอดการทดลองหรืออยู่ที่ประมาณ  $10^\circ\text{C}$  ที่ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้นเท่ากับ 0.005% ค่าผลต่างของอุณหภูมิทางเข้ากับทางออก ( $T_6 - T_5$ ) เท่ากับ  $8^\circ\text{C}$  และน้ำมีค่าผลต่างของอุณหภูมิทางเข้ากับทางออก ( $T_6 - T_5$ ) เท่ากับ  $3^\circ\text{C}$

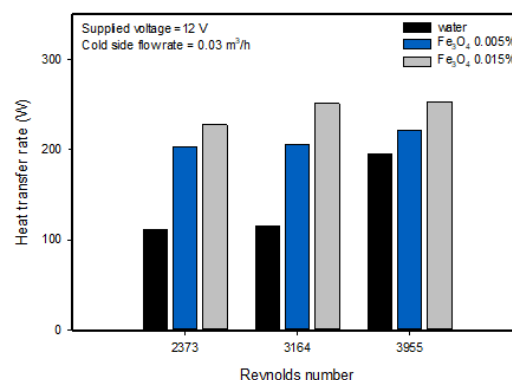


รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออก ( $T_6 - T_5$ ) กับเวลา โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าของไหลหล่อเย็นชนิดอื่นโดยพิจารณาจากผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของชุดครีบบายบายระบายความร้อนจากผลการทดลองดังกล่าวนี้จะถูกนำไปศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพิจารณาตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนดังที่จะได้นำเสนอในลำดับต่อไป

ในรูปที่ 3 จะแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 0.03 โดยของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอร์โรที่ ความเข้มข้น 0.005% และ 0.015% เมื่อเปรียบเทียบของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และ 0.015% พบว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน

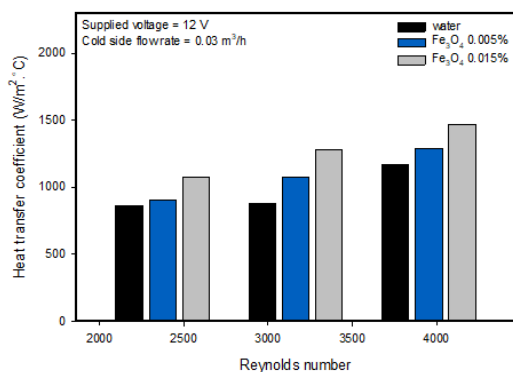
ร้อนสูงสุดตลอดการทดลอง และของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% และน้ำ มีค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงมาตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2730 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 25.09 และ 116.47 หรือคิดเป็น 11% และ 51.09% ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3164 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 45.94 และ 135.82 หรือคิดเป็น 18.25% และ 53.98% ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 3955 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 31.93 และ 57.14 หรือคิดเป็น 12.61% และ 22.57% ตามลำดับ



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน

ในรูปที่ 4 จะแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก 0.03 โดยของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้น 0.005% และ 0.015% เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลหล่อเย็นพบว่า ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่า

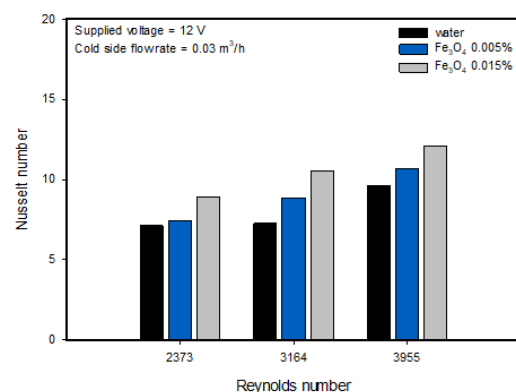
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยเฉลี่ยสูงสุด โดยที่ของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.005% และน้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 2730 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 177 เพิ่มขึ้น 16.24% และ 218.512 เพิ่มขึ้น 20% ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 3164 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 207.536 เพิ่มขึ้น 16% และ 402.653 เพิ่มขึ้น 31% และที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 3955 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 179.229 เพิ่มขึ้น 12% และ 305.672 เพิ่มขึ้น 20.54% ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแปรผันตามเรย์โนลด์สเบอร์และความเข้มข้นของของไหลเฟอโรโร



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์สเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน

ในรูปที่ 5 จะแสดงความสัมพันธ์ของตัวเลขนัสเซลกับค่าเรย์โนลด์สเบอร์ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก 0.03 โดย

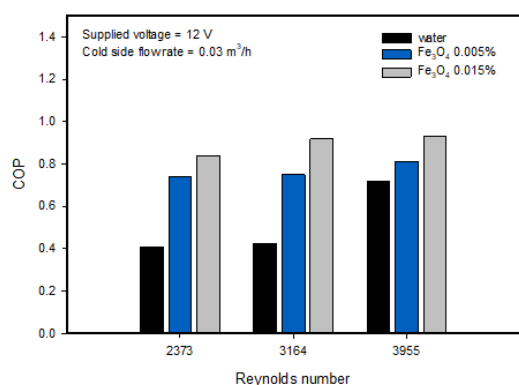
ของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และ 0.015% เมื่อเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซลของของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และ 0.015% พบว่าของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.015% มีตัวเลขนัสเซลโดยเฉลี่ยสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดังที่ได้สรุปไว้ก่อนหน้านี้ และของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และน้ำ มีตัวเลขนัสเซลลดลงมาตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 2730 ตัวเลขนัสเซลของของไหลเฟอโรโรความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 1.45 และ 1.78 ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 3164 ตัวเลขนัสเซลของของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 1.69 และ 3.28 ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 3955 ตัวเลขนัสเซลของของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 1.46 และ 2.49 ตามลำดับ



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของนัสเซลกับค่าเรย์โนลด์สเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน

ในรูปที่ 6 จะแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์สเบอร์ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และอัตราการไหลด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก 0.03  $m^3/h$  โดยของไหลหล่อเย็นได้แก่ น้ำ ของไหลเฟอโรโรที่ความเข้มข้น 0.005% และ 0.015% เมื่อ

เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมรรถนะของไหลหล่อเย็นได้แก่น้ำ ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และ 0.015% พบว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะโดยเฉลี่ยสูงสุด ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และน้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะลดลงตามลำดับ โดยที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 2730 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 0.1 และ 0.43 ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 3164 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 0.17 และ 0.49 ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ 3955 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีค่ามากกว่าของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และน้ำอยู่ที่ 0.12 และ 0.212 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะมีค่าแปรผันตามเรย์โนลด์สเบอร์และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้น 0.015% อย่างไรก็ตามการหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของชุดแบตเตอรี่จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อประเมินคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในชุดแบตเตอรี่เมื่อของไหลหล่อเย็นมีอุณหภูมิที่ทางเข้าแตกต่างกันเนื่องจากของไหลหล่อเย็นแตกต่างกัน



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะกับค่าเรย์โนลด์สเบอร์ โดยใช้ของไหลหล่อเย็นต่างกัน

## 5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์การระบายความร้อนแบบเตอริสตันต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ของไหลเฟอร์โร โดยทำการทดลองและเก็บค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ศึกษาได้แก่ ของไหลหล่อเย็นที่ใช้น้ำและของไหลเฟอร์โรอัตราส่วน 0.005% และ 0.015% โดยปริมาตรเพื่อออกแบบและทำนายคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลและเพื่อหาหลักการไหลที่เหมาะสมสำหรับนำมาผลิตของไหลหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนจากการทดลองพบว่าของไหลเฟอร์โรที่ความเข้มข้น 0.015% เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างน้ำ ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.005% และของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% พบว่าที่ของไหลเฟอร์โรความเข้มข้น 0.015% มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากกว่าของไหลชนิดอื่นประมาณ 20-30%

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่มอบทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการเทอร์โม-ของไหลและการถ่ายเทความร้อน (TFHT) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ รวมทั้งเครื่องมือเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Zhao, and G. Tan, "A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 66(1), pp. 15-24, 2014.
- [2] Y. Lyu, ARM. Siddique, SH. Majid, M. Biglarbegian, SA. Gadsden and S. Mahmud, "Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric

- cooling,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 822-827, 2019.
- [3] Y. Cai, D. Liu, F.-Y. Zhao and J.-F. Tang, “Performance analysis and assessment of thermoelectric micro cooler for electronic devices,” *Energy Conversion and Management*, vol. 124, pp. 203-211, 2016.
- [4] HM. Hu, TS. Ge, YJ. Dai, and RZ. Wang, “Experimental study on water-cooled thermoelectric cooler for CPU under severe environment,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 62, pp. 30-38, 2016.
- [5] S. Wiriyasart, C. Hommalee, and P. Naphon, “Thermal cooling enhancement of dual processors computer with thermoelectric air cooler module,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol 14, pp. 100445, 2009.
- [6] S. Wiriyasart, C. Hommalee, R. Prurapark, A. Srichat, and P. Naphon, “Thermal efficiency enhancement of thermoelectric module system for cold-hot water dispenser Phase II,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 15, pp. 100520, 2019.
- [7] M. Gökçek, and F. Şahin, “Experimental performance investigation of minichannel water cooled-thermoelectric refrigerator,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 10, pp. 54-62, 2017.
- [8] N. Ahammed, L. Asirvatham, and S. Wongwises, “Thermoelectric cooling of electronic devices with nanofluid in a multiport minichannel heat exchanger,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 74, pp. 81-90, 2016.
- [9] S. Mohammadian, and Y. Zhang, “Analysis of nanofluid effects on thermoelectric cooling by micro-pin-fin heat exchangers,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 70(1), pp. 282-290, 2014.
- [10] GD. Xia, R. Liu, J. Wang, and M. Du “The characteristics of convective heat transfer in microchannel heatsinks using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> nanofluids,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76, pp. 256-264, 2016.
- [11] W. Cherief, Y. Avenas, S. Ferrouillat, A. Kedous-Lebouc, L. ossic and M. Petit, “Parameters affecting forced convection enhancement in ferrofluid cooling systems,” *Applied Thermal Engineering*, vol.123, pp. 156-166, 2017.
- [12] M.H. Dibaei Bonab, M. B. Shafii, and M.H. Nobakhti, “Experimental and numerical investigation of fully developed forced convection of water-based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid passing through a tube in the presence of an alternating magnetic field,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7(2), pp. 1687814015571023, 2015.
- [13] C. Hommalee, S. Wiriyasart, and P. Naphon, “Study on Heat and Flow Behaviors in Heat Sinks for Thermoelectric Cooling Module by CFD,” *SWU Engineering Journal*, vol. 14 , pp. 48-60, 2019.

## การอบแห้งใบมะกรูดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล Kaffir Lime Leaves Drying Using Far Infrared-Vacuum Technique

ศรีมา แจ้คำ<sup>1\*</sup> กิตติศักดิ์ วิธินันทิต<sup>1</sup> เอกภูมิ บุญธรรม<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 156 ม.5 ต.พลาญชุมพล อ.เมือง จ.ปทุมธานี 65000

Srima Jaekhom<sup>1\*</sup> Kittisak Witinantak<sup>1</sup> Eakpoom Boonthum<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Choburi 20110

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology,

Pibulsongkram Rajabhat University

156 Moo 5 Plai Chumpon Subdistrict, Muang District, Phitsanulok 65000

\*Corresponding author Email: srima\_j@hotmail.com

(Received: November 22, 2020; Accepted: March, 15, 2021)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งใบมะกรูดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพด้านสี สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และหาสมการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยทดลองอบแห้งใบมะกรูดจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 170 มาตรฐานแห้ง ภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 5 มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง และการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำทำให้ความแตกต่างด้านสีน้อยลง ดังนั้นที่ความดันสัมบูรณ์ 5 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูด นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง  $1.4221 \times 10^{-12}$  ถึง  $6.1840 \times 10^{-12}$  ตารางเมตรต่อวินาที โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันสัมบูรณ์และเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง และสมการอบแห้งเอมพิริคัลของเดเมอร์และคณะสามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูดได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (0.99973) สูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (0.00425) และค่าการลดลงไคกำลังสอง ( $0.03964 \times 10^{-3}$ ) ต่ำที่สุด

**คำสำคัญ:** ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ใบมะกรูด สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น สุญญากาศ อินฟราเรดไกล

## ABSTRACT

Objectives of this research were to study drying kinetic, specific energy consumption, color quality, effective moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling for predicting drying kinetic of kaffir lime leaves by combined vacuum and far-infrared. Conditions of this research were conducted by initial moisture content of kaffir lime leaves was 170%d.b., drying at absolute pressure of 5 kPa and 15 kPa and temperature of 45°C and 55°C, final moisture content of kaffir lime leaves was 5%d.b. Results shown that drying time and specific energy consumption were decreased whereas drying rate was increased by decreasing of absolute pressure and increasing of drying temperature. Anyway, color difference was decreased by drying at low temperature. Therefore, drying condition at absolute pressure of 5 kPa and temperature of 45°C was the optimum condition for drying of kaffir lime leaves. Moreover, effective moisture diffusivity coefficient was  $1.4221 \times 10^{-12}$  to  $6.1840 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s. Effective moisture diffusivity coefficient was increased by decreasing of absolute pressure and increasing of drying temperature. Demir et al.'s empirical modelling was the best modelling for predicting of drying kinetic of kaffir lime leaves at decision coefficient was the highest at 0.99973, the lowest root mean square error was 0.00425 and the lowest chi-squared reduction was  $0.03964 \times 10^{-3}$ .

**Keyword:** Specific energy consumption, kaffir lime leaves, effective moisture diffusivity coefficient, vacuum, far-infrared.

## 1. บทนำ

กระบวนการทำแห้งเป็นการแปรรูปและถนอมอาหารที่สำคัญมากในปัจจุบัน นอกจากจะเป็นการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์แล้ว ที่สำคัญก็เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลให้อาหารเสื่อมคุณภาพ แต่การทำแห้งอาหารในปัจจุบันมีบทบาทที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ที่ผ่านการแปรรูปต้องมีคุณภาพทางโภชนาการสูง ปลอดภัย และมีอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น กระบวนการทำแห้งจึงเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่นิยมใช้ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อาหารสด หรือแปรรูปอาหารเหลวให้เป็นอาหารผง เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา สะดวกในการจัดเก็บ ขนส่ง เพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร รวมถึงต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ปลอดภัยและมีลักษณะเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

สมุนไพรไทย เช่น ใบมะกรูด ถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อนและจำเป็นต้องรักษาคุณค่าทางโภชนาการไว้ให้ได้ที่สุดภายหลังกระบวนการทำแห้ง [1] ในประเทศไทยสมุนไพรมีศักยภาพทางเศรษฐกิจสูง ข้อมูลจากศูนย์ศึกษาการค้าระหว่างประเทศมหาวิทยาลัยหอการค้าไทยระบุว่าประเทศไทยส่งออกสมุนไพรและสารสกัดปีละประมาณ 1,000 ล้านบาท เมื่อปี 2559 ตลาดสมุนไพรทั้งเวชสำอาง อาหารเสริม เครื่องดื่มและสมุนไพรแห้ง สมุนไพรสด ในประเทศมีมูลค่าประมาณ 3.92 หมื่นล้านบาท และคาดว่าจะขยายตัวเป็น 5.69 หมื่นล้านบาท ในปี 2564 ซึ่งถือว่าการขยายตัวมีแนวโน้มที่ดีในเชิงเศรษฐกิจ [2]

การทำแห้งมีด้วยกันหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป การทำแห้งบางอย่างอาจจะสิ้นเปลืองพลังงานมาก และทำให้อาหารสูญเสียคุณค่าทางอาหารได้ง่าย เนื่องจากใช้ความร้อนสูงในการอบแห้ง ดังนั้นวิธีการระเหยน้ำออกจากอาหารที่อุณหภูมิต่ำ โดย

การใช้สุญญากาศร่วมในการทำแห้ง โดยสมมุติฐานแล้วจะทำให้อัตราการการทำแห้งเพิ่มขึ้นและเมื่อใช้ร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นในระดับโมเลกุลภายในวัสดุสามารถแพร่ความชื้นมาสู่ผิวของวัสดุเร็วขึ้นอันจะส่งผลให้ใช้เวลาอบแห้งสั้นลง ช่วยในการรักษากลิ่นรสชาติ ลักษณะทางกายภาพ เช่น สี รูปร่าง รวมถึงคุณค่าในโภชนาการให้คงอยู่ได้ [3]

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้มีการศึกษาอบแห้งข้าวด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับระบบสุญญากาศ [4] พบว่าเมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง การใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำมากจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสีมากขึ้นด้วย Y. Xie et al. [5] ได้ศึกษาการอบแห้งชิ้นเห็ดเหี่ยว ซึ่งเป็นส่วนประกอบของยาสมุนไพรจีนดั้งเดิมเพื่อปรับปรุงสุขภาพ โดยใช้อินฟราเรดร่วมกับระบบสุญญากาศแบบพัลส์ พบว่า อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนจางหะพัลส์ที่เหมาะสม ซึ่งก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ L. Xie et al. [6] ซึ่งศึกษาการอบแห้งโกจิเบอร์รี่ พบว่า การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศทำให้ลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ดี สำหรับ J. Wang et al. [7] พบว่า การอบแห้งขึ้นมะนาวด้วยระบบสุญญากาศที่ใช้รังสีอินฟราเรดในการให้ความร้อนเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการอบแห้งและได้ขึ้นมะนาวที่ยังคงรักษาคุณภาพที่ดีไว้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการผสมผสานโดยใช้ไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศในการอบแห้งทุเรียนแผ่น [8] พบว่า อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นและส่งผลให้การใช้พลังงานจำเพาะน้อยลงด้วย สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด [9] แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจากสมการของ Midilli สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอมได้ดีที่สุด

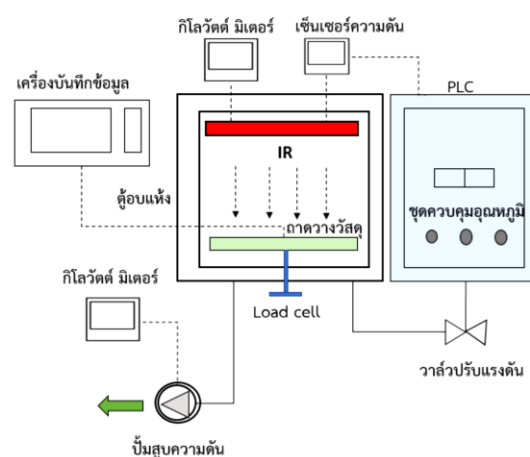
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คุณภาพด้านสี น้ำมันหอมระเหย สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และหาสมการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยผู้วิจัยจะทำการทดลองกับสมุนไพรพื้นบ้าน คือ ใบมะกรูด และหวังว่าเทคโนโลยีนี้จะเป็นทางเลือกในการอบแห้งแบบผสมผสานกับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรชนิดอื่นต่อไป

## 2. อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการทดลอง

### 2.1 เครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับสุญญากาศ

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองมีดังนี้ (1) เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ ปัมสุญญากาศ (liquid ring) ขนาดมอเตอร์ 1/3 HP ทำความดันได้ถึง 10 Pa (วัดจากความดันศูนย์สัมบูรณ์) ซึ่งมีอัตราการทำสุญญากาศได้มากกว่าขอบเขตในการศึกษา อัตราการไหลที่ 6 m<sup>3</sup>/hr ภายในมีแหล่งความร้อนคือรังสีอินฟราเรดขนาด 250 W ยี่ห้อ infrapara รุ่น EL-2-250, 220 V, 380°C, ขนาดพื้นที่ 122x122 mm<sup>2</sup> อุปกรณ์ Load cell สำหรับเก็บข้อมูลน้ำหนักภายในตู้อบแห้ง พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและความดันดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ไดอะแกรมเครื่องอบแห้งรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับระบบสุญญากาศ

## 2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองการอบแห้งนี้ใช้ตัวอย่างสมุนไพรในการทดลอง คือ ใบมะกรูด ทดลองครั้งละ 30 กรัม จำนวน 3 ซ้ำ ในแต่ละสภาวะการทดลอง โดยทำการทดลองที่สภาวะดังนี้ (1) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa อุณหภูมิ 45°C (2) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa อุณหภูมิ 55°C (3) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45°C และ (4) ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 55°C สำหรับใบมะกรูดจะเด็ดก้านออกให้เหลือแต่ใบ และนำบางส่วนไปชั่งน้ำหนักและนำไปอบแห้งในตู้อบแห้งแบบลมร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการความค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน AOAC [10] จากนั้นนำผลิตภัณฑ์เข้าในตู้อบแห้ง พร้อมเปิดเครื่องอบแห้งสุญญากาศแล้วตั้งค่าความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิ การทดลองตามสภาวะต่างๆ ที่กำหนด ทำการบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์จากโหลดเซลล์ และค่าการใช้พลังงานรวมจากกิโลวัตต์มิเตอร์ ทำการอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายตามที่กำหนด (ประมาณ 5% d.b.) นำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งไปวิเคราะห์คุณภาพในลำดับต่อไป

## 2.3 การทดสอบคุณภาพด้านสีของใบมะกรูด

การทดสอบคุณภาพด้านสีของใบมะกรูด ทดสอบสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d เป็นการทดสอบสีแบบ L a b โดยจะนำค่าความแตกต่างของสีผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้งและหลังจากอบแห้งมาเปรียบเทียบกัน เพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งที่สภาวะใดมีค่า  $\Delta E$  น้อยที่สุด ตามสมการที่ (1) ซึ่งจะถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสีใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดก่อนอบแห้งมากที่สุด โดยใช้แสง Daylight ที่ 6,500 K ในการวัดสี

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

โดยที่  $\Delta E$  คือ ความแตกต่างกันของสี  $\Delta L$  คือ ความแตกต่างของความสว่าง  $\Delta a$  คือ ความแตกต่างของความ เป็นสีแดงถึงเขียว และ  $\Delta b$  คือ ความแตกต่างของความ เป็นสีเหลืองถึงน้ำเงิน

## 2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) ที่ใช้ในการอบแห้ง นำ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ มวลวัสดุก่อนการอบแห้ง และหลังการอบแห้ง และปริมาณการใช้พลังงานตลอด กระบวนการอบแห้ง มาคำนวณหาความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งใบมะกรูด ได้จากสมการที่ (2)

$$SEC = \frac{3.6E_p}{m_i - m_f} \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

(MJ/kg<sub>water evap.</sub>)

$m_i$  คือ มวลของใบมะกรูดก่อนอบแห้ง (kg)

$m_f$  คือ มวลของใบมะกรูดหลังอบแห้ง (kg)

$E_p$  คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

## 2.5 การทดสอบปริมาณน้ำมันหอมระเหย

การสกัดน้ำมันหอมระเหยใช้วิธีการกลั่นไอน้ำ (Steam distillation) [11, 12] คือ การให้น้ำผ่านใบมะกรูดที่ต้องการสกัดที่อยู่ในหม้อกลั่น น้ำมันระเหยจะถูกสกัดออกมาพร้อมกับไอน้ำซึ่งจะผ่านไปตามท่อ และถูกทำให้เย็นเก็บไว้ในขวด ซึ่งน้ำมันระเหยจะแยกตัวออกจากน้ำ ทำให้แยกออกได้ง่าย จากนั้นนำน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลที่มีความละเอียดสูง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP224S พิกัด 220 g ค่าความละเอียด 0.0001 g โดยในการทดลองนี้จะเลือกใบมะกรูด หลังอบแห้งที่มีสีใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดที่สุด และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดเพียงสภาวะเดียว ไปทดสอบเทียบกับใบมะกรูดสดเท่านั้น

## 2.6 สมการเอนพีริคัล

การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetic) การอบแห้งใบมะกรูด จะสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งโดยใช้สมการเอนพีริคัล เนื่องจากเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีกระบวนการวิเคราะห์ง่ายและไม่ซับซ้อน และเป็นแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่นิยม

ใช้ในการศึกษาการอบแห้งอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร โดยแบบจำลองที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้จำนวน 7 สมการ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งสมการเอมพิริคัลจะแสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นจำเป็นต้องทราบค่าความชื้นสมดุล แต่การอบแห้งวัสดุที่สภาวะสุญญากาศ น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ความชื้นสมดุลของวัสดุมีค่าใกล้เคียงร้อยละศูนย์ ( $M_{eq} \approx 0$  d.b.) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงสามารถคำนวณอัตราส่วนความชื้นโดยไม่ต้องใช้ความชื้นสมดุลได้ดังสมการที่ (3)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = \frac{M_t}{M_i} \quad (3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

$M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)

$M_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)

$M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)

ตารางที่ 1 แบบจำลองเอมพิริคัล [4, 9, 13-16]

| No. | Name                 | Model equation             |
|-----|----------------------|----------------------------|
| 1   | Newton               | $MR = \exp(-kt)$           |
| 2   | Page                 | $MR = \exp(-kt^n)$         |
| 3   | Henderson and Pabis  | $MR = a \exp(-kt)$         |
| 4   | Logarithmic          | $MR = a \exp(-kt) + c$     |
| 5   | Weibull distribution | $MR = a - b \exp(-(kt)^n)$ |
| 6   | Midilli              | $MR = a \exp(-kt^n) + bt$  |
| 7   | Demir et al.         | $MR = a \exp(-kt^n) + b$   |

\* a b c k และ n คือ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์สมการเอมพิริคัล และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาท)

การหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง จะใช้ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองไปวิเคราะห์สมการโดยใช้วิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการในตารางที่ 1 ซึ่งมี

ดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของสมการเอมพิริคัล คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) การลดลงไคกำลังสอง (Chi-square,  $\chi^2$ ) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ดังสมการที่ (4)-(5) โดยสมการเอมพิริคัลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด และค่าการลดลงไคกำลังสองและรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด จะเป็นสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-p} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (5)$$

เมื่อ  $MR_{exp,i}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)

$MR_{pre,i}$  คือ อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล (decimal)

N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในสมการเอมพิริคัล

## 2.7 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient) เป็นสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุขณะอบแห้ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ วิธีการและอุณหภูมิการอบแห้ง ในงานวิจัยนี้จะตั้งสมมติฐานให้ใบมะกรูดมีรูพรุนเรขาคณิตเป็นแบบแผ่นแบน ความชื้นเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวตามความหนาของวัสดุ และวัสดุหดตัวน้อย ดังนั้นในการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล สามารถเขียนสมการได้ตามกฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ (6)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D_{eff} t\right) \quad (6)$$

เมื่อ  $D_{eff}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

( $m^2/s$ )

$L$  คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาใบมะกรูด (m)

( $L=0.178 \pm 0.017$  mm)

$t$  คือ เวลาในการอบแห้ง (s)

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาคำตอบของสมการที่ (6) สมมติให้การอบแห้งใช้เวลานาน และเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง จะพิจารณาเพียงทอมแรกเท่านั้นดังสมการที่ (7) และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลแต่ละเงื่อนไขการอบแห้ง ได้ดังสมการที่ (8)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \text{Slope} \cdot t \quad (7)$$

เมื่อ

$$\text{Slope} = \frac{D_{eff} \pi^2}{4L^2} \quad (8)$$

อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอบแห้ง [9, 15] และมีความสัมพันธ์ตามรูปสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) กับค่าของพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำหรือความชื้นให้เคลื่อนที่ออกจากวัสดุ โดยค่าพลังงานกระตุ้นสามารถวิเคราะห์ได้จากความลาดชันระหว่าง  $\ln(D_{eff})$  กับ  $(1/T_{abs})$  ซึ่งมีเท่ากับ  $(-E_a/R)$  และปัจจัยเลขชี้กำลังหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของ  $\ln(D_{eff})$  กับ  $(1/T_{abs})$  ดังสมการที่ (9) และ (10)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (9)$$

หรือ

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT_{abs}} \quad (10)$$

เมื่อ  $D_0$  คือ ปัจจัยเลขชี้กำลัง ( $m^2/s$ )

$E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)

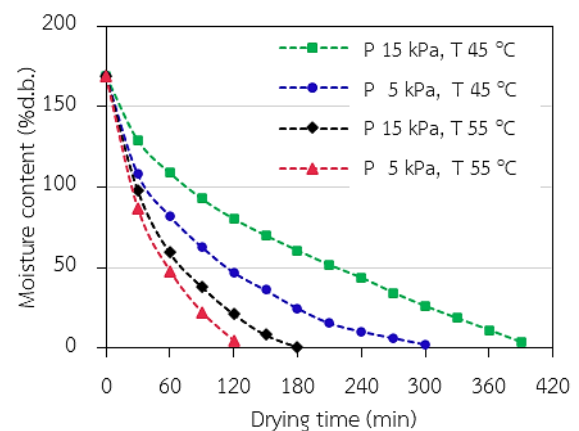
$R$  คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส (8.314 J/mol K)

$T_{abs}$  คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)

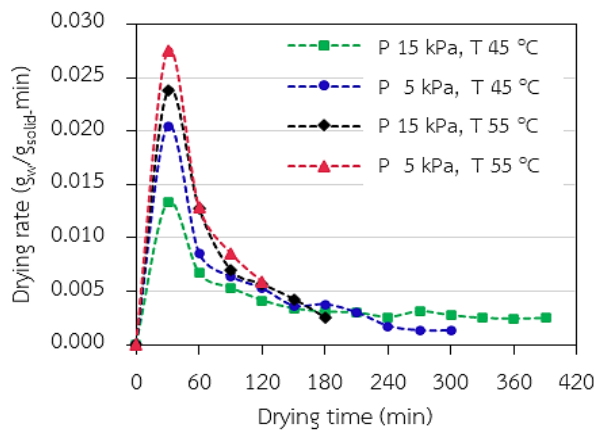
### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด

จากการทดลองพบว่า ความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้งดังรูปที่ 2 โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง เมื่อพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิอบแห้ง พบว่า ที่ความดันสัมบูรณ์เดียวกัน อุณหภูมิอบแห้ง 55 °C มีความชื้นลดลงเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 45 °C ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเร็วกว่า และสอดคล้องกับกราฟอัตราการอบแห้งตามรูปที่ 3 ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 45 °C มีอัตราการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C ที่ความดันสัมบูรณ์เดียวกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งให้สูงขึ้นนั้น เป็นการเพิ่มพลังงานให้กับน้ำที่มีอยู่ใน



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นใบมะกรูดที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิ 45 และ 55 °C



รูปที่ 3 อัตราการอบแห้งใบมะกรูดที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa และอุณหภูมิ 45 และ 55 °C

ผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะใช้เป็นพลังงานความร้อนในรูปของความร้อนแฝงในการระเหยน้ำออกไปจากผลิตภัณฑ์ ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด โดยที่สถานะความดันเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่าและอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น

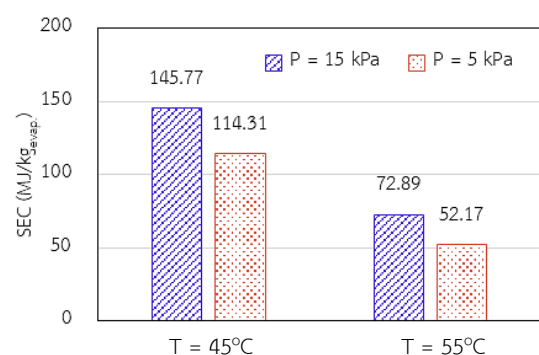
เมื่อพิจารณาที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa พบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa มีความชันของเส้นกราฟมากที่สุดนั่นคือ ความชื้นจะลดลงเร็วกว่าที่ความดัน 15 kPa ในขณะที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa มีความชื้นลดลงค่อนข้างช้ากว่า ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะความดันสุญญากาศซึ่งมีอิทธิพลต่อจุดเดือดของน้ำ และสอดคล้องกับกราฟอัตราการอบแห้งตามรูปที่ 3 โดยน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5 และ 15 kPa มีจุดเดือดประมาณ 33 และ 54 °C ตามลำดับ [4] เป็นผลให้การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่เร็วกว่า จึงสรุปได้ว่า ความดันสุญญากาศมีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด เมื่อความดันสัมบูรณ์ลดลง การอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกันจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น และความชื้นจะลดลงเร็วกว่า

นอกจากนี้การอบแห้งใบมะกรูดที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa (จุดเดือดน้ำ 54 °C) อุณหภูมิอบแห้ง 55 °C มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa (จุด

เดือดน้ำ 33 °C) อุณหภูมิอบแห้ง 45 °C แสดงดังรูปที่ 2-3 แม้ว่าจุดเดือดของน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะต่ำกว่าก็ตาม แต่ทั้งสองสภาวะการอบแห้งนี้น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการอบแห้ง และการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa มีอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงกว่า ทำให้ในช่วงแรกของการอบแห้งมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสภาวะแวดล้อมในห้องอบแห้งกับวัสดุมากกว่า ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและลดความชื้นได้ดีกว่า ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งข้าว [4] และซิง [16] ที่อบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดเหมือนกัน

### 3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน พบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่ความดัน 5 kPa มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่ความดัน 15 kPa โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 21.58 และร้อยละ 28.43 ที่อุณหภูมิอบแห้ง 45 และ 55 °C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากที่สถานะความดันสัมบูรณ์ต่ำ น้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น เนื่องจากจุดเดือดของน้ำต่ำลง จึงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง สรุปได้ว่า การเปลี่ยนภาวะความดันสุญญากาศและอุณหภูมิอบแห้ง จะส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลง [4, 9] เมื่อสถานะความดันสัมบูรณ์ต่ำลงและอุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น



รูปที่ 4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบมะกรูด

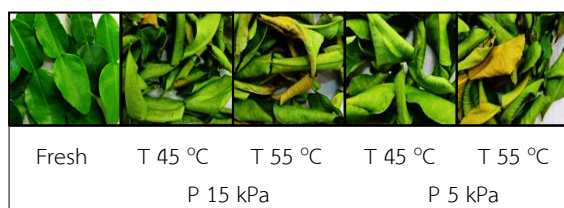
### 3.3 สีของใบมะกรูด

ค่าสีของผลิตภัณฑ์ใบมะกรูดก่อนและหลังอบแห้งตามสภาวะต่างๆ แสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 5 พบว่าค่าความสว่าง (L) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิการอบแห้งที่ 45 °C ให้ค่าความสว่างใกล้เคียงกับสภาวะเริ่มต้นมากที่สุด และค่าความเป็นสีเขียว (-a) มีแนวโน้มสอดคล้องกัน นั่นคือสภาวะที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำจะมีความเป็นสีเขียวใกล้เคียงกับใบมะกรูดสดมากกว่าการใช้อุณหภูมิสูง สำหรับค่า (b) ความเป็นสีเหลืองในทุกสภาวะการทดลองให้ผลโดยเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2 สีของใบมะกรูดก่อนและหลังอบแห้ง

| P (kPa) | T (°C) | L                       | a                       | b                       |
|---------|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Fresh   |        | 41.32±0.04 <sup>d</sup> | -9.33±0.05 <sup>e</sup> | 24.99±0.09 <sup>b</sup> |
| 15      | 45     | 43.74±0.05 <sup>b</sup> | -7.86±0.05 <sup>d</sup> | 23.23±0.06 <sup>e</sup> |
|         | 55     | 46.23±0.05 <sup>a</sup> | -3.82±0.04 <sup>a</sup> | 24.76±0.09 <sup>c</sup> |
| 5       | 45     | 42.39±0.03 <sup>c</sup> | -7.56±0.03 <sup>c</sup> | 24.47±0.01 <sup>d</sup> |
|         | 55     | 46.08±0.06 <sup>a</sup> | -4.57±0.05 <sup>b</sup> | 26.01±0.06 <sup>a</sup> |

a-e means in the same column with different superscripts are significantly different (p<0.05)



รูปที่ 5 ใบมะกรูดก่อนและหลังการอบแห้ง

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งในแต่ละสภาวะเทียบกับใบมะกรูดสด ดังตารางที่ 3 สรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 45 °C ให้ความแตกต่างของสีน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 55 °C เนื่องจากใบมะกรูดถือว่าเป็นสมุนไพรที่ไวต่อความร้อน ดังนั้นอิทธิพลของอุณหภูมิจึงมีผลมากกว่าของความดันในการอบแห้ง ดังนั้นที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45 °C

ให้ผลของ  $\Delta E$  น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับใบมะกรูดก่อนการอบแห้ง ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดง ใบมะกรูดสดและที่สภาวะต่างๆ หลังการอบแห้ง

ตารางที่ 3 ความแตกต่างของสีใบมะกรูดหลังอบแห้ง

| P (kPa) | T (°C) | $\Delta L$              | $\Delta a$              | $\Delta b$              | $\Delta E$             |
|---------|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 15      | 45     | -2.42±0.09 <sup>b</sup> | -1.46±0.10 <sup>d</sup> | 1.77±0.04 <sup>a</sup>  | 3.33±0.08 <sup>c</sup> |
|         | 55     | -4.88±0.05 <sup>a</sup> | -5.50±0.09 <sup>a</sup> | 0.23±0.18 <sup>c</sup>  | 7.36±0.05 <sup>a</sup> |
| 5       | 45     | -1.07±0.07 <sup>c</sup> | -1.77±0.08 <sup>c</sup> | 0.52±0.09 <sup>b</sup>  | 2.13±0.07 <sup>d</sup> |
|         | 55     | -4.76±0.10 <sup>a</sup> | -4.76±0.03 <sup>b</sup> | -1.02±0.14 <sup>d</sup> | 6.81±0.08 <sup>b</sup> |

a-d means in the same column with different superscripts are significantly different (p<0.05)

### 3.4 น้ำมันหอมระเหยของใบมะกรูด

จากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของใบมะกรูดจากผลการทดสอบด้านสี และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่าที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45 °C ให้ผลที่ดีที่สุด จึงนำใบมะกรูดที่สภาวะนี้มาทดสอบหาปริมาณน้ำมันหอมระเหยเปรียบเทียบกับใบมะกรูดสดตามเงื่อนไขที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 2.5 จากผลการทดสอบพบว่า ใบมะกรูดสดมีค่า น้ำมันหอมระเหยเฉลี่ยที่ 0.7971% โดยน้ำหนัก ส่วนสภาวะหลังการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45 °C เฉลี่ยอยู่ที่ 0.7849% โดยน้ำหนัก โดยมีค่าลดลงประมาณ 1.53% เมื่อเทียบกับใบมะกรูดสด ซึ่งถือว่าลดลงไม่มากนัก อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

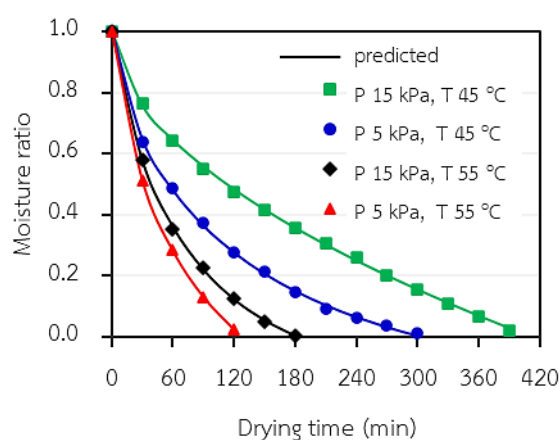
### 3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

เมื่อนำผลการทดลองอบแห้งใบมะกรูดไปวิเคราะห์โดยวิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น เพื่อหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลของสมการในตารางที่ 1 จำนวน 7 สมการพบว่า สมการเอมพิริคัลมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.98333-0.99999 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.00058-0.03522 และค่าการลดลงไคกำลังสองอยู่ในช่วง 0.00166x10<sup>-3</sup>-1.33848x10<sup>-3</sup> แสดงดังตารางที่ 4 โดยสมการเอมพิริคัลของ Demir et al. มีค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

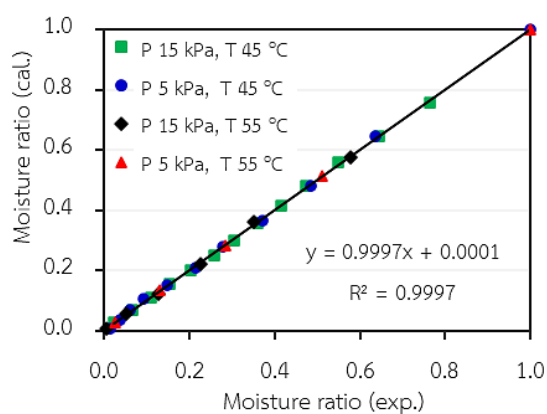
ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัล

| Model                   | P<br>(kPa) | T<br>(°C) | Constant                                          | R <sup>2</sup> | RMSE           | $\chi^2 (\times 10^{-3})$ |
|-------------------------|------------|-----------|---------------------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------|
| Newton                  | 15         | 45        | k = 0.00627                                       | <u>0.98333</u> | <u>0.03522</u> | 1.33574                   |
|                         |            | 55        | k = 0.01770                                       | 0.99675        | 0.01863        | 0.40485                   |
|                         | 5          | 45        | k = 0.01140                                       | 0.99114        | 0.02731        | 0.82040                   |
|                         |            | 55        | k = 0.02235                                       | 0.99620        | 0.02131        | 0.56782                   |
|                         |            |           | Average                                           | 0.99186        | 0.02562        | 0.78220                   |
| Page                    | 15         | 45        | k = 0.00853 n = 0.94095                           | 0.98458        | 0.03387        | <u>1.33848</u>            |
|                         |            | 55        | k = 0.01645 n = 1.01715                           | 0.99681        | 0.01847        | 0.47746                   |
|                         | 5          | 45        | k = 0.01897 n = 0.89223                           | 0.99461        | 0.02131        | 0.55497                   |
|                         |            | 55        | k = 0.01697 n = 1.06863                           | 0.99686        | 0.01936        | 0.62476                   |
|                         |            |           | Average                                           | 0.99322        | 0.02325        | 0.74892                   |
| Henderson<br>and Pabis  | 15         | 45        | a = 0.96611 k = 0.00604                           | 0.98537        | 0.03299        | 1.26998                   |
|                         |            | 55        | a = 0.99932 k = 0.01769                           | 0.99675        | 0.01863        | 0.48572                   |
|                         | 5          | 45        | a = 0.96713 k = 0.01103                           | 0.99268        | 0.02484        | 0.75384                   |
|                         |            | 55        | a = 1.00318 k = 0.02244                           | 0.99622        | 0.02126        | 0.75350                   |
|                         |            |           | Average                                           | 0.99276        | 0.02443        | 0.81576                   |
| Logarithmic             | 15         | 45        | a = 1.05123 k = 0.00473 c = -0.10960              | 0.98913        | 0.02844        | 1.02928                   |
|                         |            | 55        | a = 1.03098 k = 0.01595 c = -0.03971              | 0.99819        | 0.01390        | 0.33799                   |
|                         | 5          | 45        | a = 0.97096 k = 0.01085 c = -0.00555              | 0.99271        | 0.02477        | 0.84352                   |
|                         |            | 55        | a = 1.06419 k = 0.01914 c = -0.06898              | 0.99863        | 0.01278        | 0.40839                   |
|                         |            |           | Average                                           | 0.99467        | 0.01997        | 0.65480                   |
| Weibull<br>distribution | 15         | 45        | a = -1.28795 b = -2.28357 k = 0.00099 n = 0.64110 | 0.99915        | 0.00795        | 0.08855                   |
|                         |            | 55        | a = -0.15441 b = -1.15464 k = 0.01284 n = 0.81782 | 0.99979        | 0.00469        | 0.05125                   |
|                         | 5          | 45        | a = -0.21149 b = -1.21040 k = 0.00725 n = 0.69736 | 0.99948        | 0.00664        | 0.06923                   |
|                         |            | 55        | a = -0.33910 b = -1.33908 k = 0.01176 n = 0.76120 | 0.99999        | 0.00058        | 0.00167                   |
|                         |            |           | Average                                           | 0.99960        | 0.00496        | 0.05267                   |
| Midilli                 | 15         | 45        | a = 1.00099 k = 0.03623 n = 0.56623 b = -0.00082  | 0.99971        | 0.00462        | 0.02989                   |
|                         |            | 55        | a = 1.00019 k = 0.02969 n = 0.84538 b = -0.00049  | 0.99981        | 0.00450        | 0.04733                   |
|                         | 5          | 45        | a = 0.99863 k = 0.03520 n = 0.72747 b = -0.00034  | 0.99934        | 0.00748        | 0.08797                   |
|                         |            | 55        | a = 0.99998 k = 0.04018 n = 0.79668 b = -0.00113  | 0.99999        | 0.00095        | 0.00450                   |
|                         |            |           | Average                                           | 0.99971        | 0.00439        | 0.04242                   |
| Demir<br>et al.         | 15         | 45        | a = 10.82489 k = 0.00347 n = 0.55310 b = -9.82445 | 0.99965        | 0.00510        | 0.03643                   |
|                         |            | 55        | a = 1.15475 k = 0.02840 n = 0.81772 b = -0.15452  | 0.99979        | 0.00469        | 0.05125                   |
|                         | 5          | 45        | a = 1.21079 k = 0.03222 n = 0.69714 b = -0.21186  | 0.99948        | 0.00664        | 0.06923                   |
|                         |            | 55        | a = 1.33962 k = 0.03399 n = 0.76095 b = -0.33964  | <u>0.99999</u> | <u>0.00058</u> | <u>0.00166</u>            |
|                         |            |           | Average                                           | <b>0.99973</b> | <b>0.00425</b> | <b>0.03964</b>            |

สูงที่สุด ( $R^2=0.99973$ ) ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด (RMSE= 0.00425) และค่าเฉลี่ยการลดลงไคกำลังสองต่ำที่สุด ( $\chi^2=0.03964 \times 10^{-3}$ ) แสดงว่าเป็นสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งใบมะกรูด สอดคล้องกับรูปที่ 6 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของใบมะกรูดระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการของ Demir et al.



รูปที่ 6 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของใบมะกรูดระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการเอมพิริคัลของ Demir et al.



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการเอมพิริคัลของ Demir et al.

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการของ Demir et al. แสดงดังรูปที่ 7 มีความสัมพันธ์ของข้อมูลเกาะกลุ่มกันเป็นแนวเส้นตรง และมีความลาดชัน 45 องศา แสดงว่าแบบจำลองของ Demir et al. สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูดได้ค่อนข้างแม่นยำ

### 3.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

เมื่อคำนวณหาความลาดชันของอัตราส่วนความชื้นในแต่ละการทดลองจากสมการที่ (7) จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจากสมการที่ (8) ได้ผลดังตารางที่ 5 ซึ่งจะพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง  $1.4221 \times 10^{-12}$  -  $6.1840 \times 10^{-12}$   $\text{m}^2/\text{s}$  โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลง [9] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง สอดคล้องกับผลการทดลองดังรูปที่ (2)-(3) นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 5 และ 15 kPa มีค่าปัจจัยเลขชี้กำลัง 23.90 และ 1,539.48  $\text{m}^2/\text{s}$  และมีค่าพลังงานกระตุ้น 79,072.47 และ 91,568.28 J/mol ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 โดยพลังงานกระตุ้นมีค่าน้อยลงตามความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งที่ลดลง เนื่องจากที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำน้ำจะมีจุดเดือดต่ำกว่าที่ความดันสัมบูรณ์สูง ซึ่งส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำหรือความชื้นเคลื่อนที่ออกจากวัสดุน้อยลงตามไปด้วย

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

| P (kPa) | T (°C) | Slope       | $D_{\text{eff}} (\text{m}^2/\text{s})$ |
|---------|--------|-------------|----------------------------------------|
| 15      | 45     | -0.00011042 | $1.4221 \times 10^{-12}$               |
|         | 55     | -0.00031709 | $4.0841 \times 10^{-12}$               |
| 5       | 45     | -0.00019307 | $2.4868 \times 10^{-12}$               |
|         | 55     | -0.00048013 | $6.1840 \times 10^{-12}$               |

ตารางที่ 6 ปัจจัยเลขชี้กำลังและพลังงานกระตุ้น

| P (kPa) | T (°C) | D <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> /s) | E <sub>a</sub> (J/mol) |
|---------|--------|------------------------------------|------------------------|
| 15      | 45     | 1,539.48                           | 91,568.28              |
|         | 55     |                                    |                        |
| 5       | 45     | 23.90                              | 79,072.47              |
|         | 55     |                                    |                        |

#### 4. สรุป

การอบแห้งใบมะกรูดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล สรุปว่า อุณหภูมิการอบแห้งและสภาวะความดันสุญญากาศมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของใบมะกรูด โดยเมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งน้อยลง การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้การเปลี่ยนแปลงสีของใบมะกรูดน้อยที่สุด แต่ที่อุณหภูมิเดียวกัน การอบแห้งที่ความดัน 15 kPa ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงขึ้นเนื่องจากใช้ระยะเวลานานกว่า ดังนั้นที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อุณหภูมิ 45 °C เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูด โดยมีน้ำมันหอมระเหยลดลงประมาณ 1.53% เมื่อเทียบกับใบมะกรูดสด นอกจากนั้นยังพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพมีค่าอยู่ระหว่าง  $1.4221 \times 10^{-12}$ – $6.1840 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s และสมการเอมพิริคัลของ Demir et al. สามารถทำนายผลการอบแห้งใบมะกรูดได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2=0.99973$ ) สูงที่สุด ค่าเฉลี่ยรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE=0.00425) และค่าเฉลี่ยการลดลงค่ากำลังสองเฉลี่ย ( $\chi^2=0.03964 \times 10^{-3}$ ) ต่ำที่สุด

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Borompichaichartkul, "Hybrid drying technology: application for preservation of heat sensitive food products," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 269-283, Apr.-June. 2012.
- [2] K. Vonggrachit. (2019, June 12). The government is preparing to push 4 top economic herbs [Online]. Available: <http://www.voicetv.co.th/read/Hk3DwZ0lQ>
- [3] S. Tirawanichakul, S. Lamaepae and Y. Tirawanichakul, "Combined infrared/microwave and hot air drying for jackfruit: kinetics, quality and sensory analysis," *Burapha Sci. J.*, vol. 17, no. 1, pp. 117-129, Jan. 2012.
- [4] K. Witinantakit and S. Jaekhom, "Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 29-44, Sep.-Dec. 2019.
- [5] Y. Xie, Z. Gao, Y. Liu and H. Xiao., "Pulsed vacuum drying of rhizoma dioscoreae slices," *LWT- Food Science and Technology*, vol. 80, pp. 237-249, Jul. 2017.
- [6] L. Xie, A. S. Mujumdar, X. M. Fang, J. Wang, J. W. Dai, Z. L. Du, H. W. Xiao, Y. Liu and Z. J. Gao, "Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): effects on drying kinetics and quality attributes," *Food and Bioprocess Processing*, vol. 102, pp. 320-331, Mar. 2017.

- [7] J. Wang, C.-L. Law, P. K. Nema, J.-H. Zhao, Z.-L. Liu and L.-Z. Deng, "Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 224, pp. 129-138, May. 2018.
- [8] A. Nathakaranakule, S. Paengkanya and S. Soponronnarit, "Durian chips drying using combined microwave techniques with step-down microwave power input," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 116, pp. 105-117, Jul. 2019.
- [9] K. Witinantakit, N. Uengkimbuan and S. Rungsawang, "Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared-vacuum technique," *SWU Engineering Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 1-13, Sep-Dec. 2019.
- [10] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official Methods of Analysis. 17<sup>th</sup>ed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg, 2000.
- [11] S. Malaniyom. (2019, June 2). Essential oil Thai herbal plant extracts [Online]. Available: <http://library.tisi.go.th/multim/bulletin/2545/325Jul02.pdf>.
- [12] P. Rattanapitigorn. "Essential oils from plant extracts and theirs application as antimicrobial agents in food products," *Journal of Food Technology, Siam University*, vol. 13, no. 2, pp. 1-10, Jul.-Dec. 2018.
- [13] V. Demir, T. Gunhan, and A.K. Yagcioglu, "Mathematical modelling of convection drying of green table olives," *Biosystems Engineering*, vol. 98, no. 1, pp. 47-53, Sep. 2007.
- [14] A. Midilli, H. Kucuk and Z. Yapar, "A new model for single-layer drying," *Drying Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 1503-1513, Jul. 2002.
- [15] M. Younis, D. Abdelkarim and A. Z. El-Abdein, "Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices," *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 25, pp. 332-338, 2018.
- [16] U. Teeboonma and S. Jongjam, "Ginger drying using infrared-vacuum technique," *Burapha Sci. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 76-86, 2010.

## การออกแบบและพัฒนาเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสาน

## Design and Development of Bamboo Craft Splitting and Slicing Machine

กถำณรงค์ สุขใจ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ \* จตุรงค์ ลังกาพินธุ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Klanarong Sukjai Roongruang Kalsirisilp\* Jaturong Langapin

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani, 12110

\*Corresponding author Email: roongruang\_k@rmutt.ac.th

(Received: January 5, 2021; Accepted: March 25, 2021)

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยเรื่อง เครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสานได้ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงาน ช่วยประหยัดเวลาและแรงงานคนในขั้นตอนการผ่าและรีดไม้ไผ่ เครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่ที่ออกแบบและพัฒนา ประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 5 ส่วน ได้แก่ 1. โครงเครื่อง 2. ระบบเฟือง 3. ชุดโซ่ลำเลียง 4. ชุดใบมีด และ 5. ระบบถ่ายทอดกำลัง ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเร็วรอบของมอเตอร์สำหรับการผ่าไม้ไผ่ที่ 1,300 1,400 และ 1,500 รอบต่อนาที ความเร็วรอบของมอเตอร์สำหรับการรีดไม้ไผ่ที่ 500 700 และ 900 รอบต่อนาที โดยมีค่าชี้ผลในการศึกษา ได้แก่ ความสามารถในการผ่า ความสามารถในการรีดไม้ไผ่ เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ ผลการทดสอบเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสานพบว่า ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการผ่าและการรีดไม้ไผ่ เท่ากับ 1,500 รอบต่อนาที และ 700 รอบต่อนาที ตามลำดับ ความสามารถในการผ่าไม้ไผ่เฉลี่ยเท่ากับ 7.12 ท่อนต่อนาที ความสามารถในการรีดไม้ไผ่เฉลี่ยเท่ากับ 5.65 เส้นต่อนาที การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับการตัดเท่ากับ 1.87 กิโลวัตต์-ชั่วโมง การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับการรีดเท่ากับ 0.79 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ผลการเปรียบเทียบกับการใช้แรงงานคนพบว่า การใช้เครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จะมีความสามารถในการผ่าและจักตอกไม้ไผ่มากกว่าการใช้แรงงานคน ประมาณ 2.6 และ 2.7 เท่า ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าค่าใช้จ่ายในการทำงาน 90.1 บาทต่อชั่วโมง จุดคุ้มทุนในการทำงาน 156 ชั่วโมงต่อปี และเมื่อพิจารณาการทำงานที่ 300 ชั่วโมงต่อปี จะมีระยะเวลาในการคืนทุน 2.5 ปี

**คำสำคัญ:** ไม้ไผ่จักสาน เครื่องผ่า เครื่องรีด

### ABSTRACT

The research project entitled "design and development of bamboo craft splitting and slicing machine" was aimed to increase the working capacity as well as time and labor saving for bamboo splitting and slicing process. The machine consists of five main parts namely, steel frame, gear train, chain conveyor, blade unit and power transmission system. The speed of motor for bamboo splitting unit was selected at 500, 700 and 900 rpm. and the speed of motor for bamboo slicing unit was

selected at 1300, 1400 and 1500 rpm. The performance parameters studied were bamboo splitting capacity, bamboo slicing capacity, bamboo slicing loss, electrical consumption and economic analysis of bamboo splitting and slicing machine. The performance test of the machine showed that the optimum speed for splitting and slicing were 1,500 and 700 rpm, respectively. The average capacity of splitting and slicing were 7.12 sticks per min and 5.65 slices per min, respectively. The electrical power consumption for bamboo splitting and slicing were 1.87 and 0.79 kW-h, respectively. Based on the test results the capacity for bamboo splitting and slicing of the machine were approximately 2.6 and 2.7 times higher than traditional manual operation of bamboo splitting and slicing methods, respectively. An economic analysis further showed that the operation cost of the machine was 90.1 Bath per hour with the break even point of 156 hour per year. Considering the working hour of 300 hour per year, the pay back period of the machine was found to be 2.5 years.

**Keyword:** Bamboo craft, splitting machine, slicing machine.

## 1. บทนำ

ไม้ไผ่เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในเขตร้อนอยู่ในวงศ์ Gramineae เช่นเดียวกับหญ้าแต่เป็นพืชตระกูลหญ้าที่สูงที่สุดในโลก ไม้ไผ่ใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น นำมาสร้างเป็นที่อยู่อาศัย สร้างเป็นม้านั่งร้านในงานก่อสร้าง ใช้จักสานภาชนะต่าง ๆ ใช้ทำเครื่องดนตรี ใช้เป็นเยื่อกระดาษในอุตสาหกรรมทำกระดาษ ทำเครื่องกีฬา ใช้เป็นอาวุธ เช่น คันธนู หอก หลาว ใช้เป็นเครื่องอุปกรณ์การประมง เช่น ทำเสาโป๊ะ ทำเครื่องมือในการเกษตร นอกจากนี้ไผ่ยังใช้ห่อขนม หน่อไผ่ใช้เป็นอาหารอย่างดี และกอไผ่ยังใช้ประดับสวนได้งดงาม ไม้ไผ่ทั่วโลกที่รู้จักกันมีประมาณ 75 สกุล ที่ได้สำรวจพบในเมืองไทยมีประมาณ 12 สกุล แยกเป็นชนิดประมาณ 44 ชนิด [1] มีพื้นที่ป่าไผ่ธรรมชาติในประเทศกว่า 28 ล้านไร่ นอกจากนี้คนไทยยังนิยมปลูกไผ่ไว้รอบบ้านเพื่อนำไผ่ไว้ใช้สอยและรั้วไม้ไผ่ยังช่วยป้องกันลมพายุและไผ่ยังช่วยในเรื่องการอนุรักษ์ดินและน้ำเพราะไผ่มีระบบรากเหง้าที่ยึดเหนี่ยวกันแน่นหนา ป้องกันการพังทลายของดินได้ [2] ไม้ไผ่เป็นไม้พุ่ม หลายชนิดเป็นไม้ไม่ผลัดใบ ขึ้นเป็นกอ ลำต้นเป็นปล้องๆ เช่น ไผ่จั่น ไผ่ป่า ไผ่สีสุก ไผ่ไร่ ไผ่ดำ ไผ่เป็นไม้ที่ขึ้นง่ายและเติบโตเร็ว ขึ้นได้ดีในทุกสภาวะอากาศดำรงอยู่ในพื้นดิน

ทุกชนิด ที่สำคัญคือ ไผ่เป็นพันธุ์ไม้ที่อำนวยการประโยชน์หลายประการ ทั้งประโยชน์ทางตรงและทางอ้อม และเป็นพืชที่ลำต้นและกิ่งมีลักษณะแปลกสวยงาม ไผ่เป็นไม้ที่ตายยาก ถ้าไผ่ออกดอกเมื่อโตจึงจะตาย ซึ่งใช้เวลานานมากที่ไผ่จะออกดอก ในปัจจุบันสามารถนำไม้ไผ่มาจักสานทำเป็นอาชีพหารายได้ให้แก่ครอบครัว และยังเป็นงานที่ส่งออกไปขายอยู่นอกประเทศ สำหรับ คนไทยแล้วงานที่ใช้ฝีมือถือว่าเป็นงานที่ประณีตละเอียด มีคุณค่าสมควรแก่การอนุรักษ์สืบสานให้คงอยู่ และยังมีความสวยงามมาก [3][4]

ในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560-2564) ให้ความสำคัญกับการเพิ่มศักยภาพและขีดความสามารถของชุมชนในการจัดการปัญหาด้วยตนเอง สนับสนุนการรวมกลุ่มอาชีพที่สอดคล้องกับศักยภาพของพื้นที่ ส่งเสริมความรู้ ความสามารถในการเป็นผู้ประกอบการ ยกระดับการแปรรูป การผลิต โดยใช้เทคโนโลยี และเครื่องจักรสมัยใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิต สามารถแข่งขันกับตลาดต่างประเทศได้ [5] ซึ่งผู้วิจัยให้ความสำคัญกับการเตรียมวัตถุดิบสำหรับงานหัตถกรรมด้านเครื่องจักสานไม้ไผ่

จากการศึกษาขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบสำหรับงานหัตถกรรมเครื่องจักสานไม้ไผ่ พบว่าการนำไม้ไผ่มาจักสานจะต้องมีขั้นตอนการทำให้ไม้ไผ่บางลงและได้ตามขนาดที่ต้องการ แต่ในการทำนั้นยังใช้แรงงานคนเป็นส่วนใหญ่ไม่มีเครื่องมือมาอำนวยความสะดวกในการทำงานผ่าและรีดไม้ไผ่ (จักตอก) (รูปที่ 1-2) เพื่อให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ อีกทั้งเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ระยะเวลาและแรงงานจำนวนมากในการรีดไม้ไผ่ให้ได้ขนาดและจำนวนที่ต้องการ จากการศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูลกลุ่มผู้ผลิตเครื่องจักสานไม้ไผ่ในตำบลนานกกก อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องผ่าไม้ไผ่ [6] พบว่าชาวบ้านยังใช้วิธีการผลิตแบบเดิมคือการผ่าไม้ไผ่ด้วยมีด วิธีการผ่าด้วยมีดแบบเดิมนั้นมีข้อดีในด้านการผ่าที่สามารถผ่าไม้ไผ่ได้ทั้งลำ ตลอดความยาวของลำไม้ไผ่ แต่มีข้อจำกัดในด้านของวิธีการผ่าคือต้องใช้แรงงานมากกว่า 1 คน เพื่อใช้ในการผ่าไม้ไผ่ และใช้เวลามากในการผ่าไม้ไผ่ ซึ่งจากการศึกษาโดยการจับเวลาพบว่าการผ่าไม้ไผ่แบบเดิมด้วยการใช้มีดผ่า เมื่อผ่าไม้ไผ่ความยาว 2 เมตร หนา 7 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการผ่าเฉลี่ย 4.25 นาที ส่วนที่ความหนา 9 มิลลิเมตร จะใช้เวลาผ่าเฉลี่ย 4.76 นาที ส่วนการผ่าไม้ไผ่ขนาดความยาว 4 เมตร หนา 7 มิลลิเมตร จะใช้เวลาเฉลี่ยในการผ่า 6.46 นาที ส่วนการผ่าไม้ไผ่ขนาดความยาว 8 เมตร หนา 9 มิลลิเมตร จะใช้เวลาเฉลี่ยในการผ่า 10.93 นาที ส่วนความหนา 10 มิลลิเมตร จะใช้เวลาเฉลี่ยในการผ่า 12.14 นาที



รูปที่ 1 การผ่าไม้ไผ่ด้วยแรงงานคน [7]



รูปที่ 2 การจักตอกไม้ไผ่ด้วยแรงงานคน [8]

ดังนั้นเพื่อต้องการลดระยะเวลาและแรงงานในการผ่าและรีดไม้ไผ่ (จักตอก) ป้องกันอุบัติเหตุจากการใช้มีดในการผ่าและจักตอกไม้ไผ่ ลดความเมื่อยล้ากล้ามเนื้อมือในการทำงานที่ยาวนานและต่อเนื่อง ตลอดจนความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพไม้จากการจักตอกด้วยมือ และเป็นการเพิ่มผลผลิตในการเตรียมวัสดุได้มากขึ้น จึงได้มีการออกแบบและพัฒนาเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสานขึ้นมาเพื่อให้สามารถทำงานในขั้นตอนการผ่าและรีดไม้ไผ่จักสานได้ในเครื่องเดียวกัน

## 2. วัตถุประสงค์

ออกแบบและพัฒนาเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสานเพื่อช่วยลดระยะเวลาและแรงงานในการผ่าและรีดไม้ไผ่ ลดอันตรายที่เกิดจากการทำงาน และเพิ่มผลผลิตในการเตรียมวัสดุ ทำให้สามารถผลิตงานด้านหัตถกรรมได้มากขึ้น

## 3. วิธีการดำเนินงาน

### 3.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบ

จากการรวบรวมข้อมูลขั้นต้นพบว่า การผ่าไม้ไผ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 3 นิ้ว ควรที่จะผ่าให้ได้ 6 ซีก ต่อ 1 ไม้ไผ่ท่อน จึงจะเป็นจำนวนที่พอดีเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับทำผลิตภัณฑ์เครื่องจักสานไม้ไผ่ที่ผ่าโดยใช้แรงงานคนนั้น ในการผ่าจะใช้มีดผ่าไม้ไผ่ 1 ท่อน หนา 7 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้จำนวนซีก 6 ซีก ใช้

เวลาในการผ่าประมาณ 2 นาที ซึ่งต้องใช้แรงในการผ่า และอาจเกิดอันตรายจากการถูกมีดบาดได้ง่าย เพื่อการแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการออกแบบใบมีดสำหรับขั้นตอนการผ่าจำนวน 6 แฉก และมีมุมตรงกลางไว้เจาะไม้ไผ่ที่เชื่อมติดใบมีดทั้ง 6 ไว้ ส่วนใบมีดที่ใช้สำหรับริดไม้ไผ่หรือจกตอกออกแบบให้สามารถริดแผ่นไม้ไผ่ให้มีความบาง เหมาะสมสำหรับงานหัตถกรรม จากการสำรวจพบว่า ไม้ไผ่ 1 ซีก จะถูกริดออกมาเป็นแผ่นบางได้จำนวน 7 เส้น และใช้เวลาในการจกตอกประมาณ 3 นาที แต่ในระหว่างปฏิบัติมักเกิดการหยุดชะงักขึ้น เนื่องจากผู้ปฏิบัติจะต้องพึ่งสายตาเป็นเวลานาน จึงได้มีการออกแบบใบมีดสำหรับการจกตอกไม้ไผ่ โดยมีใบมีดที่สามารถติดตั้งระยะในการริดที่เหมาะสมและคมของใบมีดจะเป็นตัวริดให้ได้ความบางของไม้ไผ่ในระยะที่ต้องการและจากผลการทดลองทำให้สามารถกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการผ่าไม้ไผ่และจกตอกได้ดีที่สุด ส่วนต้นกำลังนั้นเลือกใช้มอเตอร์ 1 เฟส 2 แรงม้า ซึ่งเครื่องผ่าและริดไม้ไผ่จกสานนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน คือ โครงสร้างเครื่อง ระบบต้นกำลัง ระบบเฟือง โซลาลีเยง และระบบใบมีดสำหรับผ่าและริดไม้ไผ่ ซึ่งมีผลการออกแบบต่อไปนี้

### 3.1.1 ชุดโครงสร้างเครื่อง

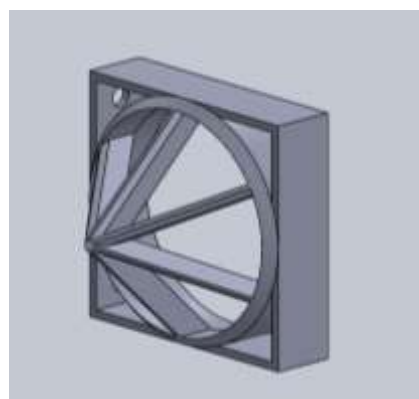
โครงสร้างเครื่องทำจากเหล็กกล่องนำมาเชื่อมให้ได้ขนาด ความกว้าง 600 มิลลิเมตร ยาว 1,000 มิลลิเมตร สูง 500 มิลลิเมตร โครงสร้างเครื่องมีหน้าที่รองรับการติดตั้งให้กับชิ้นส่วนหลักของเครื่องต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 3



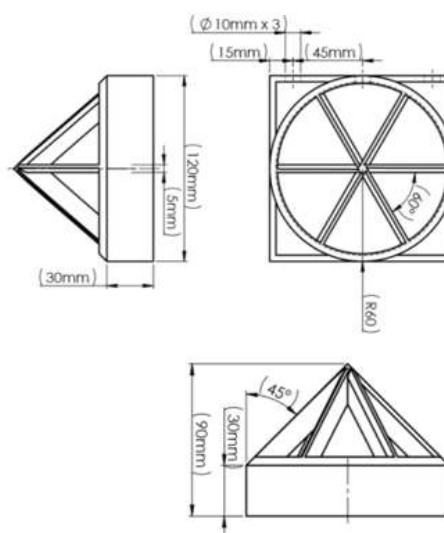
รูปที่ 3 โครงสร้างเครื่อง

### 3.1.2 ชุดใบมีดผ่าไม้ไผ่

ใบมีดผ่าไม้ไผ่ เป็นใบมีดที่มีลักษณะเชื่อมต่อกันเป็นวงกลมและมีจุดกึ่งกลางที่เป็นปลายแหลมไว้เจาะศูนย์กลางของไม้ไผ่ ประกอบด้วยจำนวนใบมีด 6 ใบ และมีความหนา 3 มิลลิเมตร แต่ละใบทำมุมกัน 60 องศา เชื่อมยึดติดกับแผ่นเหล็กรูปวงกลมรัศมี 60 มิลลิเมตร ยึดติดกับกรอบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความยาวด้านละ 120 มิลลิเมตร (รูปที่ 4)



(1) ใบมีดผ่าไม้ไผ่

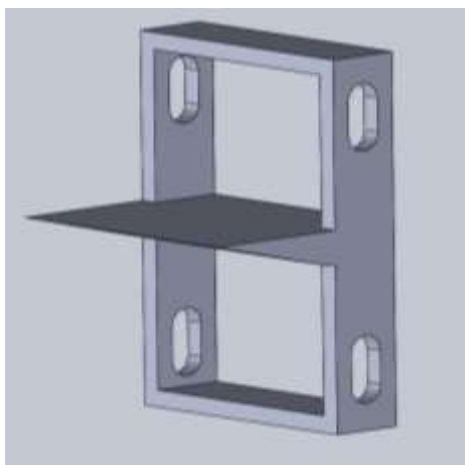


(2) ขนาดของใบมีดผ่าไม้ไผ่

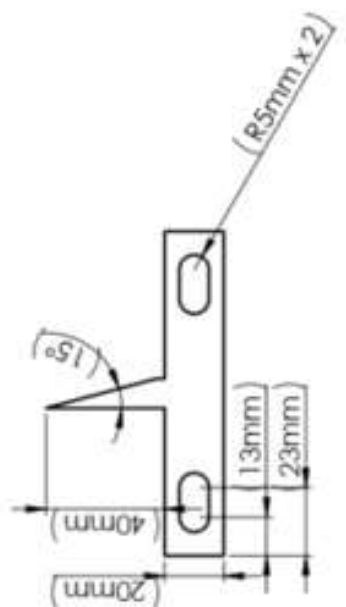
รูปที่ 4 ชุดใบมีดผ่าไม้ไผ่

### 3.1.3 ชุดใบมีดรีดไม้ไผ่

ใบมีดรีดไม้ไผ่ เป็นใบมีดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 7 ซม. ยาว 11 ซม. และมีใบมีดเชื่อมติดอยู่ระหว่างกลางกรอบบนและกรอบล่าง ใบมีดมีความหนา 5 มม. มุมเอียงของคมใบมีด 15 องศา (รูปที่ 5)



(1) ใบมีดสำหรับจักตอก

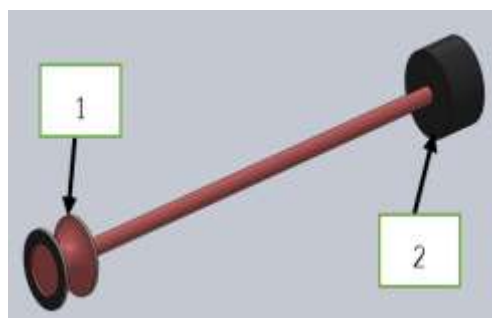


(2) ขนาดของใบมีดจักตอก

รูปที่ 5 ชุดใบมีดรีดไม้ไผ่สำหรับจักตอก

### 3.1.4 ชุดเพลาลูกกลิ้งลำเลียง

ชุดเพลาลูกกลิ้งลำเลียง ลูกกลิ้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มม. นำมาเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม. แล้วนำมาสวมเข้ากับเพลาลูกกลิ้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. และด้านตรงข้ามประกอบด้วยลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. นำมาเจาะรูขนาดเดียวกันและสวมเพลาลูกกลิ้ง (รูปที่ 6)

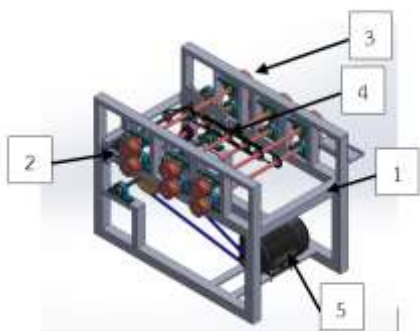


| หมายเลข | รายละเอียด                 |
|---------|----------------------------|
| 1       | ลูกกลิ้งสำหรับชุดผ้าไม้ไผ่ |
| 2       | ลูกกลิ้งสำหรับชุดรีดไม้ไผ่ |

รูปที่ 6 ชุดเพลาลูกกลิ้งลำเลียง

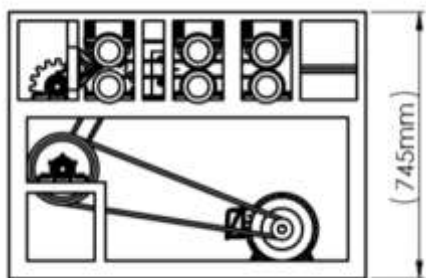
### 3.1.5 ผลการออกแบบเครื่องต้นแบบ

รายละเอียดในการออกแบบเครื่องผ้าและรีดไม้ไผ่จกสาน มีส่วนประกอบหลักได้แก่ โครงสร้างเครื่อง เพลารองรับลูกกลิ้ง โซ่ลำเลียง ชุดส่งกำลัง และชุดใบมีดสำหรับผ้าและสำหรับจักตอก โดยมีมอเตอร์เป็นต้นกำลัง ในการถ่ายทอดกำลังไปยังชุดเพลาลอยด้วยพูลเลย์และสายพาน จากนั้นส่งกำลังไปยังชุดลูกกลิ้งลำเลียงสำหรับชุดผ้าและชุดรีดไม้ไผ่ด้วยเฟืองและโซ่ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 7 และต้นแบบที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 8



| หมายเลข | รายละเอียด      |
|---------|-----------------|
| 1       | โครงเครื่อง     |
| 2       | ชุดใบมีดผ้าไหม  |
| 3       | ชุดใบมีดรีดไหม  |
| 4       | โซ่ลำเลียง      |
| 5       | มอเตอร์ต้นกำลัง |

- (1) ผลการออกแบบเครื่องผ้าและรีดไหมไหมจกสานด้วยโปรแกรมด้าน CAD



- (2) ออกแบบระบบถ่ายทอดกำลังของเครื่อง

รูปที่ 7 แบบของเครื่องผ้าและรีดไหมไหมจกสาน



รูปที่ 8 เครื่องต้นแบบเครื่องผ้าและรีดไหมไหมจกสาน

### 3.2 วิธีการทดสอบ

เพื่อทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องผ้าและรีดไหมไหมจกสาน ดำเนินการทดสอบดังนี้

1. ตัดไหมให้ได้ขนาดความยาวเท่าๆ กัน แบบไม่มีข้อตรงกลาง

2. สำหรับการทดสอบความสามารถในการตัดไหมไหมทดสอบไหมไหมครั้งละจำนวน 20 ท่อน ด้วยความเร็วรอบการทำงานของมอเตอร์ 1,300 1,400 และ 1,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ จับเวลาในการทำงานของเครื่องคำนวณความสามารถในการทำงาน และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

3. สำหรับการทดสอบความสามารถในการรีดไหมไหม (จกตอก) ปรับตั้งความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 500 700 และ 900 รอบต่อนาที ทดสอบไหมไหมจำนวน 20 ซีกต่อครั้ง คำนวณความสามารถในการทำงาน การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์ความสูญเสียไหมไหมจากการจกตอก

3.2.1 ความสามารถในการผ่าท่อนไหมไหม ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างจำนวนท่อนที่ผ่าได้ต่อเวลาที่ใช้ในการทำงาน คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$C_c = \frac{H}{t} \quad (1)$$

เมื่อ

$C_c$  = ความสามารถในการผ่า (ท่อนต่อนาที)

$H$  = จำนวนไหมไหมที่ผ่าได้ (ท่อน)

$t$  = เวลาที่ใช้ในการผ่า (นาที)

3.2.2 ความสามารถในการรีดเส้นไหมไหม ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างจำนวนเส้นที่รีดได้ต่อเวลาที่ใช้ในการทำงาน คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$C_s = \frac{R}{t} \quad (2)$$

เมื่อ

$C_s$  = ความสามารถในการรีดเส้นไหมไหม (เส้นต่อนาที)

$R$  = จำนวนเส้นไหมไหมที่รีดได้ (เส้น)

$t$  = เวลาที่ใช้ในการรีดเส้นไหมไหม (นาที)

3.2.3 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า หาได้จากผลคูณของกระแสไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าและเวลาในการทำงานคำนวณได้ดังสมการที่ 3 [9]

$$W = \frac{i.V.PF.t}{1,000} \quad (3)$$

เมื่อ

$W$  = การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

$i$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

$V$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

$PF$  = เพาเวอร์แฟคเตอร์ (0.7-0.95)

$t$  = เวลาในการทำงาน (ชั่วโมง)

### 3.2.4 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์

วัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทำงานจุดคุ้มทุน และวิเคราะห์หาระยะเวลาในการคืนทุนของเครื่อง วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวม ในการใช้งานเครื่องโดยพิจารณาจาก เกษตรกรซื้อเครื่องแทนวิธีการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วยต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และต้นทุนผันแปร (Variable cost) โดยต้นทุนคงที่ได้แก่ ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสานเท่ากับ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดอัตราดอกเบี้ย 10 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการใช้งานของเครื่อง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จะไม่คิดต้นทุนคงที่เกี่ยวกับค่าประกันภัย ค่าภาษี ค่าโรงเรือน และค่าจ้างขนย้ายเครื่องไปทำงานตามสถานที่ต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับต้นทุนผันแปรซึ่งเป็นต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการทำงาน ได้แก่ ค่าจ้างแรงงานคนเพื่อทำงานร่วมกับเครื่อง ค่าไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษาและค่าซ่อมแซม เป็นต้น

1. ค่าเสื่อมราคา (Depreciation) คำนวณได้จากสมการที่ 4 [10]

$$D = \left( \frac{P-S}{L} \right) \quad (4)$$

เมื่อ

$D$  = ค่าเสื่อมราคา (Baht/yr)

$P$  = ราคาเครื่องจักร (Baht)

$S$  = มูลค่าซาก (Baht)

$L$  = อายุการใช้งาน (year)

2. ค่าดอกเบี้ย หรือค่าเสียโอกาสในการลงทุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 [10]

$$I = \frac{(P+S)}{2} i \quad (5)$$

เมื่อ

$I$  = ค่าดอกเบี้ย (Baht/yr)

$i$  = อัตราดอกเบี้ยทศนิยม

3. ระยะเวลาในการคืนทุน (Pay Back Period, PBP)

เป็นการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องจักรว่ามีระยะเวลานานเท่าไรเมื่อลงทุนในเครื่องจักรไปแล้ว จะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปแล้วภายในระยะเวลาที่ปี คำนวณได้จากสมการที่ 6 [11]

$$PBP = \frac{P}{R} \quad (6)$$

เมื่อ

$PBP$  = ระยะเวลาในการคืนทุน (year)

$p$  = ราคาเครื่องจักร (Baht)

$R$  = กำไรสุทธิต่อปี (Baht/yr)

4. จุดคุ้มทุน (Break Even Point)

จุดคุ้มทุนในการทำงานของเครื่องคือจุดที่รายได้และรายจ่ายจากการใช้เครื่องมีค่าเท่ากัน หรือจุดที่ไม่ก่อให้เกิดผลกำไร คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างผลรวมของค่าใช้จ่ายคงที่กับผลต่างระหว่างอัตราการรับจ้างและค่าใช้จ่ายผันแปร ดังสมการที่ 7 [11]

$$BEP = \frac{F_C}{B-VC} \quad (7)$$

เมื่อ

$BEP$  = จุดคุ้มทุน (hr/yr)

$F_C$  = ค่าใช้จ่ายคงที่ (Baht/yr)

$B$  = อัตราการรับจ้าง (Baht/hr)

$VC$  = ค่าใช้จ่ายผันแปร (Baht/hr)

#### 5. ค่าใช้จ่ายรวมของเครื่อง (Total Cost)

ค่าใช้จ่ายรวมของเครื่อง ได้แก่ ผลรวมของ ค่าใช้จ่ายคงที่และค่าใช้จ่ายผันแปร คำนวณได้จากสมการที่ 8 [11]

$$TC = \frac{F_c}{X} + VC \quad (8)$$

เมื่อ

$TC$  = ค่าใช้จ่ายรวมของเครื่อง (Baht/hr)

$F_c$  = ค่าใช้จ่ายคงที่ (Baht/yr)

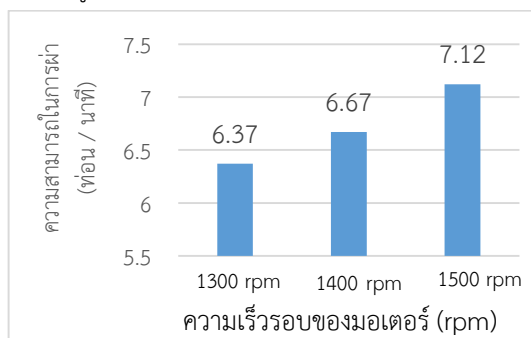
$X$  = ชั่วโมงการทำงานต่อปี (hr)

$VC$  = ค่าใช้จ่ายผันแปร (Baht/hr)

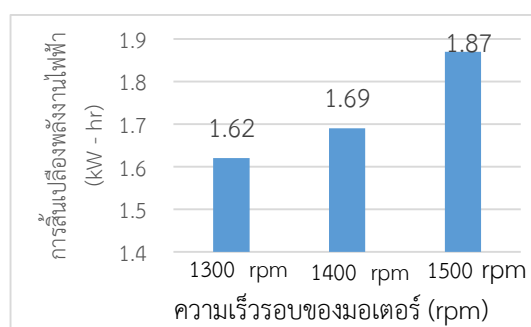
#### 4. ผลการศึกษา

##### 4.1 ความสามารถในการผ่าไม้ไผ่

ทำการทดสอบความสามารถในการผ่าไม้ไผ่และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,300 1,400 และ 1,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 9-10



รูปที่ 9 ความสามารถในการผ่าไม้ไผ่



รูปที่ 10 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

ความสามารถในการผ่าไม้ไผ่ ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,300 รอบต่อนาที มีค่าเท่ากับ 6.37 ท่อนต่อนาที การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 1.62 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เพิ่มความเร็วรอบเป็น 1,400 รอบต่อนาที ความสามารถในการผ่าไม้ไผ่เท่ากับ 6.67 ท่อนต่อนาที การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 1.69 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และเพิ่มเป็น 7.12 ท่อนต่อนาที การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 1.87 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบการทำงาน 1,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งที่ความเร็วรอบการทำงาน 1,500 รอบต่อนาที จะให้ความสามารถในการผ่าไม้ไผ่ได้สูงสุด ที่ 7.12 ท่อนต่อนาที หรือ ประมาณ 43 ซีกต่อนาที (ไม้ไผ่ 1 ท่อน ผ่าได้จำนวน 6 ซีก) เมื่อเปรียบเทียบการผ่าไม้ไผ่โดยใช้แรงงานคน ซึ่งมีความสามารถในการผ่าไม้ไผ่ 2.67 ท่อนต่อนาที หรือคิดเป็น 16 ซีกต่อนาที ดังนั้นการใช้เครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จะมีความสามารถในการผ่าไม้ไผ่มากกว่าการใช้แรงงานคนในการผ่า ประมาณ 2.7 เท่า ซึ่งจะช่วยลดประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทำงาน ทำให้ผลิตผลงานทางด้านหัตถกรรมได้มากขึ้น มีรายได้ในการจำหน่ายสินค้าได้มากขึ้นตามไปด้วย รูปที่ 11-12 แสดงการผ่าไม้ไผ่ด้วยเครื่องและไม้ไผ่ที่ถูกผ่าด้วยเครื่อง



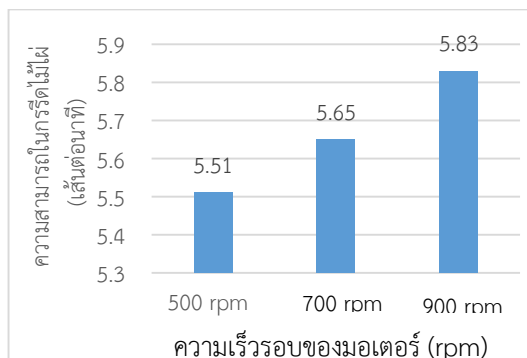
รูปที่ 11 การผ่าไม้ไผ่ด้วยเครื่อง



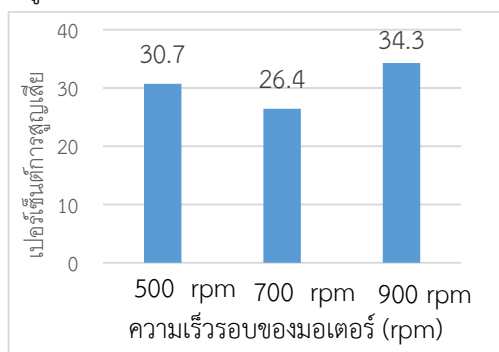
รูปที่ 12 ไม้ไผ่ที่ถูกผ่าด้วยเครื่อง

#### 4.2 ความสามารถในการรีดไม้ฝั่

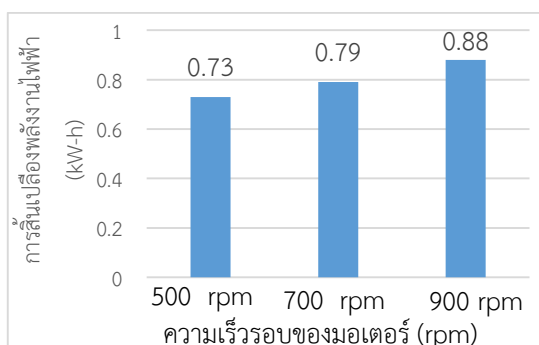
ทำการทดสอบความสามารถในการรีดไม้ฝั่ (จักตอก) เพอร์เซ็นต์การสูญเสียในการจักตอกและการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 700 และ 900 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 13-15



รูปที่ 13 ความสามารถในการรีดไม้ฝั่ (จักตอก)



รูปที่ 14 เปอร์เซนต์การสูญเสียในการรีดไม้ฝั่ (จักตอก)



รูปที่ 15 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 13-15 พบว่า ความสามารถในการรีดไม้ฝั่ (จักตอก) ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 รอบต่อนาที มีค่าเท่ากับ 5.51 เส้นต่อนาที เพอร์เซ็นต์การสูญเสียในการจักตอก 30.7 เปอร์เซนต์ การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.73 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เพิ่มความเร็วรอบเป็น 700 รอบต่อนาที ความสามารถในการรีดไม้ฝั่ (จักตอก) เท่ากับ 5.65 เส้นต่อนาที เพอร์เซ็นต์การสูญเสียในการจักตอก 26.4 เปอร์เซนต์ การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.79 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และความสามารถในการทำงานเพิ่มเป็น 5.83 เส้นต่อนาที เพอร์เซ็นต์การสูญเสียในการจักตอก 34.3 เปอร์เซนต์ การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.88 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบการทำงาน 900 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งที่ความเร็วรอบการทำงาน 900 รอบต่อนาที จะให้ความสามารถในการรีดไม้ฝั่ได้สูงสุด ที่ 5.83 เส้นต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบการจักตอกไม้ฝั่โดยใช้แรงงานคน ซึ่งมีความสามารถในการจักตอก 2.22 เส้นต่อนาที ดังนั้นการใช้เครื่องผ่าและรีดไม้ฝั่จะมีความสามารถในการจักตอกไม้ฝั่มากกว่าการใช้แรงงานคน ประมาณ 2.6 เท่า เมื่อพิจารณาเพอร์เซ็นต์การสูญเสียจากการจักตอก เปรียบเทียบกับการใช้แรงงานคนในการจักตอก พบว่า การใช้แรงงานคนในการจักตอกจะมีจำนวนตอกที่ไม่มีคุณภาพไม่สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์ได้เฉลี่ย 26 เปอร์เซนต์ ใกล้เคียงกับเพอร์เซ็นต์การสูญเสียจากการใช้เครื่องจักรที่ความเร็วรอบการทำงาน 700 รอบต่อนาที ดังนั้นการใช้เครื่องจักรช่วยในการทำงานจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทำงาน ทำให้ผลิตผลงานทางด้านหัตถกรรมได้มากขึ้น มีรายได้ในการจำหน่ายสินค้าได้มากขึ้นตามไปด้วย รูปที่ 16 แสดงการจักตอกด้วยเครื่อง



รูปที่ 16 การจักตอกไม้ฝั่ด้วยเครื่อง

#### 4.3 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่อง

จากผลการทดสอบเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่ที่ได้ ออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยใช้แรงงานคนปฏิบัติงาน 1 คน ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง 13,510 บาท การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวม 2.4 กิโลวัตต์-ชั่วโมง พิจารณาค่าไฟฟ้าหน่วยละ 4 บาท (อ้างอิงราคาจากการไฟฟ้านครหลวง) รวมค่าไฟฟ้า 9.6 บาทต่อชั่วโมง ค่าแรงงานในการควบคุมเครื่อง 50 บาทต่อชั่วโมง ค่าบำรุงรักษา 20 บาทต่อชั่วโมง ชั่วโมงการทำงานของเครื่อง 300 ชั่วโมงต่อปี ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่อง พบว่ามีค่าใช้จ่ายในการทำงาน 90.1 บาทต่อชั่วโมง จุดคุ้มทุนในการทำงาน 156 ชั่วโมงต่อปี มีระยะเวลาในการคืนทุน 2.5 ปี ถ้าเพิ่มชั่วโมงการทำงานต่อปีของเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่เป็น 500 และ 800 ชั่วโมงต่อปี จะมีระยะเวลาในการคืนทุนเป็น 1.4 ปี และ 0.8 ปีตามลำดับ

#### 5. สรุป

เครื่องต้นแบบเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสานขนาด ความกว้าง × ความยาว × ความสูง เท่ากับ 1,000×745×600 มิลลิเมตร โดยใช้ต้นก้างจากมอเตอร์ 1 เฟส 2 แรงม้า โดยมีส่วนประกอบหลัก 5 ส่วนคือ โครงสร้างเครื่อง ระบบต้นก้าง ระบบเฟือง โซลาล์เสีย และชุดใบมีด จากการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสาน พบว่าผลการทดสอบในขั้นตอนการผ่า มีความสามารถในการทำงาน 7.12 ท่อนต่อนาที หรือ 43 ชีกต่อนาที และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 1.62 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบในการทำงาน 1,500 รอบต่อนาที ผลการทดสอบในขั้นตอนการรีดหรือจักตอก ความสามารถในการทำงาน 5.65 เส้นต่อนาที เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย 26 เปอร์เซ็นต์ การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.79 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบในการทำงาน 700 รอบต่อนาที ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่อง พบว่ามีค่าใช้จ่ายในการทำงาน 90.1 บาทต่อชั่วโมง จุดคุ้มทุนในการทำงาน 156 ชั่วโมงต่อปี มีระยะเวลาในการคืนทุน 2.5 ปี

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนงบประมาณในการจัดสร้างสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bamboo History. (2011, Sept 11). Bamboo. [online]. Available: <http://jaklub.blogspot.com/2011/09/blog-post.html>
- [2] Bamboo and Livelihoods in Thailand (2014, August 14). Local knowledge and management. [online]. Available: <https://www.recoftc.org/sites/default/files>
- [3] Bamboo. (2009, November 22). Type of bamboo. [online]. Available: <https://vachirapilan.wordpress.com/2009/11>
- [4] T. Puangchick and B. Harakotr “A Survey, Collecting and Characterization of Natural Bamboo in Kanchanaburi Province, Thailand” *Journal of Science and Technology*, vol. 7, pp. 382-392, 2018.
- [5] Office of the National Economic and Social Development Council. (2017, March 1) The twelfth national economic and social development plan (2017-2021) [online]. Available: [https://www.nesdc.go.th/ewt\\_dl\\_link.php](https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php)
- [6] T. Kornpitak “A Bamboo Chopping Machine” *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, vol.7, no. 2, pp. 16-28, July-December 2014.

- [7] Tool for Splitting Bamboo. (2020, August 22) Bamboo [online]. Available:  
<https://www.pinterest.com>
- [8] Bamboo Slicing. (2019, January 24) Bamboo [online]. Available:  
<https://www.gotoknow.org/posts>
- [9] H. W. Beaty, *Hand Book of Electric Power Calculation*. New York: McGraw Hill, 1984.
- [10] A. W. Stonier, *A Text Book of Economic Theory*. New York: Longman 5<sup>th</sup> edition, 1980.
- [11] D. Humt, *Farm Power and Machinery Management*. Waveland Press, 2016.

## การพัฒนาและทดสอบเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง

## Development and Testing of Lotus Seeds Peeling Machine

จตุรงค์ ลังกาพินธุ์\*, สุนัน ปานสาคร, รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์, มาสสุภา โพธิ์รอด

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Jaturong Langkapin\*, Sunan Parnsakhorn, Roongruang Kalsirisilp, and Massupha Prorod

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of

Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

\*Corresponding author Email: jaturong.l@en.rmutt.ac.th

(Received: December 14, 2020; Accepted: March 26, 2021)

### บทคัดย่อ

ประเทศไทยได้สนับสนุนให้ปลูกบัวหลวงเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมซึ่งไม่สามารถปลูกพืชชนิดอื่นได้ เมล็ดบัวหลวงเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นสินค้าโอท็อปของจังหวัดที่มีการทำนาบัว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการออกแบบและสร้างเครื่องแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงเพื่อลดเวลาและแรงงานในการแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงสดของเกษตรกร เครื่องต้นแบบประกอบด้วย โครงสร้างเครื่อง ชุดใบมีดกรีด กลไกสก็อตโยค ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์เกียร์ขนาด 90 w เป็นต้นกำลัง การทำงานของเครื่องเริ่มจากผู้ควบคุมเครื่องป้อนเมล็ดบัวหลวงลงในช่องป้อนทางด้านบนของเครื่อง หลังจากนั้นเมล็ดบัวหลวงจะถูกลำเลียงเข้าไปในชุดใบมีดกรีดโดยการเคลื่อนที่ของกลไกสก็อตโยค ซึ่งชุดใบมีดกรีดทำหน้าที่กรีดตัดเปลือกตามแนวเส้นรอบวงของเมล็ดบัวหลวงและปล่อยให้เมล็ดบัวหลวงร่วงสู่ช่องทางออกทางด้านล่างของเครื่อง จากการทดสอบที่ความเร็วเฉลี่ยของชุดใบมีดกรีดที่ 6, 7 และ 8 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ พบว่าเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่ความเร็วเฉลี่ยของชุดใบมีดกรีด 7 m/min มีเปอร์เซ็นต์ในการแกะเมล็ดบัว 79% เมล็ดบัวไม่มีความเสียหาย มีความสามารถในการทำงาน 3.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และใช้พลังงานไฟฟ้า 0.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าเมื่อใช้เครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง 1,440 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 12.2 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุน 3.4 เดือน จุดคุ้มทุน 102.4 ชั่วโมงต่อปี และเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้เร็วกว่าแรงงานคนอย่างน้อย 2 เท่า

**คำสำคัญ:** การศึกษาและทดสอบ เครื่องแกะ เมล็ดบัวหลวง บัวหลวง

### ABSTRACT

Growing lotus has been promoted in Thailand particularly in flooded areas where other plants cannot be grown. Lotus seeds can be processed as OTOP product of the provinces with lotus planting areas. This research attempted to design and fabricate a prototype lotus seed shell peeling machine to minimize the time and labor requirement in the fresh lotus seed shell removal. This prototype peeler consists of the main frame, cutting blade unit, Scotch Yoke mechanism, the power transmission unit and a prime mover by 90w-gear-motor. The operation started with manually feeding

lotus seeds into chute at the top of machine. Then they were conveyed to blade unit to cut lotus peel in diametrical axis by Scotch Yoke mechanism, and finally seeds were released through outlet chute at the bottom. The results revealed that the average speed of blade 7 m/min worked well among the average speed of blades 6, 7 and 8 m/min respectively. The peeling percentage was 79% without any seed damage with working capacity of 3.6 kg/hr consuming 0.06 kW-hr of energy. An engineering economic analysis showed that it cost an average of THB 12.2 per kilogram at 1,440 hours per year with 3.4-month payback and 102.4 hours per year for break-even point. This prototype can work at least twice as fast as human labor.

**Keyword:** study and testing, peeling machine, lotus seed, lotus.

## 1. บทนำ

ต้นบัวหลวงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน ตั้งแต่ เหง้า ไหล ใบ ก้าน ดอก เมล็ด ตีบัว และเกสร อาจจะใช้ทำอาหาร เครื่องนุ่งห่ม หรือยารักษาโรค ซึ่งแต่ละส่วนของต้นบัวหลวงมีสรรพคุณแตกต่างกันไป เมล็ดบัวคือส่วนที่อยู่ในฝักบัว มีลักษณะกลมรี เนื้อในสีขาวอมเหลือง เมล็ดสดมีวิตามินซีสูง ส่วนเมล็ดแห้งมีส่วนประกอบหลักเป็นคาร์โบไฮเดรตกว่าร้อยละ 60 มีโปรตีนสูง นอกจากนั้นยังมีฟอสฟอรัส เหล็ก และมีแคลเซียมสูง ในตำราแพทย์แผนจีน เมล็ดบัวมีฤทธิ์เป็นกลาง ช่วยบำรุงเลือด บำรุงหัวใจ รวมถึงช่วยภายในร่างกาย ช่วยบำรุงข้อ [1], [2] และจากการศึกษายังพบว่าเมล็ดบัวมีสารกลุ่มอัลคาลอยด์ ฟาโวนอยด์ สารต้านอนุมูลอิสระ สารต้านสเตียรอยด์ สารต้านมะเร็ง สารต้านไวรัส และสารซาโปนินส์ฟีนอลิก [3]-[6] เนื่องจากบัวหลวงสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกพื้นที่ของประเทศไทย ปัจจุบันเกษตรกรจำนวนมากในหลายจังหวัดได้เปลี่ยนมายึดการปลูกบัวหลวงเป็นอาชีพหลัก โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขังไม่สามารถปลูกพืชชนิดอื่นได้ [7] อีกทั้งผลผลิตทั้งในรูปดอกตูมและเมล็ดยังเป็นที่ต้องการของทั้งในและต่างประเทศ [8]

นอกจากนั้นเมล็ดบัวหลวงแปรรูปยังเป็นสินค้าโอท็อปของหลายจังหวัดที่มีการทำบัว เช่น วิสาหกิจชุมชนกลุ่มสตรีบึงสีไฟ อ.เมือง จ.พิจิตร ผลิต “เมล็ดบัวอบ

กรอบ” บรรจุกล่องพลาสติกและตีบัวแคปซูลจำหน่าย ซึ่งมียอดขายเฉลี่ยแต่ละปีกว่า 1.2 ล้านบาท [9]



ก) การใช้มีดกรีดรอบเมล็ดบัว



ข) การใช้มือแกะเปลือกออก

รูปที่ 1 การแกะเมล็ดบัวหลวงด้วยแรงงานคน [10]

สำหรับขั้นตอนการเก็บเมล็ดบัวหลวงสดเพื่อแปรรูปในปัจจุบัน เกษตรกรจะเก็บฝักบัวแล้วนำมาแกะเอาเมล็ดออกจากฝัก จากนั้นใช้มีดกรีดรอบเมล็ดบัว แล้วใช้มือแกะเปลือกออก (รูปที่ 1) ลอกเยื่อและแท่งตีบัวออกเตรียมที่จะแปรรูปต่อไป จะเห็นว่าขั้นตอนการแกะเอาเปลือกออกยังใช้แรงงานคนเป็นหลัก ใช้เวลาในการแกะสูง และเสี่ยงต่อการถูกมีดบาด ส่วนเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงที่มีใช้ในประเทศต่าง เช่นในประเทศจีนนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้แกะเมล็ดบัวพันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยเนื่องจากเมล็ดบัวมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน เครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดที่ควรนำมาพัฒนาต่อไป เช่น เครื่องมีขนาดใหญ่ อัตราการทำงานค่อนข้างต่ำ [10], [11] ดังนั้นจึงควรทำการวิจัยเพื่อ

พัฒนาเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นและมีขนาดกะทัดรัด

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ

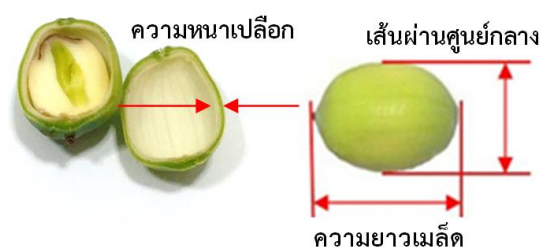
ก) ศึกษาปัญหาในขั้นตอนการแกะเมล็ดบัวหลวงในปัจจุบัน

การศึกษาในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบข้อมูลและปัญหาการแกะเมล็ดบัวหลวงของเกษตรกร รวมทั้งหาข้อมูลที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยการสัมภาษณ์วิสาหกิจชุมชนกลุ่มสตรีสหกรณ์บึงสีไฟ อ.เมือง จ.พิจิตร พบว่า แรงงานในกระบวนการผลิตมาจากแรงงานของกลุ่มสหกรณ์ในชุมชน ซึ่งมีสมาชิกประมาณ 30 คน วัตถุประสงค์มาจากแหล่งปลูกในท้องถิ่น บางช่วงในกรณีตลาดมีความต้องการสูงจะหาวัตถุดิบเพิ่มจากแหล่งอื่นเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ มีกำลังผลิตเมล็ดบัวอบกรอบโดยเฉลี่ย 1,000 กิโลกรัมต่อเดือน ปกติจะทำการผลิตต่อเนื่องทุกวัน ค่าแรงงานประมาณ 300-350 บาทต่อวัน ปัญหาในกระบวนการผลิตที่พบ คือ เนื่องจากกระบวนการผลิตใช้แรงงานคนเป็นหลัก ในช่วงที่ต้องการผลผลิตสูงแรงงานในการผลิตไม่เพียงพอ การทำงานมีความเหนื่อยยากและไม่ปลอดภัย เช่น อุบัติเหตุจากมีดแกะเปลือกบาดมือ นอกจากนั้นยังขาดแคลนเครื่องจักรสำหรับช่วยในการผลิต เช่น เครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง เครื่องทอดอัตโนมัติ เป็นต้น รวมทั้งต้องการพัฒนารูปแบบของบรรจุภัณฑ์ให้น่าสนใจมากขึ้น [10]

ข) การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวง

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในหัวข้อนี้เพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวงสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบชุดใบมีดและการปรับตั้งต่างๆ ที่จำเป็นในการออกแบบเครื่อง ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของเมล็ดบัวหลวง และความหนาของเปลือกเมล็ดบัวหลวง ดังรูปที่ 2 จากการศึกษาโดยสุ่มวัดเมล็ดบัวหลวงจำนวน 100 เมล็ด ด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ (ยี่ห้อ

Mitutoyo รุ่น 530-118 ผลิตจากประเทศญี่ปุ่น) พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดบัวหลวงมีค่าระหว่าง 13-15 mm มีค่าเฉลี่ย  $14.6 \pm 0.6$  mm ความยาวมีค่าระหว่าง 20-22 mm มีค่าเฉลี่ย  $21.3 \pm 0.8$  mm และความหนาของเปลือกมีค่าระหว่าง 0.9-1.2 mm มีค่าเฉลี่ย  $1.1 \pm 0.2$  mm ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเมล็ดบัวหลวงได้ถูกนำไปใช้ออกแบบความกว้างและความสูงของช่องป้อนเมล็ดบัวหลวงของชุดใบมีดกรีด ส่วนความหนาของเปลือกใช้กำหนดความลึกในการตัดของใบมีดกรีด [10]



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวง

ค) การศึกษากลไกที่เหมาะสมสำหรับการแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวง

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาวิธีการแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงที่ไม่ทำให้เมล็ดบัวเสียหาย โดยการสร้างชุดทดสอบประกอบด้วย โครงสร้างเครื่อง ชุดใบมีดกรีด กลไกสก็อตช์โยค (Scotch Yoke) และระบบส่งกำลัง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/4 แรงม้า เป็นต้นกำลัง จากการทดสอบพบว่าหลักการนี้ไม่ทำให้เมล็ดบัวเสียหาย สามารถป้อนเมล็ดให้เครื่องแกะทำงานได้อย่างเนื่อง ความเร็วเฉลี่ยของชุดมีดกรีดที่ทำงานได้ระหว่าง 7.5- 9.5 m/min มีความสามารถในการทำงาน 2 kg/hr และมีเปอร์เซ็นต์ในการแกะเมล็ดบัว 79% [10] จึงได้นำหลักการของเครื่องนี้ไปออกแบบเครื่องที่ต้องการจะพัฒนาต่อไป

## 2.2 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

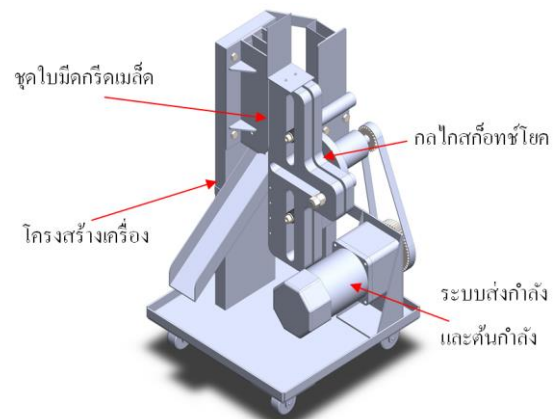
เครื่องแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบตามหัวข้อข้างต้นและมีเกณฑ์ในการออกแบบ ดังต่อไปนี้

- แกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงสำหรับบัวพันธุ์ที่นิยมปลูกภายในประเทศ
- กลไกการทำงานของเครื่องไม่ซับซ้อนมากเกินไป ผู้ปฏิบัติงานสามารถปฏิบัติได้สะดวก และมีความปลอดภัย
- โรงงานเครื่องจักรกลเกษตรทั่วไปสามารถนำไปผลิตได้ และซ่อมแซมบำรุงรักษาง่าย
- ชิ้นส่วนมาตรฐานหากชำรุด สามารถถอดเปลี่ยนได้ง่าย และมีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด
- ใช้ผู้ปฏิบัติงาน 1 คน

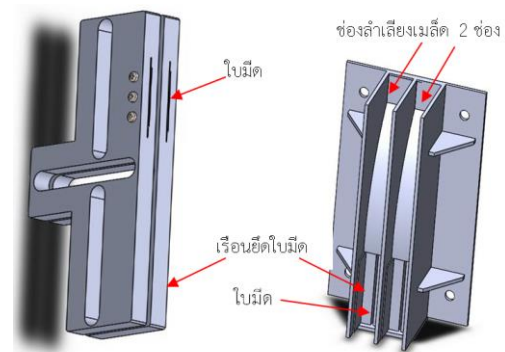
นอกจากนั้นยังได้ประยุกต์ใช้ความรู้และหลักการออกแบบเครื่องจักรกลและเครื่องจักรกลเกษตร [12], [13] รวมทั้งใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและเขียนแบบ [14] ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังรูปที่ 3 (ก) ประกอบด้วย โครงสร้างหลัก ชุดใบมีดกรีดเมล็ด กลไกสก๊อตทโยค (Scotch Yoke) ระบบส่งกำลัง และมอเตอร์เกียร์เป็นต้นกำลัง มีรายละเอียด ดังนี้

1) โครงสร้างเครื่อง สร้างจากสเตนเลสเชื่อมประกอบกันขนาด 346x346x520 mm (กว้างxยาวxสูง) ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องต้นแบบ โดยอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องต้นแบบจะถูกยึดประกอบเข้ากับโครงสร้างด้วยนอตและสกรูจำนวนหนึ่ง

2) ชุดใบมีดกรีดเมล็ด ทำหน้าที่กรีดเปลือกโดยรอบเมล็ดบัวหลวง ประกอบด้วยใบมีด 2 ชุด ใบมีดชุดแรกยึดอยู่กับที่ในเรือนใบมีดที่ติดตั้งกับโครงสร้างเครื่อง ส่วนใบมีดชุดที่ 2 จะเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และถูกยึดติดกับกลไกสก๊อตทโยค โดยเรือนยึดใบมีดทำจากแผ่นชุบเปอร์สีนไนลอนที่มีการเจาะรูตรงกลางเพื่อติดตั้งใบมีด และเป็นช่องสำหรับให้เมล็ดบัวหลวงกลิ้ง ซึ่งขนาดที่ได้ออกแบบไว้จะเป็นขนาดที่ใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ที่สุดของ



ก) แบบเครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรมด้าน CAD



ข) ส่วนประกอบของชุดใบมีดกรีดเมล็ด



ค) เครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงต้นแบบ

รูปที่ 3 แบบและเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงต้นแบบ

เมล็ดบัวหลวงเพื่อให้สามารถใช้กับเมล็ดบัวได้ทุกขนาด ด้านบนของชุดใบมีดจะมีช่องป้อนเมล็ดจำนวน 2 ช่องทำจากแผ่นสแตนเลส และมีแผ่นรองในช่องลำเลียงเพิ่มความลาดเอียงเพื่อให้เมล็ดบัวนั้นได้ไหลลงชุดใบมีดกรีดโดยไม่ติดขัดดังรูปที่ 3 (ข)

สำหรับการเปลี่ยนใบมีดกรีดเมล็ดชุดแรกที่ยึดติดกับเรือนใบมีดนั้นต้องถอดเรือนใบมีดออกจากโครงสร้างเครื่องก่อนจึงจะทำการเปลี่ยนใบมีดได้ และสามารถเปลี่ยนใบมีดกรีดเมล็ดชุดที่สองไปพร้อมกับชุดแรกโดยไม่ต้องถอดกลไกสกรูทโยคออกจากโครงสร้างเครื่อง

3) กลไกควบคุมการทำงานสกรูทโยค ถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลง โดยในจังหวะเคลื่อนที่ขึ้นจะดันและเรียงเมล็ดบัวให้เข้าสู่ช่องป้อนที่ละเมล็ด ส่วนในจังหวะลงจะกรีดเปลือกและพาเมล็ดบัวกลิ้งเข้าไปแกะเปลือกในชุดใบมีดกรีด กลไกสกรูทโยคทำจากแผ่นชุบเปอร์ลินไนลอน โดยระยะการเคลื่อนที่ของกลไกจะมากกว่าความยาวของเส้นรอบวงของเมล็ดบัวหลวงที่โตที่สุดเพื่อให้เมล็ดบัวกลิ้งกรีดกับใบมีดได้รอบเมล็ด

4) ระบบส่งกำลังและต้นกำลัง การส่งกำลังไปยังส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องต้นแบบ จะใช้ล้อฟันและสายพาน เนื่องจากออกแบบง่าย ไม่เกิดเสียงดังขณะทำงาน และหาซื้อง่าย ใช้มอเตอร์เกียร์ขนาด 90 w (10) เป็นต้นกำลัง

หลักการทำงานของเครื่องเริ่มจากการป้อนเมล็ดบัวหลวงลงในช่องป้อนเมล็ดทางด้านบนของเครื่อง หลังจากนั้นเมล็ดบัวหลวงจะถูกลำเลียงเข้าไปในชุดใบมีดกรีดโดยการเคลื่อนที่ของกลไกสกรูทโยค ซึ่งใบมีดที่ติดกับเรือนใบมีดและกลไกสกรูทโยคจะทำหน้าที่กรีดตัดเปลือกตามแนวเส้นรอบวงของเมล็ดบัวหลวง และปล่อยให้เมล็ดบัวหลวงร่วงสู่ช่องทางออกทางด้านล่างของเครื่อง ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้างเสร็จแสดงดังรูปที่ 3(ค) และปัจจุบันเครื่องต้นแบบได้รับการจดอนุสิทธิบัตรจากกรมทรัพย์สินทางปัญญาเรียบร้อยแล้ว (เลขที่อนุสิทธิบัตร 14104)

### 2.3 ทดสอบและประเมินสมรรถนะเครื่องต้นแบบ

หลังจากที่เครื่องต้นแบบได้ถูกปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องแล้ว จึงได้ทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่อง รวมทั้งหาคุณภาพในการแกะเมล็ดบัวหลวงโดยค่าชี้ผลการศึกษาที่ใช้ คือ เปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ดบัว เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด ความสามารถในการทำงาน และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ดบัวหลวง คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$C_t = \frac{W_1}{W} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $C_t$  = เปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ดบัว (%)

$W_1$  = น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่แกะเปลือกได้ (kg)

$W$  = น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงทั้งหมด (kg)

2. เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$D_g = \frac{W_2}{W} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ  $D_g$  = เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด (%)

$W_2$  = น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่เสียหาย (kg)

3. ความสามารถในการทำงาน คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$C_a = \frac{W_1}{T} \quad (3)$$

เมื่อ  $C_a$  = ความสามารถในการทำงานจริง (kg/hr)

$T$  = เวลาในการทำงานทั้งหมด (hr)

4. การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$P = \frac{IVt}{1000} \quad (4)$$

เมื่อ  $P$  = การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kW-hr)

$I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

$V$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

$t$  = เวลา (ชั่วโมง)

ตลอดการทดสอบใช้เมล็ดบัวหลวงปทุมที่ผ่านการคัดขนาดด้วยแรงงานคน เส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดบัวหลวงมีค่าระหว่าง 12.25-15.5 mm มีค่าเฉลี่ย  $14.6 \pm 0.5$  mm ความยาวมีค่าระหว่าง 19.8-22 mm มีค่าเฉลี่ย  $21.6 \pm 0.65$  mm และความหนาของเปลือกมีค่าระหว่าง 0.9-1.2 mm มีค่าเฉลี่ย  $1.1 \pm 0.13$  mm (สุ่มวัด 50 เมล็ด) จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าเมื่อเดินเครื่องที่ความเร็วเฉลี่ยของชุดใบมีดกรีดที่ยึดติดกับกลไกสกรูทโยมากกว่า 8 เมตรต่อนาที ชุดใบมีดจะเคลื่อนที่เร็วเกินไปไม่สามารถทำให้เมล็ดบัวหลวงหมุนกลิ้งในเรือนใบมีดเพื่อให้เปลือกถูกตัดเฉือนครบรอบตามเส้นรอบวงได้ ดังนั้นจึงเลือกทดสอบที่ความเร็วเฉลี่ยของชุดใบมีดกรีดที่ 6, 7 และ 8 เมตรต่อนาที ตามลำดับ และใช้ใบมีด 2 แบบ คือ ใบมีดคัตเตอร์ (มีดที่เกษตรกรนิยมใช้แกะเปลือกเมล็ดบัวในปัจจุบัน) และ ใบมีดสเตนเลส (ใบมีดที่มีจำหน่ายทั่วไป) โดยแต่ละการทดลองใช้เมล็ดบัวหลวง 0.5 kg (จำนวนเมล็ดระหว่าง 65-80 เมล็ด ขึ้นอยู่กับขนาดของเมล็ดบัว) และป้อนเมล็ดบัวทั้งหมดลงในถังป้อนครั้งเดียวทำการทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำ โดยแต่ละการทดสอบบันทึกเวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด น้ำหนักเมล็ดบัวที่แกะได้น้ำหนักเมล็ดบัวที่แกะไม่ได้ น้ำหนักเมล็ดบัวที่เสียหาย กระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้า หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95 % (One-way Analysis of Variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย

ตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

#### 2.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

##### ก) การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย

วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมเกี่ยวกับต้นทุนในการใช้งานเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง สมมติว่าเกษตรกรซื้อเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงแทนวิธีการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วยต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) โดยต้นทุนคงที่ได้แก่ ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงได้ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดอัตราดอกเบี้ย 10 %) ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการแกะเมล็ดบัวหลวง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จะไม่คิดต้นทุนคงที่เกี่ยวกับค่าประกันภัย ค่าภาษี ค่าโรงเรือน และค่าจ้างขนย้ายเครื่องไปทำงานตามสถานที่ต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับต้นทุนผันแปรซึ่งเป็นต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการแกะเมล็ดบัวหลวง ได้แก่ ค่าจ้างแรงงานคนเพื่อทำงานร่วมกับเครื่อง ค่าไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษาและค่าซ่อมแซม เป็นต้น [15]

##### ข) การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Pay-Back Period)

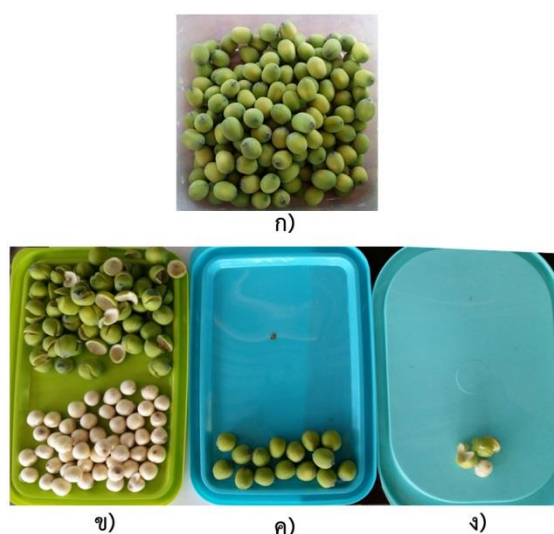
เป็นการคาดคะเนว่า เมื่อลงทุนใช้เครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงไปแล้ว จะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปแล้วภายในระยะเวลากี่ปี โดยคิดจากราคาในการลงทุนซื้อเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงหารกับผลประโยชน์สุทธิที่คาดว่าจะได้รับในการใช้งานเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง 5 ปี [15]

##### ค) การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-Even Point)

เป็นการคำนวณหาจุดคุ้มทุนในการใช้เครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงต้นแบบ โดยการเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนในการแกะเมล็ดบัวหลวงจากการใช้เครื่องต้นแบบและการแกะเมล็ดบัวหลวงด้วยแรงงานคน [15]

### 3. ผลการวิจัย

การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงได้ใช้เมล็ดบัวหลวงสดดังรูปที่ 4 (ก) หลังจากการทดสอบแล้วจะได้เมล็ดบัวหลวงที่ถูกชุดใบมีดกรีดเปลือกโดยรอบเมล็ด ดังรูปที่ 4 (ข) ผู้ควบคุมเครื่องสามารถที่จะใช้มือดึงเมล็ดในออกจากเปลือกได้โดยง่าย ซึ่งเมล็ดในของบัวหลวงที่ได้พร้อมที่จะนำไปแปรรูปผลิตเป็นเมล็ดบัวอบกรอบต่อไป สำหรับรูปที่ 4 (ค) คือเมล็ดบัวที่เครื่องไม่สามารถจะแกะเปลือกออกได้เนื่องจากเมล็ดมีขนาดเล็กกว่าเมล็ดบัวส่วนใหญ่ที่แกะเปลือกออกได้ ซึ่งการจะแกะเมล็ดบัวกลุ่มนี้ต้องทำการปรับตั้งระยะของใบมีดใหม่ ส่วนรูปที่ 4 (ง) คือเมล็ดบัวหลวงที่เสียหายจากการทดสอบ ซึ่งเมล็ดบัวที่เสียหายจากการทดสอบนี้พิจารณาจากเมล็ดบัวที่มีรอยแตกเสียหายทุกๆ แบบจากเมล็ดเต็ม



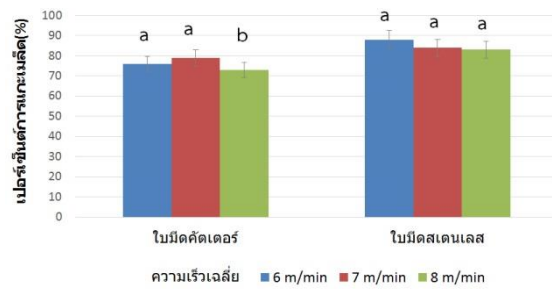
รูปที่ 4 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง: ก) เมล็ดบัวหลวงที่ใช้ทดสอบ ข) เมล็ดบัวหลวงที่ได้จากการทดสอบ ค) เมล็ดบัวหลวงที่แกะไม่ได้ และ ง) เมล็ดบัวหลวงที่เสียหาย

ผลการทดสอบเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงที่ชนิดของใบมีดและความเร็วเฉลี่ยของชุดมีดใบมีดต่างๆ จะนำเสนอตามคำชี้ผลการศึกษาดังนี้

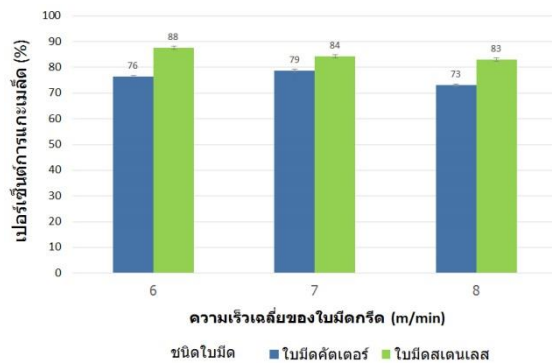
#### 3.1 เปรียบเทียบการแกะเมล็ด

จากการทดสอบเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงที่ชนิดของใบมีดและที่ความเร็วของชุดใบมีดกรีดต่างๆ พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถแกะเมล็ดบัวหลวงได้ระหว่าง 73-88% จากการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ดมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ใบมีดคัตเตอร์ของแต่ละกลุ่มความเร็วที่ใช้ทดสอบ แต่เปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในการทดสอบโดยใบมีดสแตนเลสของแต่ละกลุ่มความเร็วที่ใช้ทดสอบ ดังรูปที่ 5 ซึ่งผลการทดสอบโดยใช้ใบมีดทั้งสองแบบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ดบัวหลวงจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วของชุดใบมีดกรีด โดยเฉพาะที่ความเร็ว 8 m/min เปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ดจะมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากการที่ชุดใบมีดที่ยึดติดกับกลไกสกรูที่โยกเคลื่อนที่เร็วขึ้นลักษณะการตัดเฉือนของใบมีดจะเป็นการเฉือนมากกว่าการเฉือนที่ทำให้เมล็ดบัวหลวงหมุนลื่นไปติดกับใบมีดอีกชุดที่ติดตั้งในเรือนใบมีด เป็นเหตุทำให้ใบมีดไม่สามารถตัดเฉือนเปลือกได้ครบรอบตามเส้นรอบวงของเมล็ด สำหรับเมล็ดบัวที่ตัดเปลือกได้ไม่ครบรอบและไม่มีความเสียหายขณะการทดสอบสามารถปรับตั้งระยะของใบมีดใหม่แล้วนำกลับมาป้อนเข้าเครื่องซ้ำได้จนกว่าใบมีดจะกรีดจนรอบเมล็ดและแกะเอาเปลือกออกได้

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ดโดยใช้ใบมีดทั้งสองแบบที่ความเร็วของชุดใบมีดกรีดต่างๆ ดังรูปที่ 6 พบว่าทุกๆ ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ ใบมีดสแตนเลสจะแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงได้ดีกว่าใบมีดคัตเตอร์ โดยใบมีดสแตนเลสสามารถแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงได้ระหว่าง 83-88% ส่วนใบมีดคัตเตอร์แกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงได้ระหว่าง 73-79% ซึ่งการจะพิจารณาว่าใบมีดและความเร็วของชุดใบมีดกรีดใดเหมาะสมที่สุดต้องใช้เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ดและความสามารถในการทำงานของเครื่องประกอบการพิจารณาด้วย โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 5 เปอร์เซนต์การแกละเมล็ดบัวหลวงที่ชนิดของใบมีดและความเร็วของชุดใบมีดกรีดต่างๆ (<sup>a,b</sup> อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าเปอร์เซนต์การแกละเมล็ดมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

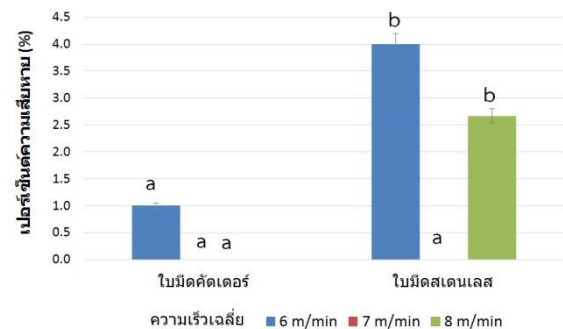


รูปที่ 6 เปอร์เซนต์การแกละเมล็ดบัวหลวงที่ความเร็วของชุดใบมีดกรีดและชนิดของใบมีดต่างๆ

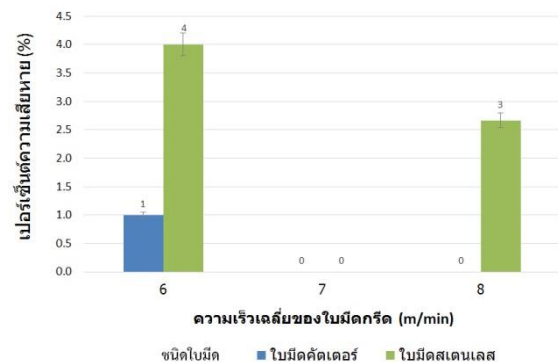
### 3.2 เปอร์เซนต์ความเสียหายของเมล็ดบัว

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซนต์ความเสียหายของเมล็ดบัวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ใบมีดตัดเตอร์ของแต่ละกลุ่มความเร็วที่ใช้ทดสอบ แต่เปอร์เซนต์ความเสียหายของเมล็ดบัวมีความแตกต่างกันทางสถิติในการทดสอบโดยใบมีดสแตนเลสของแต่ละกลุ่มความเร็วที่ใช้ทดสอบ ซึ่งใบมีดตัดเตอร์มีเปอร์เซนต์ความเสียหายระหว่าง 0-1% ส่วนใบมีดสแตนเลสมีเปอร์เซนต์ความเสียหายระหว่าง 0-4% และเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซนต์ความเสียหายของเมล็ดบัวโดยใช้ใบมีดทั้งสองแบบที่ความเร็วของชุดใบมีดกรีดต่างๆ ดังรูปที่ 8 พบว่าที่ความเร็วเฉลี่ยของชุดใบมีดกรีด 6 และ 8 m/min ใบมีด

สแตนเลสมีเปอร์เซนต์ความเสียหายสูงกว่าใบมีดตัดเตอร์ แต่ที่ความเร็ว 7 m/min เป็นความเร็วที่ทำให้แรงเฉือนของทั้งสองใบมีดไม่ทำให้เมล็ดบัวแตกเสียหาย



รูปที่ 7 เปอร์เซนต์ความเสียหายของเมล็ดบัวหลวงที่ชนิดของใบมีดและความเร็วของชุดใบมีดกรีดต่างๆ (<sup>a,b</sup> อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าเปอร์เซนต์ความเสียหายมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)



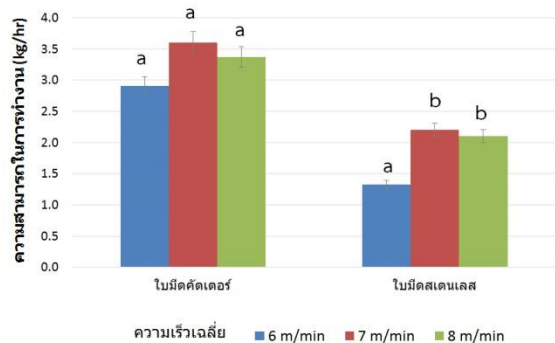
รูปที่ 8 เปอร์เซนต์ความเสียหายของเมล็ดบัวหลวงที่ความเร็วของชุดใบมีดกรีดและชนิดของใบมีดต่างๆ

### 3.3 ความสามารถในการทำงานของเครื่อง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการทำงานของเครื่องไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ใบมีดตัดเตอร์ของแต่ละกลุ่มความเร็วที่ใช้ทดสอบ แต่ความสามารถในการทำงานของเครื่องมีความแตกต่างกัน

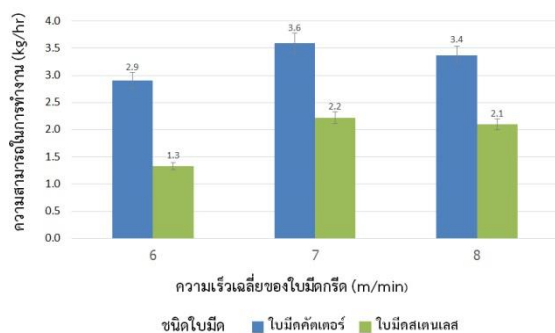
ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564

ทางสถิติในการทดสอบโดยไบนิตสเดนเลสของแต่ละกลุ่ม  
ความเร็วที่ใช้ทดสอบดังรูปที่ 9



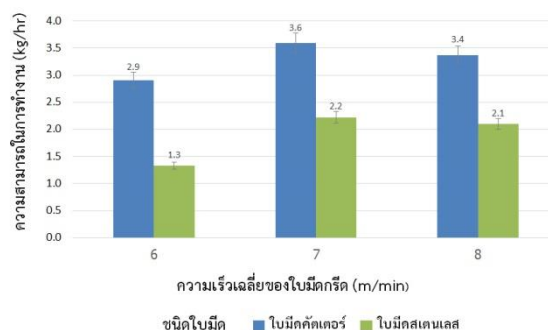
รูปที่ 9 ความสามารถในการทำงานที่ชนิดของไบนิตและ  
ความเร็วของชุดไบนิตกริตต่างๆ (<sup>ab</sup> อักษรที่แตกต่างกันใน  
แต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าความสามารถในการทำงานมี  
ความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าทุกๆ  
ความเร็วเฉลี่ยของชุดไบนิตกริต เครื่องต้นแบบที่ใช้  
ไบนิตคัตเตอร์สามารถแกะเมล็ดบัวหลวงได้เร็วกว่าไบนิต  
เดนเลส เนื่องจากลักษณะของไบนิตคัตเตอร์ที่บางและคม  
กว่าไบนิตเดนเลส ซึ่งไบนิตคัตเตอร์มีความสามารถในการ  
ทำงานระหว่าง 2.9-3.6 kg/hr ส่วนไบนิตเดนเลสมี  
ความสามารถในการทำงานระหว่าง 1.3-2.2 kg/hr



รูปที่ 10 ความสามารถในการทำงานที่ความเร็วของชุด  
ไบนิตกริตและชนิดของไบนิตต่างๆ

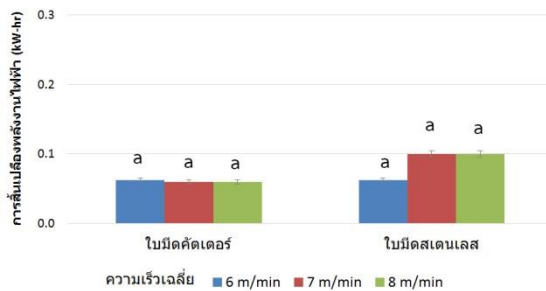
จากผลการทดสอบโดยพิจารณาจากความสามารถใน  
การทำงานของเครื่อง รวมทั้งเปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ด  
และเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด พบว่าการใช้  
ไบนิตคัตเตอร์ที่ความเร็วเฉลี่ยของชุดไบนิตกริต 7 m/min  
มีความสามารถในการทำงานสูงที่สุด สามารถแกะเปลือก  
เมล็ดบัวหลวงได้ 79% และไม่มีเมล็ดบัวแตกเสียหาย  
ดังนั้นจึงได้เลือกค่านี้ไปใช้ในการวิเคราะห์เชิง  
เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมต่อไป ซึ่งมีความสามารถในการ  
ทำงานเท่ากับ  $3.6 \pm 0.1$  kg/hr



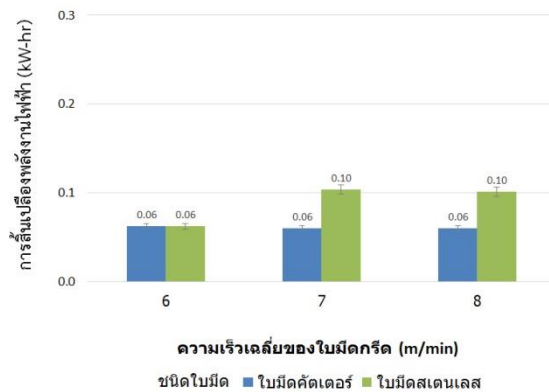
รูปที่ 10 ความสามารถในการทำงานที่ความเร็วของชุด  
ไบนิตกริตและชนิดของไบนิตต่างๆ

### 3.4 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังรูปที่ 11 แสดงให้เห็น  
ว่า การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของเครื่องไม่มีความ  
แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบ  
โดยใช้ไบนิตคัตเตอร์และไบนิตสเดนเลสของแต่ละกลุ่ม  
ความเร็วที่ใช้ทดสอบ จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าช่วง  
ความเร็วที่ใช้ชุดไบนิตกริตทั้งสามความเร็ว มีการใช้  
พลังงานไฟฟ้าระหว่าง 0.06-0.10 kW-hr ซึ่งจะนำค่าการ  
ใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ขับที่ทำให้ชุดไบนิตกริตมี  
ความเร็วเฉลี่ย 7 m/min และใช้ไบนิตคัตเตอร์ เท่ากับ  
0.06 kW-hr ไปเป็นค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์เชิง  
เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมต่อไป



รูปที่ 11 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ชนิดของใบมีดและความเร็วของชุดใบมีดกรีดต่างๆ (<sup>ab</sup> อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)



รูปที่ 12 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วของชุดใบมีดกรีดและชนิดของใบมีดต่างๆ

### 3.5 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดราคาเครื่องต้นแบบ 20,000 บาท อายุการใช้งาน 5 ปี อัตราดอกเบี้ย 10% ใช้ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน ความสามารถในการทำงาน  $3.6 \pm 0.1$  kg/hr ใช้พลังงานไฟฟ้า 0.06 kW-hr เมื่อใช้เครื่องต้นแบบทำงาน 6 เดือน หรือ 1,440 ชั่วโมงต่อปี (ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง) จะได้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 12.2 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุน 3.4 เดือน จุดคุ้มทุน 102.4 ชั่วโมงต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับแรงงานคน 1 คน ที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการแกะเปลือกเมล็ดบัว 25 บาทต่อกิโลกรัม

## 4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงโดยใช้ค่าชี้ผลการศึกษา คือ เปอร์เซ็นต์การแกะเมล็ดบัว เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด ความสามารถในการทำงาน และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า พบว่าเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่ความเร็วเฉลี่ยของชุดใบมีดกรีด 7 m/min โดยใช้ใบมีดคัตเตอร์เป็นใบมีดกรีด มีเปอร์เซ็นต์ในการแกะเมล็ดบัว 79% เมล็ดบัวไม่มีความเสียหาย มีความสามารถในการทำงาน  $3.6 \pm 0.1$  kg/hr และใช้พลังงานไฟฟ้า 0.06 kW-hr ซึ่งเครื่องต้นแบบที่ได้มีขนาดกะทัดรัดตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย มีอัตราการทำงานสูงกว่าเครื่องรุ่นเก่า [10] และควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบเครื่องระยะยาวเพื่อหาอายุการใช้งานของใบมีดกรีดเพื่อให้มีข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้นในการนำเครื่องต้นแบบไปใช้ทดแทนแรงงานคนได้ในอนาคตต่อไป

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปีของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Suksawat. (2018, April 23). 7 benefits of Thai grains [Online]. Available: <http://www.tnews.co.th/contents>
- [2] R. S. Jolly. (2019, January 25). Benefits of the lotus plant [Online]. Available: <https://caloriebee.com/nutrition/Health-Benefits-of-Lotus-Roots-or-Stem-Seeds-Leaves-and-Flowers>
- [3] K.R. Sridhar and R. Bhat, "Lotus A potential nutraceutical source," *Journal of Agricultural Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 143-55, 2007.

- [4] S. Rai, A. Wahile, K. Mukherjee, B. P. Saha, P. K. Mukherjee, “Antioxidant activity of *Nelumbo nucifera* (sacred lotus) seeds,” *Journal of Ethnopharmacology*, pp.104:3227, 2006.
- [5] YB. Wu, LJ. Zheng, J. Yi, JG. Wu, CJ. Tan and TQ. Chen, “A comparative study on antioxidant activity of ten different parts of *Nelumbo nucifera* Gaertn,” *Afr.J. Pharm. Pharmacol*, vol. 5, pp. 2454–246, 2011.
- [6] ZQ. Ling, BJ. Xie and EL. Yang “Isolation characterization and determination of antioxidative activity of oligomeric procyanidins from the seedpod of *Nelumbo nucifera* Gaertn,” *J Agric Food Chem*, vol. 53, no. 7, pp. 2441-5, 2005.
- [7] Department of Agriculture Extension. (2017, May 16). Lotus production situation [Online]. Available: <http://www.doae.go.th/LIBRARY>
- [8] T. Suwannaro, *Lotus farming*. Extension and Training Office. Bangkok: Kasetsart University, 2007.
- [9] P. Vjittwittayapong. (2013, Feb 13). Lotus seeds product of Phichit [Online]. Available: [http://www.matichon.co.th/matichon/view\\_news](http://www.matichon.co.th/matichon/view_news)
- [10] J. Langkapin, S. Parnsakhorn, R. Kalsirisilp, M. Prorod, and N. Khotpromsrt, “Study and testing of a lotus seed peeling machine,” *Journal of Engineering RMUTT*, vol.1, pp.35-42, 2018.
- [11] J. Langkapin, S. Parnsakhorn, R. Kalsirisilp, G. Samseemoung, P. Ngmanil, and T. Juey, “Design and fabrication of a lotus seed membrane peeling machine,” *Journal of Engineering RMUTT*, vol.1, pp. 127-137. 2019.
- [12] G. Krutz, L. Thomson and P. Claar, *Design of agricultural machinery*. 1st ed. New York: John Wiley and Sons, 1994.
- [13] JE. Shigley, and CR. Mischke, *Mechanical engineering design*. 5th ed. USA: McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [14] J. Langkapin, *Engineering Drawing and Design by Solidworks*. 3rd ed. Bangkok: Triple Education Co., Ltd, 2018. (in Thai)
- [15] D. Hunt, *Farm power and machinery*. 10th ed. Iowa, USA: Iowa State University Press, 2001.

## ทบทวนการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ลิเทียมสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า Review Thermal Management System of Battery for Electrical Vehicles

สรารวุฒิ สิริเกษมสุข สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาล นามผล\*

ห้องปฏิบัติการเทอร์โม-ของไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TFHT),

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

Sarawut Sirikasemsuk Songkran Wiriyasart Paisarn Naphon

Thermo-Fluid and Heat Transfer Enhancement Lab. (TFHT)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,

63 Rangsit-Nakhornnayok Rd., Ongkharak, Nakornnayok, 26120 Thailand.

\*Corresponding author Email: paisarnn@swu.ac.th

(Received: April 30, 2020; Accepted: March 25, 2021)

### บทคัดย่อ

แบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงานที่สำคัญสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะสูงขึ้นเมื่อมีการรักษาอุณหภูมิขณะใช้งานให้อยู่ในช่วงการใช้งานที่ 15 - 40 องศาเซลเซียส โดยความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่นั้นมาจากการใช้งาน การอัดประจุกลับ การถูกกระทำทางกายภาพเช่นการอัด บด ทิ่มแทงจากอุบัติเหตุ รวมถึงปัญหาทางระบบไฟฟ้า-เคมีของแบตเตอรี่ ปัญหาทางความร้อนนี้หากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจส่งผลให้แบตเตอรี่เกิดการระเบิดจากปรากฏการณ์เทอร์โมลรันอเวย์ ดังนั้นการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นนั้นจึงมีความสำคัญ และได้มีการศึกษาการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการออกแบบระบบระบายความร้อนแบบต่างๆ เช่น โดยการใช้อากาศ ของเหลว รวมถึงการใช้ระบบผสมระหว่างอากาศร่วมกับของเหลวเป็นสารหล่อเย็น ซึ่งระบบการหล่อเย็นจะมีรูปแบบหรือลักษณะแตกต่างกัน ผลที่ได้ระบบหล่อเย็นโดยใช้ของเหลวเป็นสารหล่อเย็นมีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามระบบระบายความร้อนทั้ง 3 แบบนั้นสามารถรักษาอุณหภูมิให้อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 40 องศาเซลเซียสได้ และสามารถนำระบบที่ปรับปรุงไปใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มความปลอดภัยได้อีกด้วย

**คำสำคัญ:** เทอร์โมลรันอเวย์ ยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ลิเทียม การจัดการความร้อนในแบตเตอรี่

### ABSTRACT

At the present, batteries are essential energy storage for electrical vehicles. The efficiency and lifetime of the battery can be extended by keeping the working temperature about 15°C - 40°C. The generated heat inside the batteries can be generated by the charging, discharging, physical actions such as compression crushing or piercing from an accident including the electrical-chemical system problems of the battery. The thermal problem, the high temperature causes the battery overheating and explosion due to the thermal runaway phenomenon. Therefore, the thermal management systems are

essential for cooling the battery system, and have been designed with different cooling techniques; air, liquid, and hybrid coolants. From the review process, it is found that the cooling technique with liquid as coolant gives the highest thermal efficiency. However, the operating temperatures obtained from three cooling techniques are less than 40°C. The cooling techniques can be used to design and apply for developing electric vehicle battery system with high lifetime and more safety too.

**Keyword:** Thermal Runaway, Electrical Vehicles, Lithium Batteries, Battery Thermal Management System.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ เริ่มมีบทบาทมากขึ้น และในอนาคตอาจจะเป็นเทคโนโลยีที่มาแทนที่ยานยนต์ระบบเชื้อเพลิงที่ใช้น้ำมัน ซึ่งได้มีการพัฒนาด้านระบบไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นการสำรองไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อน ระบบอัดประจุเพื่อการใช้งานใหม่อีกครั้ง โดยเทคโนโลยีดังกล่าวเมื่อใช้งานไปนานๆ อุปกรณ์ต่างๆ จะเริ่มเสื่อมตามสภาพการใช้งาน แต่การเสื่อมสภาพนั้นจะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับการดูแลรักษา และการตรวจสอบสภาพของอุปกรณ์ และแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ผู้ใช้มักจะขาดการดูแลรักษาที่ถูกต้อง เนื่องจากระบบของแบตเตอรี่นั้นมีความซับซ้อนและสายไฟเป็นจำนวนมาก หรือใช้งานจนเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเก็บประจุไม่ได้ของแบตเตอรี่แล้วเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนแบตเตอรี่ แต่หากรู้วิธีการดูแลรักษาที่ดีพอแล้ว จะช่วยเรื่องของการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ซึ่งเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่ อีกทั้งแบตเตอรี่ที่ถูกเปลี่ยนจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นวัตถุอันตราย และจากปัญหาของแบตเตอรี่ที่พบกรณีแบตเตอรี่ระเบิดนั้น มาจะสถานะที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างเฉียบพลันหรือที่เรียกว่า Thermal Runaway (TR) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่จะพบในแบตเตอรี่กลุ่มลิเทียม โดยมีปัจจัยการเกิดปรากฏการณ์นี้อยู่ประมาณ 3 แบบ คือ ปัจจัยทางกล ปัจจัยทางไฟฟ้า และปัจจัยทางความร้อน

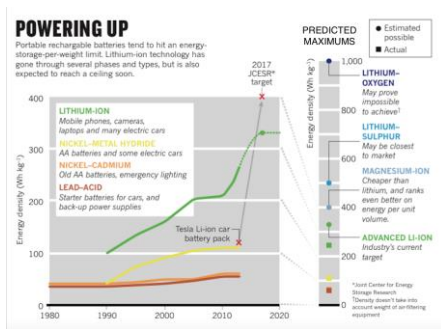
## 2. แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานหลักที่นิยมใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และยังเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับงานบางประเภท ซึ่งแบตเตอรี่นั้นแบ่งเป็น 2 ประเภทตามรูปแบบของการใช้งานคือ แบตเตอรี่ปฐมภูมิ หรือที่เรียกกันว่าแบตเตอรี่ใช้แล้วทิ้ง กับอีกแบบคือแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่สามารถนำและในส่วนของรถไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันนั้น อาศัยพลังงานหลักจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม เพราะเป็นแบตเตอรี่ที่มีความทนทาน และความจุในการเก็บพลังงานที่สูงมาก

### 2.1. พัฒนาการของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานมาก จากยุคช่วงแรกมาจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง และด้วยเทคโนโลยีที่ปัจจุบันมีความทันสมัย ทำให้แบตเตอรี่ ถูกพัฒนาอย่างก้าวกระโดด อีกทั้งยังได้รับความนิยมในการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งสามารถทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ ได้อีกมากมาย แบตเตอรี่เริ่มเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1747 (พ.ศ. 2291) โดย Benjamin Franklin และได้ถูกพัฒนามาเป็นแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในปี 1859 (พ.ศ. 2402) โดย Gaston Plante จนในปัจจุบันแบตเตอรี่ได้ถูกพัฒนามาจนเป็นแบตเตอรี่ลิเทียม [1] ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียม นั้น ถือว่าเป็นเทคโนโลยีด้านแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดในเวลานี้ และยังมีการคาดการณ์องค์ประกอบรวมในแบตเตอรี่ลิเทียมต่อไปอีก ดังรูปที่ 1

ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564

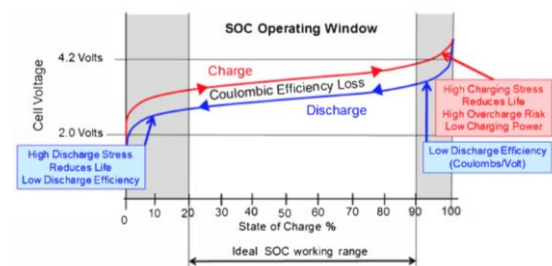


รูปที่ 1 กราฟแสดงแนวโน้มของแบตเตอรี่แต่ละชนิด [2]

จากรูปที่ 1 แบตเตอรี่ได้ถูกพัฒนาตั้งแต่กรดตะกั่ว มาเป็นแบตเตอรี่นิกเกิล จนในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมได้ถูกนำมาใช้งาน ซึ่งในอนาคตนั้น ยังมีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิด ลิเทียม-ออกซิเจน อีกทั้งการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน และความปลอดภัยเมื่อนำมาใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าอีกด้วย [3]

## 2.2 เคมีไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียม

ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมนั้นจะมีองค์ประกอบของธาตุต่างๆ รวมอยู่ด้วยเพื่อประสิทธิภาพการใช้งาน โดยส่วนมากจะแตกต่างกันที่ขั้วแคโทด เช่นลิเทียมโคบอล (LCO), ลิเทียมแมงกานีส (LMO), ลิเทียมฟอสเฟส (LFP), ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลออกไซด์ (NMC), ลิเทียมนิกเกิลโคบอลลูมิเนียมออกไซด์ (NCA), และลิเทียมไททาเนต (LTO) โดยที่ LMO ผสมรวมกับ NMC เพื่อให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น [2] และได้มีนักวิจัยทำการทดลองเปรียบเทียบแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด  $\text{LiCoO}_2$  และ  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  ขนาดแบตเตอรี่ที่ทดลองมีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 18 มิลลิเมตร ยาว 65 มิลลิเมตร หรือแบตเตอรี่ 18650 โดยทดลองให้ความร้อนจากภายนอก และความร้อนจากภายใน ภายใต้สถานะประจุที่เท่ากัน (SOC เท่ากัน) พบว่า  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  มีอุณหภูมิที่มีความเสถียรมากกว่า  $\text{LiCoO}_2$  [4] นอกจากค่า SOC ที่เท่ากันแล้ว ยังมีงานวิจัยที่ทดลองภายใต้การเปลี่ยนแปลงของ SOC ไม่ว่าจะเป็นการทดลองโดยการเพิ่มขึ้นของ SOC (การอัดประจุไฟฟ้าหรือการชาร์จ: Charge) หรือการลดลงของ SOC (การคายประจุไฟฟ้าหรือการดิสชาร์จ: Discharge) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงกราฟการอัดและการคายประจุ [2]

จากรูปที่ 2 ในการใช้งานแบตเตอรี่นั้นควรให้ประจุไฟในแบตเตอรี่ (SOC) อยู่ในช่วงระหว่าง 20% ถึง 90% โดยอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมช่วงที่มีการอัดประจุนั้นจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 0 ถึง 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิช่วงคายประจุอยู่ที่ -20 ถึง 60 องศาเซลเซียส และถ้าแบตเตอรี่ลิเทียมถูกใช้งานไปมากกว่า 500 รอบ [5] จะเกิดความสูญเสียประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ไป 12.9% โดยวิเคราะห์จาก XRD, SEM, EIS และ CV และได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์เศษส่วนมวลของธาตุองค์ประกอบลดลงหลังจากรอบการใช้งานแบตเตอรี่ผ่านไป 500 รอบ

| ขั้ว  | รอบ | เปอร์เซ็นต์เศษส่วนมวลของธาตุองค์ประกอบ |    |     |      |      |     |      |
|-------|-----|----------------------------------------|----|-----|------|------|-----|------|
|       |     | C                                      | O  | F   | P    | Mn   | Co  | Ni   |
| แคโทด | 0   | 37                                     | 30 | 8   | -    | 7.51 | 5   | 12.4 |
|       | 500 | 36                                     | 32 | 8   | -    | 7.37 | 4.6 | 11.8 |
| แอโนด | 0   | 88                                     | 6  | 5   | 0.49 | -    | -   | -    |
|       | 500 | 83                                     | 8  | 8.8 | 0.54 | -    | -   | -    |

จากตารางที่ 1 พบว่าเปอร์เซ็นต์เศษส่วนมวลของธาตุองค์ประกอบลดลงหลังจากที่มีการใช้งานแบตเตอรี่ผ่านไป 500 รอบ ส่วนความสัมพันธ์ของค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ SOC และระยะเวลาที่เหลือในการคายประจุ RDT แบตเตอรี่ลิเทียม และถ้าหากกระบวนการคายประจุของแบตเตอรี่ไม่ได้เป็นเชิงเส้นอาจจะทำให้การวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่ใช้ผิดพลาดได้ และการพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์มาเป็นระดับประจุในแบตเตอรี่ จึงได้ทดลองทางวงจรไฟฟ้าแบบวงจรเปิด โดยทดสอบทั้งแบบสถิติศาสตร์และพลศาสตร์ และได้สรุปว่าแรงดันใน

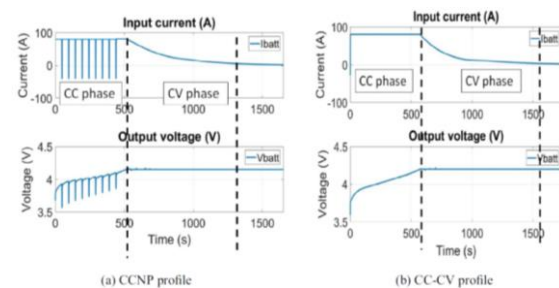
สถานะประจุของแบตเตอรี่ที่ระดับต่างๆ สามารถวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่จะใช้ในการคายประจุที่เหลือได้ [6]

### 2.3 คุณสมบัติ และประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลิเทียม

แบตเตอรี่ที่มีขนาด 18650 นั้น มีการทดลองโดยการจำลองแบตเตอรี่ที่มีขนาดเท่ากัน โดยอาศัยแผ่นสแตนเลสและแผ่นไมก้าสลับกัน ซึ่งเมื่อวัดคุณสมบัติของแบตเตอรี่จำลองนี้ได้ความหนาแน่นวัดได้  $1,593 \pm 30 \text{ kg/m}^3$  ความจุความร้อน  $727 \pm 18 \text{ J/kg-K}$  การนำความร้อนคำนวณได้  $5.1 \pm 0.6 \text{ W/m-K}$  การแผ่ความร้อนได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ผล จากการเพิ่มความจุความร้อนเป็น  $805 \pm 23 \text{ J/kg-K}$  พบว่าการแผ่ความร้อนอยู่ระหว่าง  $0.12$  และ  $0.197 \text{ W/m-K}$  ความร้อนที่แผ่ได้ของแบตเตอรี่จำลองอยู่ที่  $43\text{--}71$  องศาเซลเซียส และสรุปว่าแบตเตอรี่จำลองนี้มีความร้อนที่ใกล้เคียงกันกับแบตเตอรี่ 18650 [7] ซึ่งสามารถนำแบตเตอรี่จำลองนี้ไปทำการทดสอบในด้านต่างๆ ต่อไปได้นอกจากนั้นยังมีการทดลองการวัดความร้อนเอนนิโซโทรปิก การนำความร้อน และความจุความร้อน ของแบตเตอรี่ลิเทียม  $\text{LiFePO}_4$  ขนาด 26650 และ 18650 และวิเคราะห์ผลการทดลองของรัศมีของความร้อนด้วยวิธีทางไฟไนท์อีลิเมนต์ได้ค่าน้อยสุดช่วง  $0.15\text{--}0.2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  สำหรับขนาด 26650 และ 18650 โดยกล่าวอีกว่าการทดลองนี้จะทำให้เข้าใจรูปแบบการเคลื่อนที่ของความร้อนที่เกิดขึ้น อาจจะนำไปสู่รูปแบบการเพิ่มประสิทธิภาพ และความปลอดภัยได้ [8]

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ลิเทียม นั้น มีการทดลองการอัดประจุแบบไว ที่เรียกกันว่าควิกชาร์จ (Quick Charge) หรือฟาสชาร์จ (Fast Charge) การอัดประจุไฟฟ้าแบบไว เพื่อเพิ่มแนวทางการตลาดของแบตเตอรี่ลิเทียม โดยทำการทดลองหาพารามิเตอร์การชาร์จเร็วสูงสุดนั้นเป็นเท่าไร และต้องปลอดภัยด้วย โดยทดลองกับแบตเตอรี่ชนิดทรงกระบอก 18650 ซึ่งมีกระแส 3 แอมป์แปร์ และทดลองพบว่าการอัดประจุแบบไวนั้นปลอดภัยที่กระแสสูงสุด 6A หรือ 2C [9] และการอัดประจุ และคายประจุกับเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมขนาด

18650 ชนิด NMC-811/SiC และ NMC-111/graphite ด้วยวิธี p2D โดยในการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าระดับการอัดเก็บประจุไฟฟ้าเกินกว่า 60% สามารถทำได้น้อยกว่า 18 นาที [10] ซึ่งได้มีการทดลองการชาร์จแบบเร็วของแบตเตอรี่ ว่าหากมีกำลังไฟสูง หรือมีพลังงานที่สูง ฤกษ์หรือภาชนะที่บรรจุแบตเตอรี่ลิเทียมจะเป็นอย่างไร ซึ่งใช้แบบจำลองทางอุณหภูมิตามแบบ 3 มิติ และแบ่งการทดลองเป็น 2 แบบ คือแบบกระแสและแรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC-CV) และแบบสัญญาณพัลส์ติดลบของกระแสและแรงดัน (CCNP-CV) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงกราฟของกระแส และแรงดันไฟฟ้า [11]

จากการทดสอบแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 10, 25 และ 45 องศาเซลเซียส โดยทดสอบกับแบตเตอรี่ลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลออกไซด์ ( $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{CoO}_2$ : NMC) และลิเทียมไททาเนต ( $\text{Li}_{1.33}\text{Ti}_{1.67}\text{O}_4$ : LTO) และวิเคราะห์ผลโดย CFD และได้สรุปผลการชาร์ตประจุแบบเร็วหรือที่เรียกว่าควิกชาร์ตนั้นทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส และจากแบบจำลองทางอุณหภูมิตามแบบ 3 มิติ พบว่า NMC ให้พลังงานสูง ส่วน LTO ให้กำลังสูง [11] การอัดประจุไฟฟ้าแบบไว หรืออัดประจุแบบรวมเร็วของแบตเตอรี่ลิเทียม ผู้คนจะให้ความสำคัญเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่เพื่อเลี่ยงการเกิดความร้อนที่สูงแบบเฉียบพลัน และหาผลที่เกิดขึ้นจากการชาร์ตประจุแบบไวจากพฤติกรรมความร้อนที่เกิด และประสิทธิภาพทางพลังงานของแบตเตอรี่ลิเทียม โดยทดลอง 30 นาที ถึงความจุ 80% และชาร์จด้วยกระแสคงที่แบบผสม 2 กระแส (two-stage constant current: 2SCC) โดยทดสอบแบบ กระแสสูง-กระแสต่ำ กระแสต่ำ-กระแสสูง

และแบบกระแสแบบเดียวคงที่ ผลการทดลองสรุปว่า กระแสสูงช่วงแรกและกระแสต่ำช่วงหลังอุณหภูมิต่ำและประสิทธิภาพทางพลังงานสูงกว่าอีก 2 แบบ [12]

เทคโนโลยีปัจจุบันที่ใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมเป็นหลัก และใช้ในปริมาณมาก และเป็นที่แพร่หลายในตลาดของ แบตเตอรี่ก็จะมีด้านรถยนต์ไฟฟ้า กับระบบเก็บไฟฟ้าจาก พลังงานทางเลือกอื่นๆ โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงการใช้งาน ของรถยนต์ไฟฟ้า และปัญหาใหญ่ที่นักวิจัยให้ความสำคัญ กันมากในช่วงนี้คือเรื่องความปลอดภัย เพราะอุบัติเหตุที่ เกิดจากแบตเตอรี่นั้นสามารถสร้างความเสียหายอย่าง รุนแรง โดยเฉพาะแบตเตอรี่หากขาดการดูแลที่ดี และ ปลดปล่อยให้อยู่ในสภาวะที่แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียสจะเสี่ยงต่อการเกิดปรากฏการณ์ TR ได้ และในการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ ได้มีนักวิจัยทำ การทดลองโดยใช้ระบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นน้ำ/ไกลคอล, น้ำมัน, ของไหลนาโน, โลหะเหลวและไอร่อนโลหะ [13] รวมถึงท่อระบายความร้อน ซึ่งสามารถทำการทดลองและ เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยโปรแกรม CFD ท่อที่ใช้ ในการทดลองและวิเคราะห์เป็นท่อขนาดเล็กระดับไมโคร (ultra-thin micro heat pipe: UMHP) และใช้โมเดล ความร้อนแบบ 3 มิติ แบบแยกส่วน เพราะมีทั้งตัวแปร ต่างๆ เกี่ยวกับความร้อนในท่อ รวมถึงเงื่อนไขของโมเดล ทางความร้อน ซึ่งภายในท่อขนาดเล็กนั้นพิจารณาการพา ความร้อนแบบธรรมชาติและแบบบังคับ โดยผลลัพธ์จาก การวิเคราะห์โดยโปรแกรมเหมือนกับการทดลอง [14] เท่ากับการทดลองบางกรณีที่มีความเสี่ยงสูงนั้น จะ สามารถวิเคราะห์โดยโปรแกรมเพื่อหาสมการทาง คณิตศาสตร์ในการออกแบบ ก่อนการทดลองจริงได้ ทั้งนี้ เทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมที่เป็นแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมอย่างมากจากพลังงาน และการนำกลับมาใช้ได้ใหม่ ซึ่งจำเป็นต้องอยู่บนความปลอดภัยในการใช้งาน อีกทั้ง การแข่งขันทางการตลาด จะทำให้ในอนาคตของแบตเตอรี่ มีราคาที่ถูกลง ประสิทธิภาพสูงขึ้น อายุการใช้งานเพิ่ม มากขึ้น อัตราการเก็บประจุ และการคายประจุจะดีขึ้น [15]

### 3. การจัดการด้านความร้อนของแบตเตอรี่

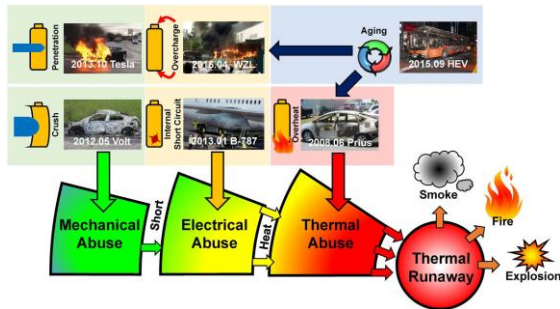
ในการจัดการทางความร้อนนั้น เป็นการใช้วิธีต่างๆ เพื่อการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ไม่ให้สูงจนถึงจุดวิกฤต เพื่อเป็นการเลี่ยงความเสียหายที่รุนแรง จากการเกิด ปรากฏการณ์อุณหภูมิสูงขึ้นแบบเฉียบพลัน หรือที่เรียกว่า Thermal Runaway (TR) โดยการจัดการความร้อนของ แบตเตอรี่ (BTMS) มีการค้นคว้าการระบายความร้อนด้วย วิธีต่างๆ เช่น การใช้อากาศ การใช้ของเหลว การใช้ไอ ระเหย ท่อความร้อน รวมถึงการใช้วัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ (PCM) ในการระบายความร้อน และการระบายความร้อน แบบทางตรง ทางอ้อม ซึ่งในการจัดการด้านความร้อน ขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยการจัดการที่ดีนั้นจะช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าได้อีกด้วย [16] ซึ่งความร้อนของรถยนต์ไฟฟ้า (EVTMS) โดยระบบ ระบายความร้อน และความร้อนเหลือทิ้งนั้นทำให้การทำ ความเย็นลดลง 26.30-32.10% และความร้อนเหลือทิ้ง อยู่ระหว่าง 18.73-45.17% และ COP อยู่ระหว่าง 0.68- 21.05% ในการทดลองภายใต้สภาวะการขับขี่แบบ เดียวกัน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ถูกตรวจสอบความ จุกจกผลกระทบนี้พบว่า SOC ลดลง 10.60% และ COP ให้ความร้อนเพิ่มขึ้น 25.55% เมื่อเทียบกับความร้อน PTC พบว่าระบบ EVTMS นั้นดีกว่า 31.71% [17]

#### 3.1 Thermal Runaway (TR)

การเกิด TR นั้นมักจะสร้างความเสียหายเป็นอย่างมากต่อรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมาจากการจัดการความร้อนที่ไม่ดี การระบายความร้อนที่ไม่ดี การลัดวงจรภายในที่มาจาก วงจรไฟฟ้าหรือปฏิกิริยาทางเคมี และได้มีนักวิจัยทดลอง ใช้วัสดุด้านแคโทดเป็น  $\text{LiFePO}_4$  เป็นวัสดุที่ราคาถูกและมีความปลอดภัยสูง และการควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงกว่า 110 องศาเซลเซียส จะช่วยป้องกันการเกิด TR ได้ [18]

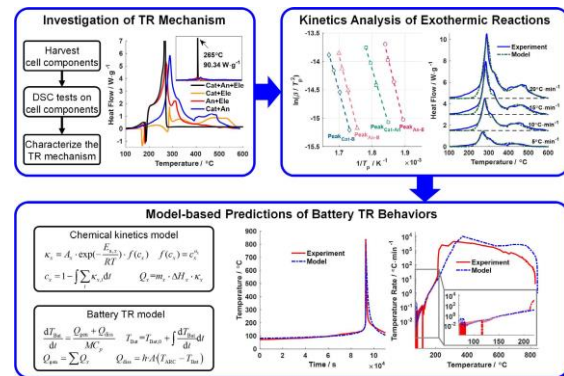
ในการเกิด TR ส่วนใหญ่เกิดจากปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับทางกลเช่นอุบัติเหตุที่ส่งผลต่อแบตเตอรี่ไม่ว่าจะเป็นการบิดหรือถูกเจาะ ซึ่งอาจจะส่งผลถึงระดับถัดมาคือ การลัดของวงจรไฟฟ้าของแบตเตอรี่โดยมีโอกาสดังกล่าวทั้ง กรณีภายในแบตเตอรี่คือวงจรภายในเกิดการลัดวงจร หรือ

กรณีภายนอกแบตเตอรี่เช่นการชาร์จประจุเกิน และในระดับนี้จะพบเป็นสาเหตุหลักหรือปัญหาหลักที่เจอโดยทั่วไป และอาจจะส่งผลต่อระดับถัดมาคือด้านความร้อน ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดควัน ไฟ หรือการระเบิดของแบตเตอรี่ได้ [19] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพสรุปการเกิด TR [19]

ในการเกิดปรากฏการณ์ TR นั้นมีนักวิจัยได้ทำการทดสอบการเกิด TR โดยการนำ แบตเตอรี่ลิเทียม (Graphite-LiCoO<sub>2</sub>) โดยเก็บที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วจึงทดสอบให้ความร้อน 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที ผลที่ได้คือแบตเตอรี่ลิเทียมจะเกิด TR ที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส [20] และยังมีนักวิจัยทำการทดสอบโดยเริ่มจากการทดสอบแบบแยกส่วน (Differential Scanning Calorimetry: DSC) โดยมีองค์ประกอบ 3 ตัวคือ Cathode (Cat), Anode (An) และ Electrolyte (Ele) จากนั้นทดสอบ TR โดยความร้อนของเตาเริ่มต้นที่ 130 องศาเซลเซียส และ 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ความร้อนแก่แบตเตอรี่ และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการลดอุณหภูมิ โดยผลของการทดลองของแบตเตอรี่จากอุณหภูมิเตาเริ่มต้นที่ 130 องศาเซลเซียส สามารถทำให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 185.84 องศาเซลเซียส จากการคำนวณ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้อุณหภูมิ 179.43 องศาเซลเซียส ส่วนที่เตาอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 150 องศาเซลเซียส นั้น มีอุณหภูมิขึ้นสูงสุดถึง 857.74 องศาเซลเซียส [21] ซึ่งมีกระบวนการทดลองดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงกระบวนการทดลอง [21]

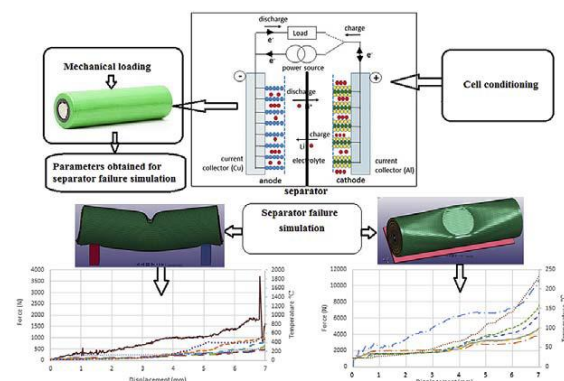
ซึ่งการทดลองแบบแยกส่วน (Differential Scanning Calorimetry: DSC) นั้นมีผลการทดลองได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าการทดลองแบบแยกส่วน [21]

Kinetics parameters of the exothermic reactions.

| Sample | x      | $A_x/s^{-1}$            | $E_{a,x}/J\ mol^{-1}$ | $n_x$ | $\Delta H_x/J\ g^{-1}$ |
|--------|--------|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|
| An+Ele | SEI    | $6.3623 \times 10^9$    | $1.0960 \times 10^5$  | 5.5   | 578.7                  |
|        | An-E   | $5.1510 \times 10^{17}$ | $2.0077 \times 10^5$  | 1     | 253.2                  |
|        | An-B   | $4.9679 \times 10^{15}$ | $1.9549 \times 10^5$  | 1     | 108.5                  |
| Cat+An | Cat-An | $2.4262 \times 10^{13}$ | $1.6201 \times 10^5$  | 1     | 560.6                  |
|        | Cat-B  | $6.5429 \times 10^{13}$ | $1.7785 \times 10^5$  | 2     | 452.1                  |
|        | Cat    | $5.3481 \times 10^5$    | $1.0934 \times 10^5$  | 1.5   | 434.0                  |

อีกทั้งมีนักวิจัยได้ทำการทดลองหาการเกิด TR ของแบตเตอรี่ 18650 โดยเงื่อนไขการทดลองการบีบอัดทั้ง 4 แบบ ได้แก่ Rod, Circular punch, three-point bend และ flat ที่อัตราประจุภายในแบตเตอรี่ต่างกัน ดังการทดลองรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดลองรูปแบบทางกายภาพแบบต่างๆ เพื่อให้เกิด TR [22]

จากรูปที่ 5 การทดลองในรูปแบบต่างๆ ได้ผลการทดลอง และวิเคราะห์ความเสียหายทางกายภาพที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ ด้วยวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ และในการทดลองระยะการบีบอัด และเวลาใช้ในการบีบอัดของแบตเตอรี่นั้น พบว่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงขึ้นถึง 700 องศาเซลเซียส และยังพบว่าแรงดันไฟฟ้าตกลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลมาจากการลัดวงจรภายในแบตเตอรี่ [22]

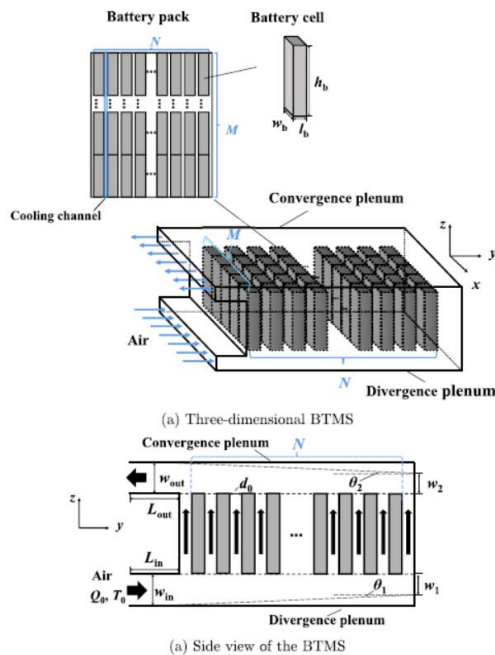
ในการทดลองการเกิด TR ยังได้มีกลุ่มนักวิจัยได้ทำการทดสอบกับแบตเตอรี่แพ็คที่ต่อไว้แบบขนาน 4 ก้อน และนำมาต่ออนุกรม 10 ชุด (10s4p) รวม 2.85 Ah และทดสอบโดยการเจาะแบตเตอรี่ด้วยตะปู และระบบที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมินั้นจะทดสอบด้วยระบบ phase change composite materials (PCC™) และเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีระบบนี้ และศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์แบตเตอรี่เกิด TR [23] ส่วนถ่านำแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด  $\text{LiCoO}_2$  มาทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนแปลงค่าสถานะประจุ ในระดับต่างๆ พบว่าแบตเตอรี่ 100% SOC มีอัตราการเกิด TR ต่ำที่สุด [24] อีกทั้งแบตเตอรี่ลิเทียมที่เสื่อมสภาพ หรือเสียแล้วก็ยังมีโอกาสที่จะเกิด TR ได้อยู่ การเกิด TR นั้นมักจะเกิดที่แกนของแบตเตอรี่ [25] ดังนั้นขนาดของแบตเตอรี่ที่พิจารณาย้อนกลับการการนำความร้อน จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิจริงๆ ที่เกิด TR จากแกนของแบตเตอรี่ และด้วยพื้นฐานการเกิด TR ที่อธิบายจะสามารถนำมาพิจารณาการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยลดการเกิด TR ลงได้ ส่วนแบตเตอรี่ชนิด  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  ได้มีนักวิจัยทดสอบที่ขนาด 25 Ah โดยในการทดลองนั้นได้ใช้แบตเตอรี่ที่มีประจุเต็ม ต่อพ่วงกัน 6 ก้อน และทดลองให้เกิด TR ซึ่งผลที่ได้คือ TR เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 469 องศาเซลเซียส พลังงานไฟฟ้าลดลง 75% หรือน้อยกว่า ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน และเกิดการกระจายความร้อนสูงกว่า  $70 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  โดย ความร้อนระหว่างแบตเตอรี่ที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร มีค่าการนำความร้อนน้อยกว่า  $0.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  [26]

ในการเกิด TR จะเหมือนปฏิกิริยาลูกโซ่ ที่ความร้อนจะส่งต่อไปยังแบตเตอรี่ข้างเคียง โดยได้มีนักวิจัยอีกจำนวนหนึ่งที่ออกแบบอุปกรณ์ป้องกันเพื่อยับยั้งการลุกลามของปรากฏการณ์ TR โดยได้ทำระบบท่อระบายความร้อนขนาดเล็ก (minichannel cooling) โดยวิเคราะห์จากแบบจำลอง the conjugate heat transfer model และ the reaction kinetics model ซึ่งสามารถป้องกันการลุกลามของ TR กับเซลล์แบตเตอรี่อื่นๆ แต่ไม่สามารถป้องกันการเกิด TR กับแบตเตอรี่เซลล์ตัวมันเองได้ [27] และยังมีนักวิจัยทำการทดลองวัสดุคั่นระหว่างแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าชนิด 18650 ที่จำลองโมดูลมาจำนวนหนึ่ง โดยวัสดุที่ใช้ต้องสามารถป้องกันความร้อนแผ่ไปยังแบตเตอรี่ข้างเคียงเมื่อเกิด TR โดยได้พบว่าแผ่นคอมโพสิตกราฟไฟท์ และอลูมิเนียมเอกซ์ทูดสามารถป้องกันความร้อนที่จะส่งผลให้แบตเตอรี่ข้างเคียงจนนำไปสู่การเกิด TR [28]

การจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียม นั้น มีความจำเป็นอย่างมากเพื่อให้แบตเตอรี่ทำงานในสภาวะที่เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังเป็นการยืดอายุการใช้งานได้อีกด้วย ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงการใช้งานที่ดีนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี โดยอาศัยตัวกลางที่ดึงความร้อนจากแบตเตอรี่เพื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นอากาศ หรือของเหลว

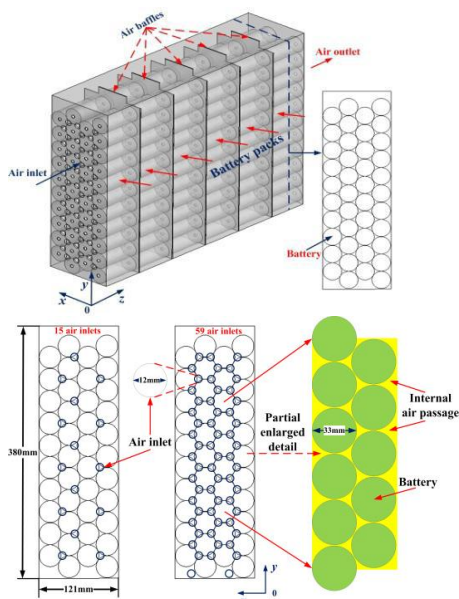
### 3.2 ระบบการระบายความร้อนด้วยอากาศ

การระบายความร้อนด้วยอากาศ เป็นวิธีการระบายความร้อนวิธีหนึ่ง ที่สามารถกำหนดทิศทางการไหลของอากาศได้จากอุปกรณ์ทดลอง และแหล่งจ่ายบังคับทิศทาง ซึ่งได้มีนักวิจัยที่ทำการออกแบบชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยการบังคับอากาศให้ไหลผ่านช่องว่างด้วยเงื่อนไขต่างๆ เช่นมุมทางเข้าของอากาศ มุมทางออกของอากาศ ขนาดช่องทางเข้าของอากาศ ขนาดช่องทางออกของอากาศ ลักษณะรูปแบบอากาศที่ไหลผ่าน ช่องว่างระหว่างแบตเตอรี่กับแบตเตอรี่ที่อากาศสามารถไหลผ่านได้ ดังรูปที่ 6 [29]-[37]



รูปที่ 6 โมเดลการระบายความร้อน  
ด้วยอากาศแบบบังคับ [34]

รวมถึงท่อที่ใช้สำหรับบังคับอากาศซึ่งมีการวิจัยถึงขนาดความยาวของท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ช่องว่างระหว่างท่อ กับแบตเตอรี่ จำนวนท่อและการจัดเรียงรูปแบบของท่อ ดังรูปที่ 7 [30], [31], [34]-[35], [38]-[40]



รูปที่ 7 แสดงโมเดลการจัดเรียงแบตเตอรี่  
ช่องว่างระหว่างแบตเตอรี่และท่ออากาศที่ใช้ [40]

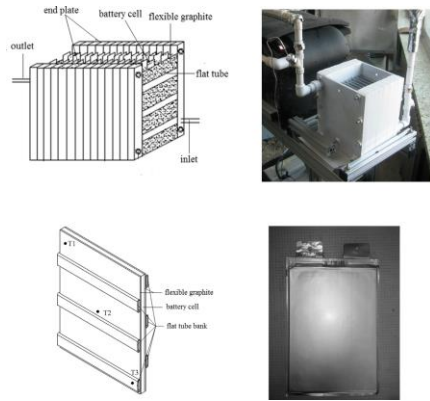
โดยการปรับความเร็ว อัตราการไหล และปริมาณมวลอากาศที่ป้อนเข้าในระบบ [32], [38]-[42] รวมถึงการทดสอบผลกระทบทางไฟฟ้าโดยการกำหนดแรงดันทางไฟฟ้า กระแสที่ใช้ในการทดสอบ C-Rate การอัดประจุ Charge การคายประจุ Discharge รวมถึงสังเกตพฤติกรรมด้านความร้อนของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงของปริมาณพลังงาน SOC [33]-[34], [43] รวมถึงการศึกษาเพื่อให้ได้ต้นทุนที่ต่ำ และสามารถนำมาใช้ในการระบายความร้อนของรถยนต์ไฟฟ้าได้ [44]

ในการระบายความร้อนด้วยอากาศนั้นผู้วิจัยส่วนใหญ่มุ่งการประสิทธิภาพในการจัดการความร้อนโดยการหาอุณหภูมิสูงสุด  $T_{max}$  ผลต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T$  อุณหภูมิเฉลี่ยและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ โดยการทดลองร่วมกับวิธีวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข CFD และผลที่ได้พบว่ามีมุมทางเข้าออกที่ดีที่สุดคือ 25 องศา โดยทางเข้าและทางออกควรมีขนาดเท่ากัน การไหลแบบตัว U ช่วยให้ความต่างของอุณหภูมิลดลงได้ถึง 70% และการปรับรูปแบบที่เหมาะสม สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 40 องศาเซลเซียสได้และพลังงานที่ใช้ลดลงรวมถึงต้นทุนที่ลดลงด้วย

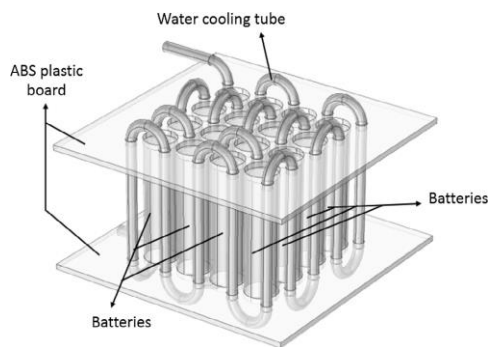
### 3.3 ระบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว

นอกจากการระบายความร้อนด้วยอากาศดังที่กล่าวในข้างต้น ยังมีการระบายความร้อนด้วยของเหลว ไม่ว่าจะเป็นการให้ของเหลวไหลผ่านท่อ หรือช่องทางการไหลเพื่อระบายความร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถพาความร้อนได้ดีกว่าการระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยในการระบายความร้อนด้วยของเหลวนั้นได้มีกลุ่มนักวิจัยออกแบบการทดลองจากวัสดุวัสดุเสริม หรืออุปกรณ์ที่ทำขึ้นมาเป็นโมเดลที่มีทั้งแบตเตอรี่และช่องทางการไหลของของเหลว โดยวัสดุที่ใช้ในไดมอนด์นักวิจัยได้ทดลองใช้อลูมิเนียมบล็อก ที่ทำขึ้นมาเฉพาะการทดลองนั้นๆ [45] หรือได้มีการทดลองใช้อลูมิเนียมที่มีความพรุน [46] รวมถึงการนำท่ออลูมิเนียมมาทดลองร่วมกับวัสดุกราฟไฟแบบยืดหยุ่น ดังรูปที่ 8 [47] หรือคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์ [48] พร้อมกับทดสอบทางไฟฟ้าที่แรงดันทางไฟฟ้า กระแสทางไฟฟ้า

C-Rate ที่อัตราต่างๆ [49]-[51] ร่วมกับการปรับตัวแปรทางกลได้แก่ อัตราการไหลหรืออัตราการไหลเชิงมวลดังรูปที่ 9 [45], [49], [52]-[54]

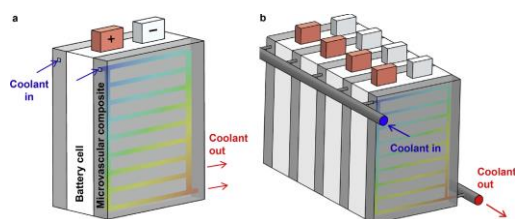


รูปที่ 8 โมเดลการระบายความร้อนโดยใช้ท่ออลูมิเนียมร่วมกับกราฟไฟชนิดยืดหยุ่น [47]



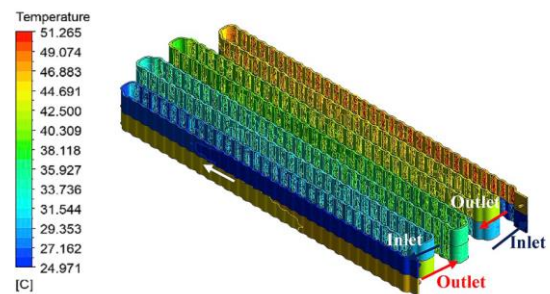
รูปที่ 9 ระบบการระบายความร้อนด้วยน้ำ [50]

พื้นที่ผิวสัมผัสของท่อหรือพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของท่อตามความยาวของท่อ [37], [45], [53] จำนวนท่อ [47], [52]-[53] ขนาดของท่อ [48], [52]-[53], [55] รวมถึงการใช้ท่อขนาดเล็กในการระบายความร้อนดังรูปที่ 10 [48], [55]



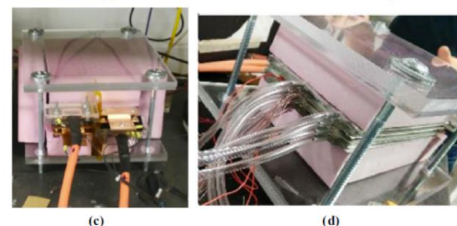
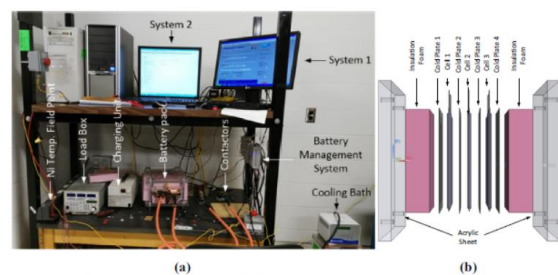
รูปที่ 10 ระบบระบายความร้อนที่ทำจากคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีช่องระบายความร้อนขนาดเล็ก [48]

การใช้ครีบบระบายความร้อน [37], [46] หรือการใช้เทคนิคการไหลสวนทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนดังรูปที่ 11 [56]



รูปที่ 11 ระบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ที่ไหลแบบสวนทาง [56]

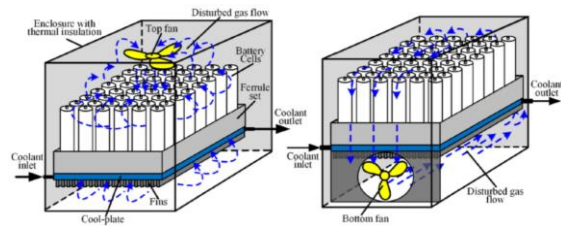
ในการศึกษาการระบายความร้อนด้วยของเหลว นั้น มีนักวิจัยทำการศึกษาค่าอุณหภูมิสูงสุด  $T_{max}$  ผลต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T$  อุณหภูมิเฉลี่ยและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ ความดันตกคร่อม โดยการทดลองร่วมกับวิธีวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข CFD และผลที่ได้ นั้นพบว่าหากกระแสไฟฟ้า C-Rate ยิ่งสูงมากค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ก็สูงตามโดยมีการทดลองดังรูปที่ 12 ส่วนการใช้ท่อขนาดเล็กนั้นจะต้องใช้กำลังของปั๊มเพิ่มมากขึ้น และการใช้ท่อแบบแผ่นที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสนั้นจะช่วยรักษาอุณหภูมิสูงสุดไว้ที่ 40 องศาเซลเซียสได้



รูปที่ 12 ระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวเย็นที่มีลักษณะเป็นแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน [51]

ในส่วนประสิทธิภาพการระบายความร้อนนั้น จำนวนท่อระบายความร้อนจะมีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคืออัตราการไหล ถัดมาคือความยาวท่อ และขนาดท่อมีผลน้อยที่สุด

นอกจากการระบายความร้อนด้วยอากาศ และด้วยของเหลวยังมีการนำระบบทั้ง 2 มาทำงานร่วมกันอย่างเดียวกัน ฟัวัง และคณะ [57] ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดยอาศัยการระบายความร้อนด้วยก๊าซเย็นไหลแบบบังคับ ร่วมกับของเหลวเย็น และวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณเพื่อหาก๊าซเย็นที่ไหลแบบบังคับ โดยความปั่นป่วนของก๊าซเย็นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการระบายความร้อน พร้อมกับเทียบวิธีระบายความร้อนแบบสูญเสียอากาศ โดยแบตเตอรี่นั้นได้สร้างความร้อนภาพรวมไว้ที่ 576 วัตต์ และระบบดังกล่าวสามารถทำให้อุณหภูมิสูงสุดลดลงได้ 3.45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิมีความแตกต่าง 3.88 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น 2.46 องศาเซลเซียส ผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการระบายความร้อนนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดีดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 โมเดลการระบายความร้อนด้วยอากาศเย็นร่วมกับของเหลวเย็นในการระบายความร้อน [57]

ในการระบายความร้อนด้วยอากาศนั้นจะใช้พลังงานมากกว่าแบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว 2 ถึง 3 เท่า ส่วนแบบครีระบายความร้อน จะทำให้ระบบการระบายความร้อนมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 40% ส่วนการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อมสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดได้ดีที่สุด แม้ว่าประสิทธิภาพการระบายความร้อนจะน้อย

กว่าแบบระบายด้วยของเหลวทางตรง แต่ก็น้อยกว่าเพียงเล็กน้อยซึ่งการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อมได้เสนอว่าสามารถนำไปใช้งานจริงได้ [37] ในการระบายความร้อนด้วยของเหลวนั้นยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของของไหลได้ ด้วยการเติมสารนาโน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน [56]

#### 4. สรุป

จากการทบทวนวรรณกรรมนั้น พบว่าปัญหาของแบตเตอรี่ลิเทียมที่นักวิจัยกล่าวถึงนั้น ได้แก่ความปลอดภัยจากความร้อนที่เกิดจากการอัดประจุ การคายประจุ รวมถึงอุบัติเหตุต่างๆ จนเกิด TR หรือความร้อนที่เกิดขึ้นกว่าช่วงอุณหภูมิทำงานที่ 25 – 40 องศาเซลเซียส และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยในการควบคุมอุณหภูมินั้นสามารถใช้อากาศ หรือของเหลวในการระบายความร้อน ด้วยตัวแปรอัตราการไหล มุมทิศทางการไหล ความยาวท่อ หน้าตัดท่อ จำนวนท่อ วัสดุที่ใช้ ขนาดปั๊ม หรือพัดลม รวมถึงการใช้ครีระบายความร้อนช่วย และทำการทดลอง ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข CFD เพื่อหาประสิทธิภาพการระบายความร้อน อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ ผลต่างและค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ความดันตกคร่อมในกรณีของเหลว ส่วนการพัฒนาโมดูลของแบตเตอรี่นั้นอยู่ที่การใช้งานจากแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ซึ่งอาจจะมีทั้งขนาดใหญ่ หรือขนาดเล็กอยู่กับขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ จำนวนแบตเตอรี่เพื่อให้ได้แรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมถึงระบบการระบายความร้อน

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านในห้องปฏิบัติการเทอร์โม-ของไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน. (TFHT) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในการสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์เพื่อการวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Limtongkun, “Energy knowledge get to know battery part 1,” *E-magazine of National and Metal and Materials Technology Center*, July - September 2014.
- [2] A. Chen and P.K. Sen, “Advancement in Battery Technology: A State-of-the-Art Review,” *IEEE 2016-ESC-0713*, pp. 1-10, 2016.
- [3] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P.V. Bossche and L. Boon-Brett, “A review of international abuse testing standards and regulations for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 1427–1452, 2018.
- [4] O.S. Mendoza-Hernandez, H. Ishikawa, Y. Nishikawa, Y. Maruyama and M. Umeda, “Cathode material comparison of thermal runaway behavior of Li-ion cells at different state of charges including over charge,” *Journal of Power Source*, Vol.280, 15 April 2015, pp. 499-504, 2016.
- [5] J. CHENG, X. LI, Z. WANG and H. GUO, “Mechanism for capacity fading of 18650 cylindrical lithium-ion batteries,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 27, pp. 1602–1607, 2017.
- [6] Z. Chen, H. Sun, G. Dong, J. Wei and J. Wu, “Particle filter-based state-of-charge estimation and remaining-dischargeable-time prediction method for lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, Vol. 414, pp. 158–166, 2019.
- [7] N.S. Spinner, K.M. Hinnant, R. Mazurick, A. Brandon, S.L. Rose-Pehrsson and S.G. Tuttle, “Novel 18650 lithium-ion battery surrogate cell design with anisotropic thermophysical properties for studying failure events,” *Journal of Power Sources*, Vol.312, pp. 1-11, 2016.
- [8] S.J. Drake, D.A. Wetz, J.K. Ostanek, S.P. Miller, J.M. Heinzl and A. Jain, “Measurement of anisotropic thermophysical properties of cylindrical Li-ion cells,” *Journal of Power Sources*, Vol. 252, pp. 298-304, 2014.
- [9] T. Amietszajew, E. McTurk, J. Fleming and R. Bhagat, “Understanding the limits of rapid charging using instrumented commercial 18650 high-energy Li-ion cells,” *Electrochimica Acta*, Vol. 263, pp. 346-352, 2016.
- [10] J. Sturm, A. Rheinfeld, I. Zilberman, F.B. Spingler, S. Kosch, F. Frie and A. Jossen, “Modeling and simulation of inhomogeneities in a 18650 nickel-rich, silicon-graphite lithium-ion cell during fast charging,” *Journal of Power Sources*, Vol. 412, pp. 204–223, 2019.
- [11] J. Jaguemont, N. Omar, M. Abdel-Monem, P.V. Bossche and J.V. Mierlo, “Fast-charging investigation on high-power and high-energy density pouch cells with 3D-thermal model development,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 128, pp. 1282–1296, 2018.
- [12] M. Xu, R. Wang, B. Reichman and X. Wang, “Modeling the effect of two-stage fast charging protocol on thermal behavior and charging energy efficiency of lithium-ion batteries”. *Journal of Energy Storage*, Vol. 20, pp. 298–309, 2018.

- [13] Y. Deng, C. Feng, E. Jiaqiang, H. Zhu, J. Chen, M. Wen and H. Yin, “Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 142, pp.10–29, 2018.
- [14] F. Liu, F. Lan and J. Chen, “Dynamic thermal characteristics of heat pipe via segmented thermal resistance model for electric vehicle battery cooling,” *Journal of Power Sources*, Vol. 321, pp. 57-70, 2016.
- [15] S. Abada, G. Marlair, A. Lecocq, M. Petit, V. Sauvant-Moyno and F. Huet, “Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review,” *Journal of Power Sources*, Vol. 306, pp. 178-192, 2016.
- [16] H. Liu, Z. Wei, W. He and J. Zhao, “Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 150 pp. 304–330, 2017.
- [17] Z. Tian, W. Gan, X. Zhang, B. Gu and L. Yang, “Investigation on an integrated thermal management system with battery cooling and motor waste heat recovery for electric vehicle,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 136, pp. 16–27, 2018.
- [18] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun and C. Chen, “Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery,” *Journal of Power Sources*, Vol. 208, 15 June 2012, Pape 210–224, 2012.
- [19] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia and X. Heab, “Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review,” *Energy Storage Materials*, Vol. 10, pp. 246–267, 2018.
- [20] F. Larsson, S. Bertilsson, M. Furlani, I. Albinsson and B.E. Mellandera, “Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO<sub>2</sub> cells at different levels of ageing,” *Journal of Power Sources*, Vol. 373, pp. 220–231, 2018.
- [21] D. Ren, X. Liu, X. Feng, L. Lu, M. Ouyang, J. Li and X. He, “Model-based thermal runaway prediction of lithium-ion batteries from kinetics analysis of cell components,” *Applied Energy*, Vol. 228, pp. 633–644, 2018.
- [22] M. Sheikh, A. Elmarakbi and M. Elkady, “Thermal runaway detection of cylindrical 18650 lithium-ion battery under quasi-static loading conditions,” *Journal of Power Sources*, Vol 370, pp. 61–70, 2017.
- [23] S. Wilke, B. Schweitzer, S. Khateeb and S. Al-Hallaj, “Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study,” *Journal of Power Sources*, Vol 340, pp. 51-59, 2017.
- [24] S. Taniguchi, S. Shironita, K. Konakawa, O.S. Mendoza-Hernandez, Y. Sone and M. Umeda, “Thermal characteristics of 80°C storage-degraded 18650-type lithium-ion secondary cells,” *Journal of Power Sources*, Vol. 416, pp. 148–154, 2019.
- [25] M. Parhizi, M.B. Ahmed and A. Jain, “Determination of the core temperature of a

- Li-ion cell during Thermal Runaway,” *Journal of Power Sources*, Vol. 370, pp. 27-35, 2017.
- [26] X. Feng, X. He, M. Ouyang, L. Lu, P. Wu, C. Kulp and S. Prasser, “Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25 Ah  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  large format lithium ion battery.” *Applied Energy*, Vol. 154, pp. 74–91, 2015.
- [27] S. Wilke, B. Schweitzer, S. Khateeb and S. Al-Hallaj, “Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 110, pp. 883–890, 2017.
- [28] C. Yuan, Q. Wang, Y. Wang and Y. Zhao, “Inhibition effect of different interstitial materials on thermal runaway propagation in the cylindrical lithium-ion battery module,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 153, pp. 39–50, 2019.
- [29] K. Chen, Y. Chen, Z. Li, F. Yuan and S. Wang, “Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp. 393–401, 2018.
- [30] J. Xie, Z. Ge, M. Zang and S. Wang, “Structural optimization of lithium-ion battery pack with forced air cooling system,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, pp. 583–593, 2017.
- [31] S. Hong, X. Zhang, K. Chen and S. Wang, “Design of flow configuration for parallel air-cooled battery thermal management system with secondary vent,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 116, pp. 1204–1212, 2018.
- [32] K. Chen, S. Wang, M. Song and L. Chen, “Configuration optimization of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system using an optimization strategy,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 177–186, 2017.
- [33] K. Chen, S. Wang, M. Song and L. Chen, “Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 111, pp. 943–952, 2017.
- [34] K. Chen, M. Song, W. Wei and S. Wang, “Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system with U-type flow for cooling efficiency improvement,” *Energy*, Vol. 145, pp. 603–613, 2018.
- [35] H. Sun and R. Dixon., “Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack,” *Journal of Power Sources*, Vol. 272, pp. 404–414, 2014.
- [36] S. Shahid and M. Agelin-Chaab, “Development and analysis of a technique to improve air-cooling and temperature uniformity in a battery pack for cylindrical batteries,” *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 5, pp. 351–363, 2018.
- [37] D. Chen, J. Jiang, G.H. Kim, C. Yang and A. Pesaran, “Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 94, pp. 846–854, 2016.

- [38] M. Mousavi, S. Hoque, S. Rahnamayan, I. Dincer and G.F. Naterer, "Optimal Design of an Air-Cooling System for a Li-Ion Battery Pack in Electric Vehicles with a Genetic Algorithm," *IEEE*, pp. 1848-1855, 2011.
- [39] Z. Lu, X. Yu, L. Wei, Y. Qiu, L. Zhang, X. Meng and L. Jin, "Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 136, pp. 28-40, 2018.
- [40] Z. Lu, X.Z. Meng, L.C. Wei, W.Y. Hu, L.Y. Zhang and L.W. Jin, "Thermal Management of Densely-packed EV Battery with Forced air cooling Strategies," *Energy Procedia*, Vol. 88, pp. 682 – 688, 2016.
- [41] Y. Kitagawa, K. Kato and M. Fukui, "Analysis and Experimentation for Effective Cooling of Li-ion Batteries," *Procedia Technology*, Vol. 18, pp. 63 – 67, 2014.
- [42] L.H. Saw, Y.J. King, M.C. Yew, T.C. Ng, W.T. Chong and N.A. Pambudi, "Feasibility study of mist cooling for lithium-ion battery," *Energy Procedia*, Vol. 142, pp. 2592-2597, 2017.
- [43] C. Bolsinger and Kai Peter Birke, "Effect of different cooling configurations on thermal gradients inside cylindrical battery cells," *Journal of Energy Storage*, Vol. 21, pp. 222-230, 2019.
- [44] D.C. Erb, S. Kumar, E. Carlson, I.M. Ehrenberg and S.E. Sarma, "Analytical methods for determining the effects of lithium-ion cell size in aligned air-cooled battery packs," *Journal of Energy Storage*, Vol. 10, pp. 39-47, 2017.
- [45] Z. Rao, Z. Qian, Y. Kuang and Y. Li, "Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 1514-1522, 2017.
- [46] L.H. Saw, Y. Ye, M.C. Yew, W.T. Chong, M.K. Yew and T.C. Ng, "Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system," *Applied Energy*, Vol. 204, pp. 1489-1499, 2017.
- [47] T. Zhang, Q. Gao, G. Wang, Y. Gu, Y. Wang, W. Bao and D. Zhang, "Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 116, pp. 655-662, 2017.
- [48] S.J. Pety, M.H.Y. Tan, A.R. Najafi, P.R. Barnett, P.H. Geubelle and S.R. White, "Carbon fiber composites with 2D microvascular networks for battery cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, pp. 513-522, 2017.
- [49] C. Zhao, W. Cao, T. Dong and F. Jianga, "Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, pp. 751-762, 2018.
- [50] K. Li, J. Yan, H. Chen and Q. Wang, "Water cooling based strategy for lithium ion battery pack dynamic cycling for thermal

- management system,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 575–585, 2018.
- [51] M. Malik, I. Dincer, M.A. Rosen, M. Mathew and M. Fowler, “Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 129, pp. 472–481, 2018.
- [52] J. Zhao, Z. Rao and Y. Li, “Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 103, pp. 157–165, 2015.
- [53] E. Jiaqiang, D. Han, A. Qiu, H. Zhu, Y. Deng, J. Chen, X. Zhao, W. Zuo, H. Wang, J. Chen and Q. Peng, “Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 508–520, 2018.
- [54] A. Jarrett and I.Y. Kim, “Influence of operating conditions on the optimum design of electric vehicle battery cooling plates,” *Journal of Power Sources*, Vol. 245, pp. 644–655, 2014.
- [55] M.H.Y.Tan, A.R.Najafi, S.J. Pety, S.R. White and P.H. Geubelle, “Multi-objective design of microvascular panels for battery cooling applications,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 135, pp. 145–157, 2018.
- [56] S. Wiriyasart, C. Hommalee, S. Sirikasemsuk, R. Prurapark, P. Naphon, “Thermal management system with nanofluids for electric vehicle battery cooling modules,” *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 18, pp. 1–11., 2020.
- [57] S. Wang, Y. Li, Y.Z. Li, Y. Mao, Y. Zhang, W. Guo and M. Zhong, “A forced gas cooling circle packaging with liquid cooling plate for the thermal management of Li-ion batteries under space environment,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 929–939, 2017.

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม - เมษายน พ.ศ. 2564) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- |                                                                          |                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์                             | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                      |
| 2. อาจารย์ฉัตรพร ประมวน                                                  | สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                   |
| 3. อาจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค                                             | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี              |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพล สกุลหลง                                    | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา   |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ ศรีชาติ                                 | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี                           |
| 6. อาจารย์ ดร.วันโน ยี่ดำ                                                | สถาบันนวัตกรรมมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร                          |
| 7. อาจารย์ ดร.กวีวัชร ทัตติวงษ์                                          | ภาควิชาวิศวกรรมอัตโนมัติและหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ   |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรพงศ์ บริรักษ์                                    | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย                     |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ                              | สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย                     |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล สมนา<br>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล สมนา | สาขาวิศวกรรมโยธา<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ เมตไตรพันธ์                                  | สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา                       |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนทล นาวงษ์                                    | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                  |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภกิตต์ สายสุนทร                                  | ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรวิทยาเขตบางเขน<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                          |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐภูมิ เนียมสอน                              | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                            |

**คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์**  
**วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒจัดพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้เป็นการรวบรวมผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านความการพิจารณาและความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

**1. การเตรียมต้นฉบับ**

- 1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
- 2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใด ๆ มาก่อน
- 3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือตัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 4) ชนิดและขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun New ซึ่งขนาดตัวอักษร มีรายละเอียดดังนี้
  - 6.1) ชื่อบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา
  - 6.2) ชื่อ-สกุลผู้เขียนบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
  - 6.3) หัวข้อหลัก ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา
  - 6.4) หัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวเอียง
  - 6.5) เนื้อเรื่องในหัวข้อหลักและหัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
  - 6.6) เนื้อเรื่องในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ

**รูปแบบการเขียนบทความ** ควรมีหัวข้อเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

**ชื่อเรื่อง** ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

**ชื่อผู้เขียน** ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

**บทคัดย่อ** บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

**คำสำคัญ (Keyword)** คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

**บทนำ** กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

**ตัวเนื้อหา** อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

**สรุป** บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

**กิตติกรรมประกาศ** ขอขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

**เอกสารอ้างอิง** ให้เขียนเอกสารอ้างอิงโดยใช้วิธีเรียงตามลำดับก่อนหลังที่พบในบทความ ในรูปแบบตัวเลขในวงเล็บเหลี่ยม สำหรับรูปแบบการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง ใช้รูปแบบ IEEE ดังรายละเอียดและตัวอย่างในไฟล์แม่แบบ (template) ซึ่งดาวน์โหลดได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

## 2. วิธีการส่งบทความ

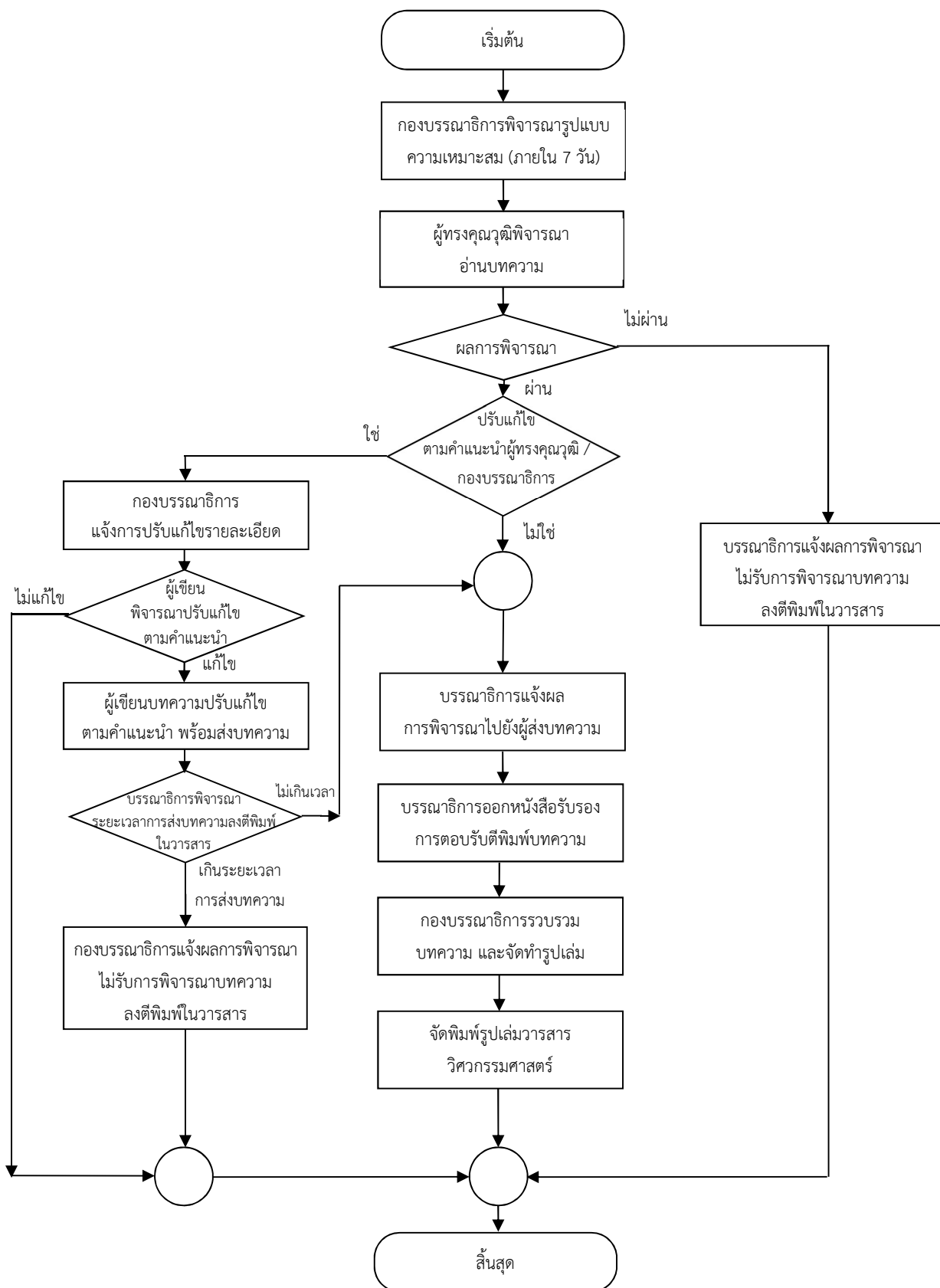
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่  
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความ ได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

## 3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอ (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิตั้งน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (double-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
- 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
- 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
- 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก  
อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120  
โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560 27070  
โทรสาร 0 3739 5527  
<http://eng.swu.ac.th>

## บทความวิจัย

- การประยุกต์ใช้ยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มในการผลิตอิฐดินซีเมนต์  
Applications of Natural Latex as Additive for Soil Cement Block Production  
โดย สุตนันต์ เพชรรัตน์ รุ่งอรุณ บุญถ่าน รุ่งโรจน์ ฤกษ์หย่าง
- การวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันภายใต้วิธีการประมาณจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันที่แม่นยำสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี  
Performance Analysis of Tag Anti Collision Algorithms Under Accurate the Number of Colliding Tag Estimation Method for RFID Systems  
โดย นรรัตน์ วัฒนมงคล
- การออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว  
The Controller Design of LEDs Intensity Using Adaptive TABU Search Method  
โดย ทศรัตน์ ทศนวัฒน์ กองพัน อารีรักษ์ ฐิติพร มะณีโกวา สุภาลัย อารีรักษ์
- การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีฟัซซี่ลอจิก  
The Maximum Power Point Tracking of Stand-alone Photovoltaic System Using Fuzzy Logic  
โดย กรกฎ คงสวัสดิ์ เทพพนม โสภะเพิ่ม
- การระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก  
Electrical Vehicle Battery Cooling by Thermoelectric Cooling Module  
โดย ปุณยวีร์ สุขสุสร สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาล นามล
- การอบแห้งใบมะกรูดด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล  
Kaffir Lime Leaves Drying Using Far Infrared-Vacuum Technique  
โดย ศรีมา แจ้คำ กิตติศักดิ์ วิธินันทิกิต เอกภูมิ บุญธรรม
- การออกแบบและพัฒนาเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสาน  
Design and Development of Bamboo Craft Splitting and Slicing Machine  
โดย กล้าณรงค์ สุขใจ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์
- การพัฒนาและทดสอบเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง  
Development and Testing of Lotus Seeds Peeling Machine  
โดย จตุรงค์ ลังกาพินธุ์ สุนัน ปานสาคร รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ มาสสุภา ไพธโรด

## บทความวิชาการ

- ทบทวนการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ลิเทียมสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า  
Review Thermal Management System of Battery for Electrical Vehicles  
โดย สรวุฒิ สิริเกษมสุข สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาล นามล\*