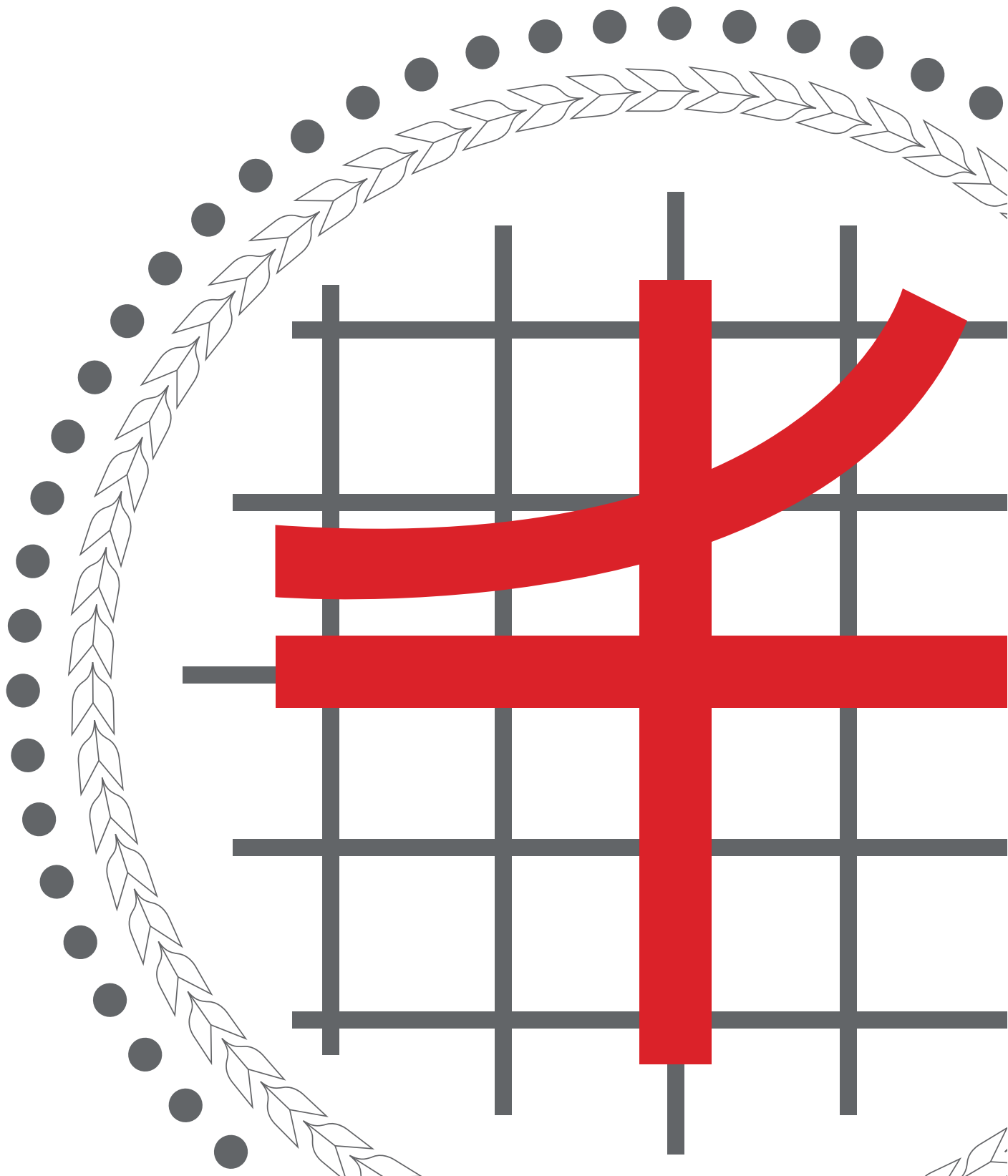


# Srinakharinwirot University Engineering Journal

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Vol. 17 No.2 (May - September 2022)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)



## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 พ.ศ. 2563-2567 เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online) เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี โดยปีที่ 1 - 16 วารสารตีพิมพ์ 3 ครั้งต่อปี (ทุก 4 เดือน) ในเดือน เมษายน สิงหาคม และ ธันวาคม ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม ฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม ตั้งแต่ปีที่ 17 ออกเล่มจำนวน 2 ฉบับ ดังนี้ ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 (2022) ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน และปีที่ 17 ฉบับที่ 2 (2022) ช่วงเดือนพฤษภาคม – กันยายน ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คน ตอบบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

## วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศม) มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรและเผยแพร่บทความวิจัย และบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎี และเชิงปฏิบัติ

## เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอรัญญิก อำเภอลำลูกกา

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                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย                | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| ศาสตราจารย์ ดร. พานิช วุฒิปุณษ์                  | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง                 | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี                         |
| ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ                   | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                         |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์                | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร                 | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ       | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์ | มหาวิทยาลัยมหิดล                               |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล          | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์               | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร            | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล                   | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร               | มหาวิทยาลัยศิลปากร                             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์                 | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                          |

### บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช

### หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

### กองบรรณาธิการ

|                                         |                            |
|-----------------------------------------|----------------------------|
| รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์      | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์     | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิธิ สุภาพ          | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |

รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ชาราธิ์เรษฐ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ตันติสธิระพงษ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ  
อาจารย์ ดร.สุธิดา ทีปักษ์พันธุ์  
อาจารย์นาวิ รุจิรามพ์  
ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์  
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน  
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน พลัด  
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช  
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย  
ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤษ  
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง  
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ  
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์  
รองศาสตราจารย์ ดร.อริศม ฤกษ์บุตร  
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ  
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์  
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล  
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์  
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร  
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนียา เกาศล  
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร  
รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
สถาบันสิริวิทยเมธี  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
มหาวิทยาลัยมหิดล  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
มหาวิทยาลัยศิลปากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### ฝ่ายการเงิน

นางสาวอัญชลี เดชอุดม

#### ฝ่ายประชาสัมพันธ์

นายณัฐกาญจน์ ไชยสมบูรณ์

นางธิดา ศรีกังพาน

#### ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

## บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลากว่า 15 ปี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณาถ้อยแถลงและประเมินคุณภาพตามกระบวนการจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับนี้ ได้นำเสนอบทความจำนวนทั้งสิ้น 4 บทความ เป็นบทความวิจัยจำนวน 3 บทความ และบทความวิชาการจำนวน 1 บทความ โดยบทความทั้งหมดเป็นผลงานวิจัยพื้นฐานและผลงานวิจัยประยุกต์ในสาขาต่างๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งผลงานที่เผยแพร่ในครั้งนี้เป็นผลงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานและการแก้ปัญหาเชิงปฏิบัติการที่เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน

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

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

บรรณาธิการวารสาร

## บทความวิจัย

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| การศึกษาสาเหตุและการเพิ่มคุณค่าของงานเปลี่ยนแปลงภายในโครงการก่อสร้าง : กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยในกรุงเทพมหานคร              | 1  |
| A study on cause and value creation of variation order in construction project : Case study of a residential building project in Bangkok |    |
| นัฐพล ท่วมพงษ์ ปิยนุช เวทย์วิวัฒน์                                                                                                       |    |
| การออกแบบและสร้างเครื่องตัดฟางข้าว                                                                                                       | 31 |
| Design and Fabrication of Straw Cutting Machine                                                                                          |    |
| ปณณวิชญ์ ทองคำ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ สุนัน ปานสาคร                                                                  |    |
| การอบแห้งมะเขือเทศราชินีด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบบังคับร่วมกับความร้อนเสริมจากอินฟราเรด                       | 42 |
| Drying of Cherry Tomatoes Using Forced Convection Solar Greenhouse in Association with Infrared Heating                                  |    |
| กมลวรรณ จิตจักร ธวัชชัย อ่องประเสริฐ                                                                                                     |    |

## บทความวิชาการ

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| การศึกษาแนวทางการเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมโครงสร้างเครื่องบิน โดยวิธีบ่มแข็งทางความร้อน | 16 |
| Study of Strengthening of Aluminum in Aircraft Structure by Aging Heat Treatment               |    |
| จรุงรัตน์ พันธุ์สุวรรณ สุรัชย์ นุ่มสารพัดนึก                                                   |    |

**การศึกษาสาเหตุและการเพิ่มคุณค่าของงานเปลี่ยนแปลงภายในโครงการก่อสร้าง :  
กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยในกรุงเทพมหานคร**  
**A study on cause and value creation of variation order in construction  
project : Case study of a residential building project in Bangkok**

นัฐพล ท้วมพงษ์\* ปิยนุช เวทย์วิวัฒน์

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Nattapol Thumpong\* Piyanut Wethyavivorn

Structural Technology for the Built Environment Program, Department of Civil Engineering,

Faculty of Engineering, Kasetsart University

50 Ngamwongwan Rd, Chatuchak Bangkok 10900 Thailand

\*Corresponding author Email: nattapol.thum@ku.th

(Received: February 16, 2022; Revised: May 25, 2022; Accepted: May 30, 2022)

**บทคัดย่อ**

งานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างมักจะมีผลกระทบต่อระยะเวลาและต้นทุนของโครงการ แต่ก็สามารถสร้างคุณค่าต่อโครงการได้เช่นเดียวกัน ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสาเหตุและการเพิ่มคุณค่าของงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้าง โดยกรณีศึกษาคืออาคารชุดพักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีงานเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นทั้งหมด 401 งาน ซึ่งจะทำให้การสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องพร้อมแบบสอบถามถึงสาเหตุและผลกระทบต่อคุณค่าของโครงการในด้านต่างๆ จากงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยจากการวิเคราะห์กลุ่มปัจจัย พบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดงานเปลี่ยนแปลง จัดแบ่งกลุ่มปัจจัยได้จำนวน 7 กลุ่ม โดยการตัดสินใจในการออกแบบของเจ้าของงานจะเป็นสาเหตุหลักของงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการนี้ และได้วิเคราะห์คุณค่าที่เกิดจากงานเปลี่ยนแปลง พบว่าไม่ว่าสาเหตุการเปลี่ยนแปลงจะเกิดจากปัจจัยใด ก็สามารถสร้างโอกาสให้เกิดคุณค่าเพิ่มเติมกับโครงการได้ ไม่ว่าจะเป็นการลดต้นทุน การเพิ่มความปลอดภัยให้ผู้ใช้อาคาร การคำนึงถึงควมมีประสิทธิภาพในการบำรุงรักษา และความสอดคล้องกับกฎหมายมากยิ่งขึ้น

**คำสำคัญ:** สาเหตุงานเปลี่ยนแปลง, อาคารชุดพักอาศัย, การสร้างคุณค่า, วิศวกรรมคุณค่า

**ABSTRACT**

The variation orders in construction projects often lead to cost overrun and project delay. However, it may create value to the project in various cases. This research aims to investigate causes of variation order as well as relationship between causes and project value creation. A high-rise residential building in Bangkok with the total of 401 variation orders is selected as a case study.

Structure interview with questionnaire was conducted to identify cause and value creation of variation orders from the experts involved during project construction. Factor analysis revealed 7 groups of factors. Owner's directive changes is the main cause of variation orders in the project. The study further found that regardless of the causes of variation orders, it gives the opportunity to add value to the project in terms of cost reduction, enhance safety, efficiency during operation and maintenance and also compliance to the law and regulations.

**Keyword:** Residential building, Variation order, Value creation, Value engineering.

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมกรรมการก่อสร้างเป็นภาคส่วนที่สำคัญในกระบวนการพัฒนาของประเทศและเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของเกณฑ์ที่ใช้ในมาตรวัดการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ[1] การดำเนินงานก่อสร้างในทุกๆประเภท มักจะพบเจอปัญหาที่สำคัญเรื่องหนึ่งเป็นประจำคือ เรื่องงานเปลี่ยนแปลงและข้อขัดแย้งที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้าง เป็นจะพบเจอเป็นเรื่องปกติ[2] ซึ่งงานเปลี่ยนแปลงมักจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลง การเพิ่มหรือการลดที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพ ปริมาณหรือแผนงาน[3] โดยงานเปลี่ยนแปลงจะเกิดจากความต้องการของเจ้าของงาน ซึ่งอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระหว่างการออกแบบหรือช่วงระหว่างการก่อสร้าง ที่จะเป็นการระบุความต้องการเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาหรือทำให้โครงการมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้งานเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดจากการควบคุมงานของวิศวกรที่ละเลยก็จะมีส่วนด้วยเช่นกัน[4] ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญมากในการควบคุมการออกคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงภายในโครงการก่อสร้าง ซึ่งธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในประเทศไทยมีมูลค่าตลาดคิดเป็นสัดส่วน 8% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (Gross domestic product: GDP) โดยทั่วไปอสังหาริมทรัพย์จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ซึ่งภาคอสังหาริมทรัพย์ประเภทที่อยู่อาศัยมีสัดส่วนสูงสุดประมาณ 2 ใน 3 ของมูลค่าตลาดอสังหาริมทรัพย์ในประเทศไทย แต่ในช่วงปีที่ผ่านมาธุรกิจที่อยู่อาศัยซบเซารุนแรงเนื่องมาจากผลจากการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส (Coronavirus disease

starting in 2019: COVID-19) ส่งผลให้กลุ่มผู้ซื้อทั้งในและต่างประเทศชะลอการตัดสินใจซื้อจึงเป็นเหตุให้ผู้ประกอบการชะลอการเปิดโครงการใหม่[5] จึงทำให้การคาดการณ์ทิศทางธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในช่วงปีหลังผู้ประกอบการพัฒนาที่อยู่อาศัยยังคงเผชิญกับปัจจัยท้าทายอย่างต่อเนื่อง เช่น ความท้าทายในการระบายสินค้าคงเหลือที่จะส่งผลกระทบต่อทางเลือกการลงทุนโครงการใหม่ที่จะเกิดขึ้น ต้นทุนทางธุรกิจที่สูงขึ้นโดยนอกจากที่ดินแล้วยังมีราคาค่าวัสดุก่อสร้างที่ยังมีทิศทางปรับตัวสูงขึ้นต่อเนื่องเป็นต้น[6] ดังนั้นการเปิดตัวโครงการใหม่ หรือโครงการที่กำลังดำเนินงานอยู่จะต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนในเรื่องต้นทุนในการดำเนินโครงการ ซึ่งต้นทุนโดยส่วนหลัก จะแบ่งเป็นค่าที่ดิน ค่าดำเนินงานก่อสร้างและค่าต้นทุนการก่อสร้าง เป็นต้น และในการดำเนินงานก่อสร้างสิ่งที่จะพบเจอในทุกโครงการจะเป็นเรื่องของงานเปลี่ยนแปลงที่จะมีผลกระทบต่อเรื่องระยะเวลาและต้นทุนของโครงการ ซึ่งจะส่งผลต่อกำไรของผู้ประกอบการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยสาเหตุที่ก่อให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงในโครงการก่อสร้างอาคารชุดที่จะส่งผลกระทบต่อโครงการ ซึ่งจะทำให้สามารถจัดกลุ่มปัจจัยสาเหตุ และระบุผลกระทบต่อคุณค่าของโครงการที่เกิดจากสาเหตุของงานเปลี่ยนแปลง เพื่อใช้เป็นข้อพิจารณาสำหรับการลดความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากผลกระทบของงานเปลี่ยนแปลงของโครงการก่อสร้างอาคารชุดต่อไป



โดยจากการสืบค้นงานศึกษาที่ผ่านมาพบว่า งานเปลี่ยนแปลงเป็นสิ่งที่มักจะพบเจอเป็นเรื่องปกติในโครงการก่อสร้างซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงงานหรือเงื่อนไขเดิมจากสัญญาการก่อสร้าง[7] โดยเกิดจากความต้องการของเจ้าของงานหรือเจ้าของโครงการ ซึ่งอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระหว่างการออกแบบหรือช่วงระหว่างการก่อสร้าง เป็นการระบุความต้องการเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาหรือทำให้โครงการมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้งานเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดจากการควบคุมงานของวิศวกรที่ละเลยก็จะมีส่วนด้วยเช่นกัน[4] ซึ่งงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างมักก่อให้เกิดข้อพิพาทหรือข้อขัดแย้งระหว่างการทำงานของฝ่ายต่างๆที่เกี่ยวข้อง จึงเป็นสิ่งสำคัญมากในการหาสาเหตุที่ก่อให้เกิดงานเปลี่ยนแปลง

และจากการศึกษางานวิจัยเรื่องสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้จำแนกสาเหตุตามกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

1) กลุ่มงานเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับเจ้าของงาน (Owner-related variations) ที่มีสาเหตุเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงแผนงาน[7-9], การตัดสินใจที่ล่าช้า[7, 9], ความไม่ชัดเจนของผู้ว่าจ้าง[7], เปลี่ยนแปลงวัสดุโดยผู้ว่าจ้าง[7-11], เปลี่ยนแปลงขอบเขตการทำงาน[7-8, 11], ปัญหาทางการเงินของผู้ว่าจ้าง[7, 9-10], การปรับเปลี่ยนเงินเพิ่มและเงินสำรอง[11] และโครงการขาดเป้าหมายที่ชัดเจน[9]

2) กลุ่มงานเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับที่ปรึกษาโครงการ (Consultant-related variations) ที่มีสาเหตุเกี่ยวข้องกับความซับซ้อนในการออกแบบ[7-9], เปลี่ยนแปลงการออกแบบโดยที่ปรึกษา[7, 9-10], แบบที่ใช้ทำงานขาดความละเอียด[7], ข้อผิดพลาดระหว่างเอกสาร[7-11], เปลี่ยนแปลงวัสดุโดยที่ปรึกษา[7-9], ที่ปรึกษาขาดความรู้เกี่ยวกับวัสดุและอุปกรณ์[9-10], ข้อผิดพลาดจากการออกแบบ[9-10], ที่ปรึกษาใช้ข้อกำหนดที่ไม่สามารถปฏิบัติตามได้ในท้องถิ่น[10], ความ

ไม่พร้อมทางเทคโนโลยีต่อการนำแบบไปใช้งาน[8-10] และขาดข้อมูลที่จำเป็น[9]

3) กลุ่มงานเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับผู้รับจ้างก่อสร้าง (Contractor-related variations) ที่มีสาเหตุเกี่ยวข้องกับความไม่พร้อมทางด้านวัสดุอุปกรณ์[7-10], คนงานไม่มีประสิทธิภาพ[7, 9-10], ขาดการวางแผนงาน[7-9], การจัดซื้อไม่มีประสิทธิภาพ[7, 9], ปัญหาทางการเงินของผู้รับจ้าง[7, 9-10], ขาดการประสานงานระหว่างหน่วยงาน[8-10], ผู้รับจ้างต้องการกำไร[9-10], ผู้รับจ้างขาดประสบการณ์[8-10], จำนวนของผู้รับจ้าง[10], ผู้รับจ้างขาดการมีส่วนร่วมในช่วงออกแบบ[9-10], ผู้รับจ้างดื้อรั้น[10], ข้อผิดพลาดช่วงระหว่างงานก่อสร้าง[8] และการก่อสร้างเป็นไปอย่างรวดเร็ว[9]

4) กลุ่มงานเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยอื่นๆ (Other variations) โดยจะมีสาเหตุที่เกี่ยวข้องคือปัญหาทางการเมือง[10-11], ปัจจัยทางสังคมและวัฒนธรรม[9-10], การเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ[8], เงื่อนไขทางด้านความปลอดภัย[9] และเงื่อนไขทางด้านเศรษฐกิจ[9]

เมื่อเกิดคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงแล้ว ก็มักจะมีผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงการก่อสร้าง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาระบุถึงลักษณะงานเปลี่ยนแปลงที่จะสามารถจำแนกออกมาได้ 2 ประเภทคือ ประเภทงานเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อด้านที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ เช่น การเพิ่มคุณภาพ การลดต้นทุน เป็นต้นส่วนอีกประเภทคืองานเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อด้านเชิงลบต่อโครงการ ซึ่งจะเป็นงานเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงการลดลง หรือมูลค่าของเจ้าของงานเพิ่มขึ้น[12] จึงทำให้ผลที่เกิดจากงานเปลี่ยนแปลงจำเป็นที่จะต้องให้ความสำคัญเพื่อที่จะควบคุมหรือจัดการให้เหมาะสม ซึ่งในหลายประเทศได้ให้ความสำคัญในเรื่องนี้จึงมีการออกคู่มือแนวทางสำหรับปรับใช้ ยกตัวอย่างเช่น คู่มือแนวทางความสำเร็จในการก่อสร้าง เล่มที่ 4 ความเสี่ยงและการจัดการด้านคุณค่า ซึ่งเป็นแนวทางขอแนะนำในการจัดการความเสี่ยงและการจัดการด้านคุณค่าที่จะพื้นฐานทำให้โครงการประสบความสำเร็จ โดยคู่มือได้กล่าวถึง Whole-

life costing เป็นองค์ประกอบสำคัญของการจัดการมูลค่า ซึ่งจะครอบคลุมค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับสิ่งอำนวยความสะดวกตั้งแต่เริ่มโครงการจนถึงขั้นตอนการทำลาย [13] โดยผู้วิจัยได้นำประเด็นที่ควรพิจารณาในการประเมินการจัดการด้านคุณค่าดังนี้

1) ด้านสุขภาพและความปลอดภัยในการใช้ชีวิต (Health and Safety) ที่จะเป็นลักษณะอาคารที่จะช่วยลดความเสี่ยงด้านสุขภาพต่อร่างกายและจิตใจ อีกทั้งยังต้องเป็นอาคารที่ลดความเสี่ยงที่จะเกิดการบาดเจ็บต่อร่างกายและการเสียชีวิตของผู้อยู่อาศัย เช่น การออกแบบเพื่อความสะดวกต่อการอพยพ เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินได้อย่างเหมาะสม[14]

2) ด้านความยั่งยืน (Sustainability) คือ แนวคิดที่ผสมผสานองค์ประกอบการออกแบบที่ยั่งยืนเข้ากับการวางแผน การออกแบบ การก่อสร้าง การดำเนินงาน และการบำรุงรักษาส่งอำนวยความสะดวก เพื่อเพิ่มและสร้างสมดุลระหว่างต้นทุนตลอดอายุของสิ่งอำนวยความสะดวก ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพรวมถึงความปลอดภัยและความมั่นคงของผู้อยู่อาศัย[15]

3) ด้านคุณภาพการออกแบบ (Design quality) คือ การออกแบบอาคารเพื่อตอบสนองความต้องการ ความคาดหวัง และความพึงพอใจของผู้ใช้งานท้ายที่สุด ซึ่งเป็นการแสดงออกถึงคุณภาพของอาคารโดยตรง[16]

4) ด้านความสามารถในการดำเนินการก่อสร้าง (Buildability) คือ การออกแบบเพื่ออำนวยความสะดวกในการก่อสร้าง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความต้องการของอาคารเมื่อแล้วเสร็จ[17]

5) ด้านการใช้งานและบำรุงรักษา (Operation and maintenance: O&M) ที่จำเป็นจะต้องทำให้สามารถดำเนินงานในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (เช่น การใช้พลังงานน้อยที่สุดสำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกภายในอาคาร) และการบำรุงรักษาอาคารอย่างมีประสิทธิภาพ (เช่น การซ่อมแซมส่วนหน้าอาคารที่ทรุดโทรมอย่างเหมาะสมที่สุด)[18]

6) ด้านศักยภาพของโครงการ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการ โดยจะสอดคล้องกับทฤษฎี Iron Triangle ที่ จะระบุถึงประสิทธิภาพของโครงการจะต้องประกอบด้วย การก่อสร้างเสร็จตรงตามเวลาที่กำหนด มีค่าใช้จ่ายอยู่ในงบประมาณ รวมถึงคุณภาพการก่อสร้างต้องเป็นไปตามที่กำหนด[19]

## 2. วิธีการดำเนินงานศึกษา

การดำเนินงานวิจัยจะแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ช่วง คือ 1)การรวบรวมข้อมูล 2)แบบสอบถามและการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้อง 3)การวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัย

### 2.1 การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1) การรวบรวมข้อมูลรายละเอียดของโครงการรวมถึงข้อมูลงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงในโครงการที่จะนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา และ 2)การรวบรวมข้อมูลปัจจัยสาเหตุและคุณค่าของโครงการจากงานวิจัยที่ผ่านมา

โดยข้อมูลงานเปลี่ยนแปลงที่นำมาใช้เป็นกรณีการศึกษาจะเป็นโครงการประเภทอาคารชุด อยู่ในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานครที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ ตั้งแต่ปี 2560-2564 จำนวน 1 โครงการ มีขนาดพื้นที่ประมาณ 12,000 ตารางเมตร เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูงกว่า 40 ชั้น จำนวน 2 อาคาร และมีคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานก่อสร้างจำนวน 401 งาน โดยข้อมูลจะประกอบไปด้วย คำสั่งงานเปลี่ยนแปลง ประเภทงานเปลี่ยนแปลง สาเหตุโดยสรุปของคำสั่งงานเปลี่ยนแปลง ค่าใช้จ่ายของคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงและระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปจากแผนงานการดำเนินงานก่อสร้าง และข้อมูลปัจจัยสาเหตุที่ก่อให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงภายในโครงการก่อสร้างและปัจจัยด้านคุณค่าสำหรับการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการออกคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงจะเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมากำหนดรูปแบบและตัวแปรที่จะใช้ในการสร้างแบบสอบถามต่อไป

## 2.2 แบบสอบถามและการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานในช่วงของแบบสอบถามและการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้อง จะแบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1) จัดทำแบบสอบถามเพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหา(Content Validity) ที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือในงานวิจัย โดยชุดแบบสอบถามที่ใช้จะถูกสร้างขึ้นจากปัจจัยที่มาจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แบบสอบถามจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 สอบถามถึงปัจจัยที่เป็นสาเหตุของคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างอาคารชุด และส่วนที่ 2 สอบถามถึงผลกระทบจากคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างอาคารชุด การให้คะแนนสาเหตุและผลกระทบจะใช้มาตรวัดของลิเคิร์ต (Likert Rating Scales) แบ่งออกเป็น 1-5 คะแนน (1 ไม่เกี่ยวข้อง/ไม่ส่งผลกระทบเลย จนถึง 5 เกี่ยวข้องมากที่สุด/ส่งผลกระทบมากที่สุด) โดยแบบสอบถามจะนำไปใช้ในการสอบถามกับผู้ที่มีประสบการณ์ด้านสายงานก่อสร้างอาคารสูงจำนวน 12 คนที่มีประสบการณ์ในด้านที่ปรึกษาหรือด้านผู้ควบคุมงานไม่ต่ำกว่า 5 ปี โดยจะมี 5 คนที่มีประสบการณ์มากกว่า 20 ปี เพื่อเป็นการตรวจสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหาก่อนที่จะนำไปใช้ในการดำเนินงานวิจัยต่อไป

2) จัดทำแบบสอบถามเพื่อศึกษาสาเหตุและการเพิ่มคุณค่าของงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงการ โดยใช้ข้อมูลงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงกับปัจจัยสาเหตุและผลกระทบด้านคุณค่า ที่ได้จากการสรุปในขั้นตอนการตรวจสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหา นำมาปรับปรุงและสร้างเป็นแบบสอบถามชุดที่สอง โดยแบบสอบถามชุดที่สองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 สอบถามถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดคำสั่งงานเปลี่ยนแปลง และส่วนที่ 2 ผลกระทบจากคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น การให้คะแนนสาเหตุและผลกระทบจะใช้มาตรวัดของลิเคิร์ต (Likert Rating Scales) แบ่งออกเป็น 1-5 คะแนน (1 ไม่เกี่ยวข้อง/ส่งผลกระทบด้านไม่ดีเป็นอย่างมาก จนถึง 5 เกี่ยวข้องมากที่สุด/ส่งผลกระทบด้านดีเป็นอย่างมาก) โดยจะทำการสัมภาษณ์จากผู้ที่เกี่ยวข้องหรืออยู่ในเหตุการณ์ในการออกคำสั่งงาน

เปลี่ยนแปลงจำนวน 4 คน ที่เป็นผู้บันทึกข้อมูลของงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงการ โดยผู้ตอบแบบสอบถามจะอยู่ในหน้าที่ที่ปรึกษาของโครงการและข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถามจะแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งจะสอบถามถึงคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการ 1 คำสั่งงานเปลี่ยนแปลงต่อ 1 ชุดแบบสอบถาม เพื่อที่จะสามารถระบุได้ว่างานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละงาน เกิดจากสาเหตุใดที่เข้ามาเกี่ยวข้องมากที่สุด และผลกระทบจากงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละงานส่งผลต่อปัจจัยใดมากที่สุด ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 1 ข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถาม

| ลำดับ | ตำแหน่ง          | อายุงาน (ปี) | สายงาน |
|-------|------------------|--------------|--------|
| 1     | Project Manager  | 28           | Civil  |
| 2     | Project Manager  | 26           | M&E    |
| 3     | Project Engineer | 20           | Civil  |
| 4     | Project Engineer | 14           | Civil  |

## 2.3 การวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัย

เมื่อดำเนินการเก็บข้อมูลแบบสอบถามชุดที่สองเสร็จสิ้นแล้ว ในส่วนการวิเคราะห์แรกจะทำการนำข้อมูลมาสรุปและวิเคราะห์เพื่อระบุสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงในโครงการแห่งนี้ โดยจะเลือกใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ ปัจจัย (Exploratory factor analysis: EFA) เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย และเป็นการลดข้อมูลจำนวนปัจจัย จึงทำให้สามารถจัดกลุ่มปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ในกลุ่มปัจจัยเดียวกันได้อย่างเหมาะสม และจากนั้นจะทำการนำมาสรุปปัจจัยสาเหตุที่พบความเกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงในโครงการในโครงการแห่งนี้

การวิเคราะห์ส่วนที่ 2 จะทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ โดยจัดทำสัมภาษณ์เพื่อศึกษาเชิงลึกถึงสาเหตุและผลกระทบต่อคุณค่าของโครงการจากงานเปลี่ยนแปลงที่

เกิดขึ้น โดยใช้ข้อมูลงานเปลี่ยนแปลงที่ได้จากผลการวิเคราะห์การจัดลำดับสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อคุณค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดของโครงการ โดยจะทำการสัมภาษณ์กลุ่มผู้ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงในโครงการแห่งนี้ ในลักษณะการสนทนากลุ่ม (Focus group) ที่จะเน้นสอบถามถึงสาเหตุ ผลกระทบ และความสำคัญของงานเปลี่ยนแปลงในแต่ละงาน เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการอาคารชุดแห่งนี้ได้เป็นอย่างดี และสามารถสรุปออกมาสำหรับใช้เป็นข้อพิจารณาในการลดความเสี่ยงจากคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงสำหรับโครงการต่อไป

### 3. ผลการวิเคราะห์งานวิจัย

จากการดำเนินงานศึกษาทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมและสอบถามมาสรุปผลการวิเคราะห์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

#### 3.1 สาเหตุที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงภายในโครงการ

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถรวบรวมปัจจัยสาเหตุที่จะเกี่ยวข้องกับการก่อให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงภายในโครงการก่อสร้างได้ทั้งสิ้น 36 ปัจจัย กับปัจจัยผลกระทบต่อโครงการทั้ง 8 ปัจจัยและเมื่อนำปัจจัยที่ได้มาไปดำเนินการตรวจสอบความเที่ยงตรง โดยสอบถามจากผู้มีประสบการณ์ด้านงานก่อสร้างประเภทงานอาคาร และเมื่อสรุปผลทำให้ได้ปัจจัยสาเหตุที่จะนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการทำงานวิจัยต่อไปทั้งสิ้น 38 ปัจจัย และปัจจัยผลกระทบต่อโครงการจำนวน 6 ปัจจัย รวมถึงค่าใช้จ่ายและระยะเวลาก่อสร้าง ซึ่งผลจากการรวบรวมแบบสอบถามจะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงในโครงการ เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของแต่ละสาเหตุและเพื่อลดจำนวนตัวแปรลง จึงได้ใช้วิธีการทำวิเคราะห์องค์ประกอบปัจจัย โดยเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมการตอบแบบสอบถามจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการมาวิเคราะห์ จะเลือกใช้ปัจจัยที่มีค่าสหสัมพันธ์มากกว่า 0.30 สำหรับนำไปวิเคราะห์

องค์ประกอบปัจจัยโดยวิธีการ Varimax rotation จะทำให้จากปัจจัยทั้งหมด 38 ปัจจัย จะเหลือเพียง 21 ดังตารางที่ 2 ปัจจัยที่มีค่าสหสัมพันธ์สูงกว่า 0.30 และเมื่อตรวจสอบความเหมาะสมของกลุ่มตัวอย่างในการวิเคราะห์องค์ประกอบ โดยใช้วิธีสถิติ Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO) และค่า Bartlett's test of Sphericity จะได้ค่า KMO เท่ากับ 0.584 ซึ่งมากกว่า 0.50 และจัดอยู่ในระดับพอรับได้ (Miserable) [20] และเมื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติจะพบว่ามีค่า Sig. = 0.000 แสดงว่าปัจจัยต่างๆ มีความสัมพันธ์กัน

ตารางที่ 2 สรุปปัจจัยสาเหตุที่มีค่าสหสัมพันธ์มากกว่า 0.30

| สรุปปัจจัยสาเหตุที่มีค่าสหสัมพันธ์มากกว่า 0.30    |
|---------------------------------------------------|
| FC01 ความไม่พร้อมด้านวัสดุและอุปกรณ์ของผู้รับจ้าง |
| FC03 ความซับซ้อนจากการออกแบบ                      |
| FC04 การเปลี่ยนแปลงแผนงานการก่อสร้าง              |
| FC05 เปลี่ยนจากการตัดสินใจล่าช้าของเจ้าของงาน     |
| FC06 การเปลี่ยนแปลงการออกแบบโดยที่ปรึกษา          |
| FC08 แบบก่อสร้างขาดความละเอียดหรือไม่ชัดเจน       |
| FC09 ขาดการวางแผนการดำเนินงาน                     |
| FC10 การจัดซื้อที่ไม่มีประสิทธิภาพของผู้รับจ้าง   |
| FC15 เปลี่ยนเนื่องจากปัญหาการเงินของเจ้าของงาน    |
| FC16 การเปลี่ยนแปลงวัสดุโดย ที่ปรึกษา             |
| FC17 ที่ปรึกษาขาดความรู้เกี่ยวกับวัสดุและอุปกรณ์  |
| FC18 ข้อผิดพลาดจากขั้นตอนการออกแบบ                |
| FC22 ผู้รับจ้างต้องการกำไร                        |
| FC23 ผู้รับจ้างขาดประสบการณ์การทำงาน              |
| FC24 จำนวนผู้รับจ้างทั้งหมดของโครงการ             |
| FC28 การปรับเปลี่ยนเงินสำรองของโครงการ            |
| FC30 โครงการขาดเป้าหมายที่ชัดเจน                  |
| FC31 การขาดข้อมูลในการทำงาน                       |
| FC32 เปลี่ยนแปลงเนื่องจากก่อสร้างอย่างรวดเร็ว     |
| FC34 เปลี่ยนแปลงจากเงื่อนไขสภาวะเศรษฐกิจ          |
| FC37 การเปลี่ยนแปลงเพื่อธุรกิจ โดยเจ้าของงาน      |

ตารางที่ 3 จัดอันดับค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงหลังการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยวิธี Varimax

| รหัส                                                                       | สาเหตุงานเปลี่ยนแปลง                              | น้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย    | อันดับ   |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------|--------------|----------|
| <b>องค์ประกอบที่ 2 “การตัดสินใจในการแก้ไขแบบของเจ้าของงานและผู้ออกแบบ”</b> |                                                   |         | <b>2.324</b> | <b>1</b> |
| FC37                                                                       | การเปลี่ยนแปลงเพื่อธุรกิจ โดยเจ้าของงาน           | .781    | 3.130        |          |
| FC18                                                                       | ข้อผิดพลาดจากขั้นตอนการออกแบบ                     | .739    | 2.367        |          |
| FC06                                                                       | การเปลี่ยนแปลงการออกแบบโดยที่ปรึกษา               | .604    | 2.279        |          |
| FC05                                                                       | เปลี่ยนเนื่องจากการตัดสินใจล่าช้าของเจ้าของงาน    | .624    | 1.521        |          |
| <b>องค์ประกอบที่ 6 “รายละเอียดแบบระหว่างก่อสร้าง”</b>                      |                                                   |         | <b>1.435</b> | <b>2</b> |
| FC08                                                                       | แบบก่อสร้างขาดความละเอียดหรือไม่ชัดเจน            | .858    | 1.446        |          |
| FC03                                                                       | ความซับซ้อนจากการออกแบบ                           | .735    | 1.424        |          |
| <b>องค์ประกอบที่ 5 “การออกแบบและเลือกใช้วัสดุของผู้ออกแบบ”</b>             |                                                   |         | <b>1.197</b> | <b>3</b> |
| FC16                                                                       | การเปลี่ยนแปลงวัสดุโดย ที่ปรึกษา                  | .491    | 1.327        |          |
| FC31                                                                       | การขาดข้อมูลในการทำงาน                            | .647    | 1.177        |          |
| FC17                                                                       | ที่ปรึกษาขาดความรู้เกี่ยวกับวัสดุและอุปกรณ์       | .867    | 1.087        |          |
| <b>องค์ประกอบที่ 3 “การดำเนินงานระหว่างก่อสร้างของผู้รับเหมา”</b>          |                                                   |         | <b>1.153</b> | <b>4</b> |
| FC09                                                                       | ขาดการวางแผนการดำเนินงาน                          | .402    | 1.252        |          |
| FC32                                                                       | การเปลี่ยนแปลงเนื่องการก่อสร้างเป็นไปอย่างรวดเร็ว | .750    | 1.217        |          |
| FC22                                                                       | ผู้รับจ้างต้องการกำไร                             | .636    | 1.082        |          |
| FC04                                                                       | การเปลี่ยนแปลงแผนงานการก่อสร้าง                   | .680    | 1.062        |          |
| <b>องค์ประกอบที่ 7 “ปัญหาจากผู้รับเหมา”</b>                                |                                                   |         | <b>1.034</b> | <b>5</b> |
| FC24                                                                       | จำนวนผู้รับจ้างทั้งหมดของโครงการ                  | .765    | 1.057        |          |
| FC23                                                                       | ผู้รับจ้างขาดประสิทธิภาพการทำงาน                  | .812    | 1.010        |          |
| <b>องค์ประกอบที่ 4 “การจัดซื้อวัสดุของผู้รับเหมา”</b>                      |                                                   |         | <b>1.029</b> | <b>6</b> |
| FC01                                                                       | ความไม่พร้อมทางด้านวัสดุและอุปกรณ์ของผู้รับจ้าง   | .870    | 1.040        |          |
| FC10                                                                       | การจัดซื้อที่ไม่มีประสิทธิภาพของผู้รับจ้าง        | .892    | 1.017        |          |
| <b>องค์ประกอบที่ 1 “ภาวะเศรษฐกิจและการเงินของเจ้าของงาน”</b>               |                                                   |         | <b>1.027</b> | <b>7</b> |
| FC28                                                                       | การปรับเปลี่ยนเงินสำรองของโครงการ                 | .867    | 1.052        |          |
| FC15                                                                       | การเปลี่ยนเนื่องจากปัญหาการเงินของเจ้าของงาน      | .830    | 1.040        |          |
| FC34                                                                       | การเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากเงื่อนไขสถานะเศรษฐกิจ    | .577    | 1.010        |          |
| FC30                                                                       | โครงการขาดเป้าหมายที่ชัดเจน                       | .514    | 1.005        |          |

โดยผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยพบว่า มี 7 องค์ประกอบ ที่มีค่าไอเกน (Eigen value) ในแต่ละองค์ประกอบมากกว่า 1 และมีตัวบ่งชี้อย่างน้อย 2 ปัจจัย จึงทำให้สรุปได้ว่า องค์ประกอบของปัจจัยสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับงาน

เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการแห่งนี้มีทั้งหมด 7 องค์ประกอบ โดยมีค่าไอเกน (Eigen value) เท่ากับ 1.17 และมีค่าร้อยละความแปรปรวนสะสมเท่ากับ 59.40

เมื่อพิจารณาถึงค่าสถิติของแต่ละองค์ประกอบสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงภายในโครงการแห่งนี้ ภายหลังการวิเคราะห์องค์ประกอบ จะสามารถจัดอันดับเรียงลำดับความสำคัญของสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงในโครงการแห่งนี้มากที่สุด ได้ดังตารางที่ 3 ที่จะจัดเรียงอันดับตามค่าเฉลี่ยของกลุ่มสาเหตุที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงการทั้งหมด 402 งาน โดยจะสามารถสรุปและอธิบายรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงการแห่งนี้ ได้ดังนี้

#### 1) การตัดสินใจในการแก้ไขแบบของเจ้าของงานและผู้ออกแบบ

การตัดสินใจในการแก้ไขแบบของเจ้าของงานและผู้ออกแบบเป็นสาเหตุหลักที่พบว่าการเกี่ยวข้องกับการเกิดงานเปลี่ยนแปลงในหลายๆงานภายในโครงการแห่งนี้ ซึ่งงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเพื่อสนับสนุนด้านธุรกิจของเจ้าของงาน เช่น การเพิ่มระบบตรวจป้ายทะเบียนรถยนต์และจักรยานยนต์ ที่จะทำให้ลูกค้าที่จะเข้ามาพักอาศัยในโครงการได้รับความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม และในการตัดสินใจสำหรับการดำเนินการแก้ไขแบบก่อสร้างในบางครั้งก็จะเกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นจากข้อผิดพลาดในระหว่างขั้นตอนการออกแบบ เช่น กรณีการสั่งเพิ่มปริมาณอุปกรณ์หัวสปริงเกอร์ สำหรับใช้ในการดับเพลิงบริเวณทางเดินชั้นห้องพัก เนื่องจากในการออกแบบเดิม ยังมีปริมาณที่ไม่เพียงพอตามมาตรฐานของสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ และก็จะมีการเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการออกแบบโดยที่ปรึกษา เช่น การปรับขนาดโครงสร้างบ่อน้ำพุ เพื่อให้ได้ระยะถนนที่เพิ่มขึ้น สะดวกต่อการสัญจรภายในโครงการ ซึ่งในบางครั้งอาจจะมีเรื่องการตัดสินใจที่ล่าช้าของเจ้าของงานที่จะเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น กรณีการเพิ่มงานเก็บสيفونกระเบื้องใหม่ เนื่องจากมีการย้ายตำแหน่งท่อ Riser ตามความต้องการของเจ้าของงาน เป็นต้น

#### 2) รายละเอียดแบบระหว่างก่อสร้าง

โดยประเด็นเรื่องรายละเอียดแบบระหว่างก่อสร้างที่เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงขึ้นภายในโครงการ มักจะเกิดจากแบบก่อสร้างขาดความละเอียดและไม่ชัดเจน หรืออาจจะเกิดจากความซับซ้อนจากการออกแบบที่จะทำให้นางานจำเป็นที่จะต้องแก้ไขงานเช่นในกรณีการเพิ่มโครงสร้างเหล็กค้ำยันทางเชื่อม เนื่องจากในแบบเดิมมีรายละเอียดการค้ำยันที่ไม่ครบถ้วนซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างนั้นมีความซับซ้อนกันหลายชั้น จึงทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้น

#### 3) การออกแบบและเลือกใช้วัสดุของผู้ออกแบบ

สาเหตุที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและเลือกใช้วัสดุของผู้ออกแบบนั้นจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงวัสดุโดยที่ปรึกษาซึ่งบางครั้งอาจจะเกิดจากการขาดข้อมูลที่จำเป็นต่อการเลือกใช้หรือเกิดจากที่ปรึกษาเองนั้นมีความเข้าใจเกี่ยวกับวัสดุและอุปกรณ์ที่เลือกใช้ไม่เพียงพอจึงเป็นเหตุให้จำเป็นที่จะต้องดำเนินการแก้ไขเพื่อให้วัสดุที่จะนำมาใช้ในโครงการตรงต่อเงื่อนไขด้านความต้องการและคุณภาพเหมาะสมต่อโครงการ เช่นในกรณีการเปลี่ยนวัสดุราวกันตกชั้นดาดฟ้าใหม่เนื่องจากวัสดุเดิมไม่สามารถทนต่อแรงกระทำได้ตามที่โครงการต้องการ เป็นต้น

#### 4) การดำเนินงานระหว่างก่อสร้างของผู้รับเหมา

การดำเนินงานระหว่างก่อสร้างของผู้รับเหมามีส่วนทำให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงขึ้น โดยส่วนใหญ่จะพบเจอจากการขาดการวางแผนในการดำเนินงานของทางเจ้าของงาน ที่จะทำให้งานเกิดข้อผิดพลาดหรือในบางครั้งเนื่องจากการดำเนินงานก่อสร้างที่เป็นไปอย่างรวดเร็วแล้วจะมีการแก้ไขภายหลังทำให้ผู้รับจ้างต้องการที่จะเก็บค่าดำเนินงานแก้ไขนี้เป็นกำไรของทางผู้รับจ้าง เนื่องจากส่งผลต่อการดำเนินงานหรือแผนงานการก่อสร้างเช่นในกรณีงานเรียกเก็บค่าเช่าอุปกรณ์กระเช้าเพิ่มเนื่องจากทางเจ้าของงานมีความต้องการเร่งรัดให้สามารถติดตั้งลิฟต์ได้ก่อนกำหนด เป็นต้น

### 5) ปัญหาจากผู้รับเหมา

ปัญหาจากผู้รับเหมาที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงขึ้นได้ซึ่งจะเกิดจากเรื่องจำนวนผู้รับเหมาทั้งหมดภายในโครงการที่จะมีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้งานของเจ้าของงานหากผู้รับจ้างชุดก่อนหน้ามีความสามารถหรือมีประสิทธิภาพในการทำงานไม่ตรงต่อความต้องการของเจ้าของงาน เช่น งานเพิ่มลดงานทาสีวงกบและบานประตูห้องน้ำที่เกิดจากผู้รับจ้างเดิมมีการเก็บงานได้ไม่ตรงต่อความต้องการของเจ้าของงาน จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนผู้รับผิดชอบ

### 6) การจัดซื้อวัสดุของผู้รับเหมา

การจัดซื้อวัสดุของผู้รับเหมาเป็นงานเปลี่ยนแปลงที่ส่วนใหญ่เกิดจากความไม่พร้อมทางด้านอุปกรณ์ของผู้รับจ้าง ซึ่งในบางครั้งเกิดจากการที่ฝ่ายจัดซื้อของทางผู้รับเหมาไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการดำเนินการจัดหาอุปกรณ์หรือวัสดุที่จะนำมาใช้ภายในโครงการ จึงเป็นเหตุที่ทำให้เกิดคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงเพื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาในส่วนนี้เช่นในกรณี การเปลี่ยนแปลงท่อสายอุปกรณ์ตรวจจับเพลิงไหม้ ซึ่งวัสดุเดิมที่นำมาใช้ในโครงการนั้นไม่เพียงพอและไม่สามารถจัดหาเพิ่มได้อีกเนื่องจากติดปัญหาในด้านการผลิตจึงเป็นเหตุที่ทำให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงขึ้น

### 7) ภาวะเศรษฐกิจและการเงินของเจ้าของงาน

งานเปลี่ยนแปลงที่มีสาเหตุมาจากภาวะเศรษฐกิจและการเงินของเจ้าของงานนั้นพบเจอน้อยมากภายในโครงการ ซึ่งส่วนใหญ่ของปัจจัยนี้จะเกิดจากการที่โครงการจำเป็นที่จะต้องมีการปรับเปลี่ยนเงินสำรองของโครงการ หรืออาจจะเกิดมาจากปัญหาทางการเงินของเจ้าของงานหรือด้วยสภาพเงื่อนไขทางเศรษฐกิจในปัจจุบันจึงเป็นเหตุให้โครงการมีการตัดสินใจเลือกที่จะใช้เงินให้คุ้มค่าที่สุด เช่นในกรณีการเปลี่ยนแปลงวัสดุบานประตูห้องน้ำเป็นไม้เทียมแทนการใช้ไม้จริงซึ่งมีผลต่อต้นทุนและทำให้สะดวกต่อการใช้งานและดูแลรักษาอีกด้วย

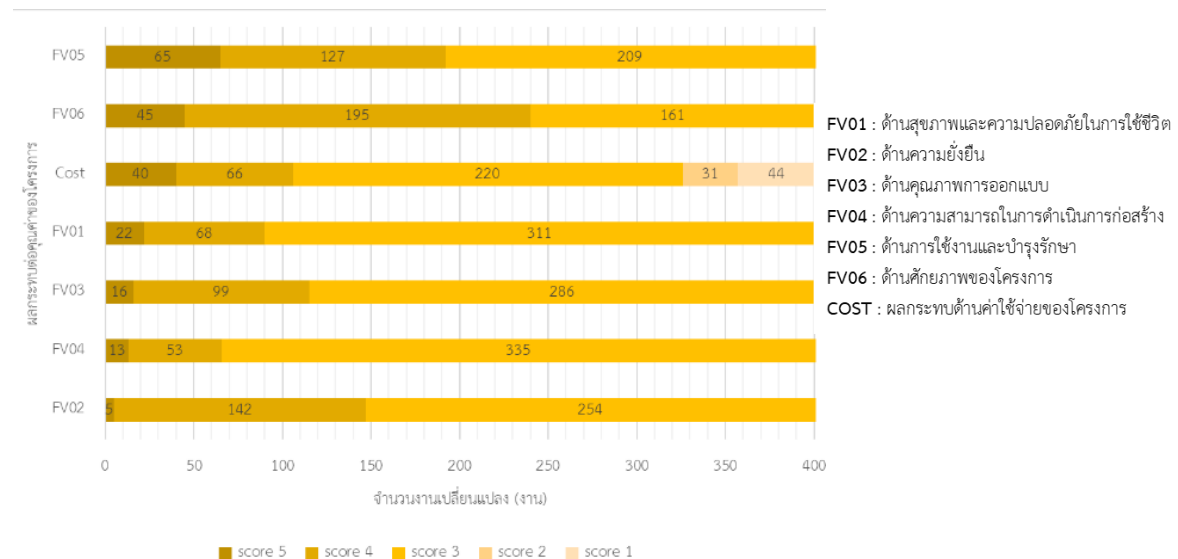
## 3.2 ผลจากคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการแห่งนี้

จากการรวบรวมข้อมูลและการสอบถามผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการสามารถนำมาสรุปจำนวนงานเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อคุณค่าของโครงการรวมถึงค่าใช้จ่ายและระยะเวลาของโครงการได้ตามรูปภาพที่ 1 โดยในงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโครงการแห่งนี้ ไม่มีงานใดเลยที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาของโครงการจึงจะไม่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ และจากผลการสรุปจะพบว่างานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการแห่งนี้จำนวน 401 งาน มีจำนวนงานเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลในระดับ 5 คะแนน(ส่งผลดีเป็นอย่างมากต่อโครงการ) ในด้านการใช้งานและบำรุงรักษาของโครงการ(FV05) เกิดขึ้นมากที่สุดจำนวน 65 งานเปลี่ยนแปลง (ประมาณ 16% ของงานเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโครงการ) แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วจะพบว่าส่วนใหญ่จะส่งผลต่อการเพิ่มคุณค่าในด้านศักยภาพของโครงการ เป็นจำนวนมากกว่า 240 งาน คิดเป็นประมาณร้อยละ 60 จากจำนวนงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งหมด 401 งาน โดยงานเปลี่ยนแปลงที่เหลือนจะไม่เกิดผลกระทบเชิงลบต่อคุณค่าในด้านศักยภาพของโครงการเลย ในส่วนผลกระทบด้านค่าใช้จ่ายของโครงการนั้นพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงจำนวน 220 งาน คิดเป็นประมาณร้อยละ 55 ส่งผลกระทบในการเพิ่มค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง (ค่าใช้จ่ายเพิ่มมากกว่า 10,000 บาท แต่ไม่เกิน 500,000 บาท) มีเพียง 44 งาน คิดเป็นประมาณร้อยละ 11 ที่ส่งผลกระทบในการเพิ่มค่าใช้จ่ายในระดับสูง (มากกว่า 1,000,000 บาท) และงานเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลทำให้เกิดการลดค่าใช้จ่ายในโครงการมีจำนวน 40 งาน คิดเป็นประมาณร้อยละ 10 ของงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งหมดของโครงการ

เมื่อทำการสรุปข้อมูลจากการรวบรวมข้อมูลแบบสอบถามและรายงานงานเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลกระทบต่อคุณค่าของโครงการรวมถึงผลกระทบด้านค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างของโครงการ ในระดับเชิงบวกเป็นอย่างมาก

ต่อโครงการจำนวน 15 อันดับแรก จะพบว่าสาเหตุที่เกี่ยวข้องมากที่สุดเกิดจากข้อผิดพลาดจากขั้นตอนการออกแบบ(FC18) จำนวน 9 งาน ซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ในการตัดสินใจในการแก้ไขแบบของเจ้าของงานและผู้ออกแบบ(องค์ประกอบที่ 2) และยังมีสาเหตุในองค์ประกอบ 2 ที่พบเจอมากรองลงมาคือการเปลี่ยนแปลงการออกแบบโดยที่ปรึกษา(FC06) ที่พบว่าเป็นสาเหตุที่เกี่ยวข้องจำนวน 7 งาน นอกจากนี้ยังมีสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับข้อผิดพลาดด้านเอกสารต่างๆ ของ

โครงการ(FC12) และงานเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับเรื่องความปลอดภัย(FC33) ที่พบเจอในงานเปลี่ยนแปลงจำนวน 7 งาน ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้ไม่ได้อยู่ในองค์ประกอบใดๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบปัจจัย อาจจะเนื่องจากข้อจำกัดในการวิเคราะห์ข้อมูลจึงไม่สามารถระบุองค์ประกอบได้ หรือเนื่องจากปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่เกิดโดยมีปัจจัยภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ไม่สามารถควบคุมได้ แต่ก็ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่สำคัญที่พบเจอในโครงการแห่งนี้และส่งผลต่อโครงการเป็นอย่างมาก



รูปที่ 1 สรุปจำนวนงานเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโครงการที่ส่งผลกระทบต่อคุณค่าของโครงการในแต่ละด้าน

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเจาะลึกลงไปใบรายละเอียดของงานเปลี่ยนแปลง 5 อันดับแรก ที่ส่งผลเชิงบวกเป็นอย่างมากต่อโครงการ โดยทำการนำกลับไปสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้ที่เกี่ยวข้อง เพื่อสืบค้นและยืนยันสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลง รวมถึงผลจากงานเปลี่ยนแปลงทั้ง 5 งาน และสามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

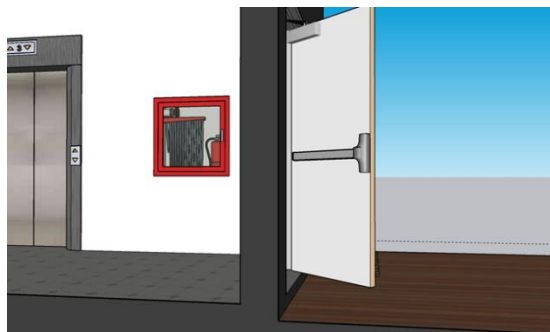
1) งานยกระดับพื้นโถงลิฟต์ดับเพลิง และชานพักบันได ชั้น 45

จากการสัมภาษณ์จะทราบว่างานเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างแล้วพบเจอปัญหาจากแบบเนื่องจากระดับพื้นบริเวณพื้นที่ภายนอกอาคารมีระดับเท่ากับพื้นของห้องโถงลิฟต์ดับเพลิงและห้องบันไดหนีไฟ

ทำให้มีการคำนึงถึงช่วงเวลาที่ฝนตกหนักและระบายไม่ทัน จะทำให้น้ำไหลลงไปสู่ห้องลิฟต์ รวมถึงไหลไปในห้องบันไดหนีไฟได้ ซึ่งสรุปได้ว่างานเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นจากข้อผิดพลาดจากการออกแบบ และเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้อยู่อาศัยรวมถึงทรัพย์สินของโครงการ การแก้ไขจึงทำการยกระดับพื้นในห้องขึ้นแทนการยกตั้งขอบพื้น เพื่อไม่ให้ขัดต่อข้อบังคับของทางหนีไฟที่จะไม่ให้มีสิ่งกีดขวางขณะใช้งาน ทำให้งานแก้ไขนี้ส่งผลต่อการเพิ่มค่าใช้จ่ายขึ้นในระดับปานกลาง แต่ส่งผลต่อการเพิ่มคุณค่า เช่น ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อทรัพย์สินของโครงการ รวมถึงการใช้งานบันไดในช่วงเวลาฉุกเฉิน อีกทั้งยังทำให้



สามารถลดการใช้ไม้แบบขนาดเล็กลง ทำให้สามารถลด  
ค่าใช้จ่ายรวมถึงขยะจากการก่อสร้างลงได้เช่นกัน

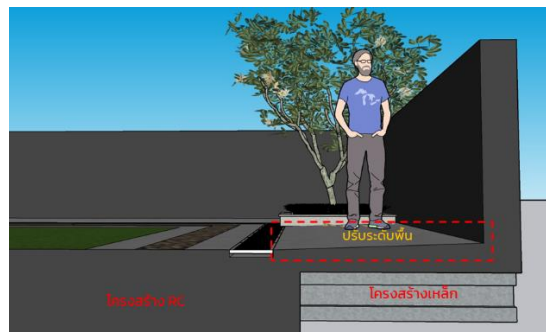


รูปที่ 2 รูปแบบการแก้ไขโดยการยกระดับพื้นภายใน  
โรงลิฟต์ดับเพลิงและชันพักบันไดแทนการยกตั้งขอบ

## 2) งานเทพื้นพื้นที่ข้างพื้นที่หนีไฟทางอากาศชั้น 45

จากการสัมภาษณ์จะทำให้ทราบว่างานเปลี่ยนแปลง  
นี้เกิดขึ้นหลังจากงานก่อสร้างบริเวณนี้เสร็จสิ้นแล้ว และ  
เกิดปัญหาในตอนช่วงที่ฝนตกหนักทำให้พื้นที่บริเวณนี้มี  
น้ำท่วมขัง จึงทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ซึ่ง  
สาเหตุหลักๆ จะเกิดจากการระบายน้ำไม่ทันซึ่งไม่มีท่อ  
ระบายน้ำในบริเวณนี้เนื่องจากโครงสร้างรองรับพื้นส่วนนี้  
เป็นโครงสร้างเหล็กที่ยื่นออกมาจากตัวโครงสร้างอาคาร  
ทำให้ไม่สามารถเดินท่อได้ จึงทำให้ต้องมีการเทพื้น  
ใหม่ เพื่อให้สามารถระบายลงรางระบายน้ำข้างเคียงได้  
โดยสามารถสรุปได้ว่างานเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก  
ข้อผิดพลาดจากการออกแบบที่ไม่ได้คำนึงถึงเหตุฉุกเฉิน  
จากฝนตกหนัก ทำให้น้ำไม่สามารถระบายหรือแห้งได้ทัน  
อีกทั้งอาจเกิดจากความซับซ้อนของพื้นที่ ทำให้การ  
ออกแบบจึงไม่สามารถดำเนินการได้อย่างครอบคลุม และเป็น  
พื้นที่ที่ทางโครงการนำเสนอต่อการขายของโครงการ ทำ  
ให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปลักษณะไปจากเดิมได้ จึงทำให้  
ต้องมีการปรับแก้เกิดขึ้น ซึ่งการแก้ไขทำให้เกิดค่าใช้จ่าย  
เพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง แต่ส่งผลต่อการเพิ่มคุณค่าของ  
การในหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นส่งผลต่อความปลอดภัยเมื่อ  
มีการใช้งานพื้นที่จริงในขณะเกิดเหตุฉุกเฉิน ทำให้สามารถ  
ดูแลรักษา รวมถึงทำความสะอาดได้ง่ายโดยไม่ทำให้พื้นที่  
เปราะเปื้อน อีกทั้งการแก้ไขด้วยวิธีนี้ยังสะดวกกว่าการ

แก้ไขโดยวิธีการเจาะพื้นเพื่อต่อท่อสำหรับทำเป็นจุด  
ระบายเพิ่มเติมเช่นกัน



รูปที่ 3 รูปแบบการแก้ไขโดยการเทพื้นพื้นที่  
บริเวณด้านข้างพื้นที่หนีไฟทางอากาศ

## 3) งานลดสีทาทับหน้าเหล็กรูปพรรณโครงสร้างชั้น พาวลิเลียน

จากการสัมภาษณ์จะทราบว่าพบเจอในขั้นตอน  
ระหว่างการก่อสร้าง โดยตอนกำลังดำเนินการก่อสร้าง  
ทางฝ่ายที่ปรึกษาควบคุมงานตรวจสอบแบบสำหรับ  
ก่อสร้างแล้วพบว่าในโครงสร้างเหล็กชั้นพาวลิเลียน มี  
บางส่วนไม่จำเป็นที่จะต้องทาสีทับหน้าก็ได้ เนื่องจากอยู่  
ในพื้นที่ปิดไม่สามารถมองเห็นได้จากภายนอก จึงเสนอให้  
ทางเจ้าของงานทราบเพื่อลดปริมาณงานลง ทำให้สามารถ  
ลดค่าใช้จ่ายลงไปได้มาก และยังส่งผลต่อการทำงานที่จะ  
ทำได้สะดวกขึ้นลดการทำงานในพื้นที่แคบและเสี่ยงต่อ  
การเกิดอันตราย อีกทั้งยังทำให้แบบก่อสร้างมีความ  
ครบถ้วนตรงต่อความต้องการของเจ้าของงานที่จะทำ  
ให้การลงทุนมีความคุ้มค่าต่อคุณภาพที่ได้รับกลับมา

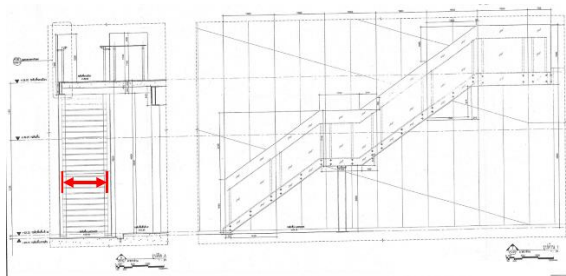
## 4) งานเพิ่มแก้ไขทิศทางประตูเหล็ก ชั้น 6

จากการสัมภาษณ์จะทราบว่าเนื่องจากพื้นที่บริเวณ  
ชั้น 6 เป็นพื้นที่จอดรถ และในขั้นตอนการตรวจสอบเพื่อ  
เปิดใช้งานอาคาร มีการระบุให้แก้ไขเนื่องจากมี  
รายละเอียดการใช้งานประตูไม่เหมือนในเอกสารที่ใช้ยื่น  
ในการตรวจสอบขออนุญาตเปิดใช้อาคาร ทำให้ต้องมีการ  
ออกคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงขึ้น โดยจากการสอบถามพบว่า  
สาเหตุหลักๆ เกิดจากข้อผิดพลาดของเอกสารและ  
เปลี่ยนแปลงเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน รวมถึงเพื่อ

ไม่ให้เกิดในแนวทางของข้อกำหนดพื้นที่ทางหนีไฟด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทิศประตุนี้นี้จะส่งผลทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในระดับปานกลาง แต่ส่งผลต่อการเพิ่มคุณค่า ไม่ว่าจะเป็นด้านความปลอดภัยที่จะทำให้ไม่ขัดขวางเวลาเกิดเหตุฉุกเฉิน เนื่องจากการเป็นการผลักออกไปจากบันได และการแก้ไขสามารถแก้ไขได้โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนทั้งบาน เนื่องจากการเปลี่ยนทั้งบานจะส่งผลต่อการเก็บงานภายหลังอีกมาก และยังทำให้ดำเนินการแก้ไขได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ทำให้แผนงานเกิดความล่าช้า

#### 5) งานขยายบันไดขึ้นหลังคาชั้นโรงหนัง

จากการสัมภาษณ์จะพบว่า เป็นงานเปลี่ยนแปลงความกว้างบันไดสำหรับขึ้นหลังคาห้องดูหนัง ซึ่งพื้นที่ด้านบนหลังคาห้องดูหนังจะเป็นพื้นที่จัดเป็นสวน และมีความสูงจากพื้นด้านหน้าห้องดูหนังมากกว่า 3 เมตร ทำให้แบบเดิมที่ใช้ในการขออนุญาตมีความกว้างของบันไดไม่เพียงพอต่อแนวทางของข้อกำหนดบันไดของอาคารจึงทำให้ทางเจ้าของงานและผู้ออกแบบมีการออกแบบให้ขยายบันไดเพื่อให้เหมาะสมและไม่ให้ติดไปจากภาพสีโฆษณาขายของทางโครงการ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายขึ้นในระดับปานกลาง แต่ส่งผลต่อคุณค่าเช่น ทำให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้นในขณะใช้งานช่วงเวลาฉุกเฉิน การขยายบันไดทำได้ง่ายกว่าการปรับเปลี่ยนรูปแบบเป็นอย่างอื่นเช่นลิฟต์ ซึ่งสะดวกต่อการดูแลรักษาแล้วยังทำให้ไม่เปลืองพลังงานของโครงการอีกด้วย



รูปที่ 4 การขยายความกว้างของบันไดขึ้นพื้นที่จัดสวนบนหลังคาชั้นโรงหนัง จาก 1.20 เมตร เป็น 1.50 เมตร

ต่อมาเมื่อพิจารณางานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการแห่งนี้ 15 อันดับสุดท้าย (งานเปลี่ยนแปลงที่มี

ผลรวมคะแนนอยู่ในระดับต่ำ) ซึ่งหมายถึงจัดอยู่ในงานที่เกิดค่าใช้จ่ายสูงหรือปานกลาง แต่มีการเพิ่มคุณค่าของโครงการอยู่ในระดับน้อยมาก โดยงานเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่จะมีสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับข้อผิดพลาดด้านเอกสารต่างๆ ของโครงการ ซึ่งปัจจัยนี้ไม่ได้ถูกจัดอยู่ในองค์ประกอบใดๆ เนื่องจากด้วยข้อจำกัดหรือเทคนิคทางการวิเคราะห์ทำให้ไม่สามารถจัดปัจจัยนี้เข้ากับปัจจัยอื่นได้ และปัจจัยที่พบเจอรองลงมาจะเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความซับซ้อนจากการออกแบบที่จัดอยู่ในองค์ประกอบด้านรายละเอียดแบบระหว่างก่อสร้าง (องค์ประกอบที่ 6) และด้านองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจในการแก้ไขแบบของเจ้าของงานและผู้ออกแบบ (องค์ประกอบที่ 2)

จากนั้นจะทำการเจาะลึกลงไปรายละเอียดของงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการแห่งนี้ในส่วน 5 อันดับสุดท้าย โดยการนำข้อมูลงานเปลี่ยนแปลงทั้ง 5 งาน กลับไปสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกคำสั่งงานเปลี่ยนแปลงหรืออยู่ในเหตุการณ์การออกคำสั่งงานเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้สามารถทราบว่างานเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่ทั้ง 5 งาน จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการแก้ไขข้อผิดพลาดที่จำเป็นจะต้องดำเนินการเช่นตัวอย่าง

#### 6) งานเปลี่ยนแปลงจำนวนเครื่องปรับอากาศ

จากการสัมภาษณ์ทำให้ทราบว่างานเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นจากข้อผิดพลาดของเอกสารในขั้นตอนการประมาณงานกับเอกสารที่ใช้ในขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้างที่มีปริมาณจำนวนเครื่องปรับอากาศทั้งหมดภายในโครงการไม่เท่ากัน ทำให้ต้องมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของเครื่องปรับอากาศให้มีปริมาณเท่ากัน ซึ่งทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในระดับสูงมาก แต่ก็ไม่ได้ทำให้คุณค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเช่นกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นจะต้องทำ โดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

#### 7) งานเพิ่มเสาเข็มรับถังบำบัดน้ำเสีย

จากการสัมภาษณ์จะพบว่าสาเหตุหลักๆ เกิดจากสภาพไซต์งานที่ต่างไปจากแบบสำหรับก่อสร้าง เนื่องจาก

บริเวณพื้นที่ก่อสร้าง เดิมเป็นอาคารจึงทำให้มีตำแหน่งเสาเข็มเดิมอยู่หลายจุด จึงทำให้พบเจอปัญหาระหว่างการดำเนินการก่อสร้าง ทำให้ต้องมีการเพิ่มเสาเข็มและปรับปรุงฐานรากใหม่ ซึ่งผลจากงานเปลี่ยนแปลงพบว่า ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในระดับสูงมาก แต่ก็ไม่ได้ทำให้คุณค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเช่นกัน

#### 8) งานก่อสร้างห้องตัวอย่าง ประเภท 32 ตารางเมตร

จากการสัมภาษณ์จะพบว่าเป็นงานก่อสร้างห้องตัวอย่างประเภท 32 ตารางเมตรเพิ่มเติม เนื่องจากห้องตัวอย่างเดิมอยู่ภายในพื้นที่โครงการ ซึ่งทางเจ้าของงานมีความต้องการที่จะให้ก่อสร้างเพิ่มเติมในอาคารจริงเพื่อย้ายให้ผู้ที่ต้องการเข้าชม สามารถชมได้ภายในอาคารและมีความต้องการที่จะรื้อในส่วนของภายนอกออกเพื่อให้สามารถเร่งรัดการดำเนินการก่อสร้างภายนอกได้ จึงทำให้สาเหตุหลักๆจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเพื่อธุรกิจของเจ้าของงาน และเพื่อให้สามารถเร่งรัดการทำงานได้ จึงทำให้ผลจากการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดค่าใช้จ่ายขึ้นในระดับสูงมาก แต่ก็ไม่ได้ทำให้คุณค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเช่นกัน มีเพียงแต่สามารถตอบสนองต่อการส่งเสริมธุรกิจของเจ้าของงานมากขึ้นเท่านั้น

## 4. สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นงานศึกษาสาเหตุและการเพิ่มคุณค่าของงานเปลี่ยนแปลงภายในโครงการก่อสร้าง กรณีงานก่อสร้างอาคารชุด โดยจะศึกษาประเด็นสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงในโครงการและความสัมพันธ์ของสาเหตุงานเปลี่ยนแปลงต่อคุณค่าที่เพิ่มขึ้นของโครงการจากงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงในโครงการ

สาเหตุที่เกี่ยวข้องกับงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการ จะสามารถสรุปปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้จำนวน 7 กลุ่มปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ร่วมกัน และเมื่อนำมาพิจารณาค่าเฉลี่ย จะสามารถสรุปออกมาโดยเรียงลำดับสาเหตุที่พบเจอมาก-น้อยได้ดังนี้ (1)การตัดสินใจในการออกแบบของเจ้าของงานและผู้ออกแบบ, (2)รายละเอียด

แบบระหว่างก่อสร้าง, (3)การออกแบบและเลือกใช้วัสดุของผู้ออกแบบ, (4)การดำเนินงานระหว่างก่อสร้างของผู้รับเหมา, (5)ปัญหาจากผู้รับเหมา, (6)การจัดซื้อวัสดุของผู้รับเหมา และ (7)ภาวะเศรษฐกิจและการเงินของเจ้าของงาน

งานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการแห่งนี้ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจในการออกแบบของเจ้าของงานและผู้ออกแบบ โดยสาเหตุมักจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงเพื่อสนับสนุนธุรกิจของเจ้าของงานหรืออาจจะเป็นการแก้ไขการออกแบบเพื่อให้เกิดความเหมาะสมและตรงต่อความต้องการของเจ้าของงานและสนับสนุนให้โครงการตอบโจทย์ต่อกลุ่มลูกค้า และต่อมาเป็นด้านรายละเอียดแบบระหว่างก่อสร้างที่จะพบเจอได้ในหลายงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการแห่งนี้ เนื่องมาจากรายละเอียดแบบระหว่างการก่อสร้างที่จะต้องมีความถูกต้องและชัดเจน ส่วนการออกแบบและเลือกใช้วัสดุของผู้ออกแบบ การดำเนินงานระหว่างก่อสร้างของผู้รับเหมา ปัญหาจากผู้รับเหมา และการจัดซื้อวัสดุของผู้รับเหมาจะพบเจอเป็นสาเหตุหลักหรือมีส่วนเกี่ยวข้องบ้างในบางงานเปลี่ยนแปลงของโครงการแห่งนี้

และในด้านคุณค่าที่เพิ่มขึ้นจากงานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโครงการแห่งนี้จะสรุปได้ว่าองค์ประกอบด้านการตัดสินใจในการออกแบบของเจ้าของงานและผู้ออกแบบเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้คุณค่าของโครงการแห่งนี้ในหลายๆด้านเพิ่มขึ้น แต่ก็จะมีสาเหตุงานเปลี่ยนแปลงอื่นๆที่ไม่สามารถนำมาจัดองค์ประกอบได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความปลอดภัย หรือข้อผิดพลาดด้านเอกสารต่างๆของโครงการที่จะมีส่วนทำให้โครงการมีคุณค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากประเด็นเหล่านี้จะทำให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงที่จะต้องมีการออกคำสั่งเพื่อแก้ไขหรือปรับปรุงให้ดีขึ้นมากกว่าเดิม โดยไม่ทำให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นสูงเกินกว่าความคุ้มค่าที่จะได้รับ

ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่างานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขณะก่อสร้างสามารถถูกมองว่าเป็นการทำวิศวกรรมคุณค่าที่เกิดขึ้นในช่วงของการก่อสร้างได้ แม้ว่าจะไม่ได้ส่งผลดี

เท่าการทำวิศวกรรมคุณค่าในช่วงออกแบบที่ใช้ต้นทุนน้อย แต่เกิดคุณค่ามาก แต่ก็ยังเป็นสิ่งที่จำเป็น เนื่องจากในความเป็นจริงแล้ว แบบก่อสร้างที่นำมาใช้ในช่วงดำเนินการก่อสร้าง ไม่สามารถทำให้เรียบร้อยสมบูรณ์ได้ เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไป อาจทำให้สภาพแวดล้อม ราคาวัสดุ รวมถึงเงื่อนไขต่างๆของเจ้าของงาน หรือแม้กระทั่งกฎหมายอาจมีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการปรับทัศนคติของทีมงานในโครงการก่อสร้างให้มองว่างานเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้น เป็นโอกาสที่จะสามารถเพิ่มคุณค่าหรือลดค่าใช้จ่ายให้กับโครงการได้ แทนที่จะมองเป็นความผิดพลาดของฝ่ายใดฝ่ายหนึ่ง ก็จะทำให้สามารถลดการเกิดข้อขัดแย้งลงได้ และสุดท้ายถ้ามีการจัดการให้ดี ก็จะสามารถลดผลกระทบต่อเวลาและต้นทุน อีกทั้งยังส่งผลดีต่อคุณค่า รวมถึงคุณภาพที่อาจจะเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. I. Alzahrani and M. W. Emsley, "The impact of contractors' attributes on construction project success: A post construction evaluation," *Int. J. Project Manage.*, vol. 31, no. 2, pp. 313–322, 2013.
- [2] F. M. Arain and L. S. Pheng, "Developers' views of potential causes of variation orders for institutional buildings in Singapore," *Archit. Sci. Rev.*, vol. 49, no. 1, pp. 59–74, 2006.
- [3] J. L. Burati Jr, J. J. Farrington, and W. B. Ledbetter, "Causes of quality deviations in design and construction," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 118, no. 1, pp. 34–49, 1992.
- [4] P. Klinchuanchun. (2021, March 18). Industry outlook 2021-2023 : Housing in upcountry (6 major provinces). [Online]. Available: <https://www.krungsri.com/en/research/industry/industry-outlook/Real-Estate/housing-in-upcountry/IO/io-Housing-in-Upcountry-21>.
- [5] Real Estate and Construction. (2021, Jun 1). Home purchases in Bangkok metropolitan area projected to contract for third consecutive year during 2021 (current issue no.3228). [Online]. Available: <https://www.kasikornresearch.com/EN/analysis/k-econ/business/Pages/real-estate-z3228.aspx>.
- [6] A. H. Memon, I. A. Rahman, M. F. Abul Hasan, "Significant Causes and Effects of Variation Orders in Construction Projects," *Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*, 2014, 4494-4502.
- [7] A.H. Al-Dubaisi, "Change Orders in Construction Project In Saudi Arabia," M.S. thesis, King Fahd University of Petroleum & Minerals, 2000, pp. 51-62.
- [8] L. O. Oyewobi, R. Jimoh, B. O. Ganiyu, and A. A. Shittu, "Analysis of causes and impact of variation order on educational building projects," *J. Facil. Manag.*, vol. 14, no. 2, pp. 139–164, 2016.
- [9] P. Keane, B. Sertyesilisik, and A. D. Ross, "Variations and change orders on construction projects," *J. leg. off. dispute resolut. eng. constr.*, vol. 2, no. 2, pp. 89–96, 2010.
- [10] A. Enshassi, F. Arain, and S. Al-Raei, "Causes of variation orders in construction projects in the Gaza Strip," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 16, no. 4, pp. 540–551, 2010.
- [11] A. A. Oladapo, "A quantitative assessment of the cost and time impact of variation orders

- on construction projects,” *J. Eng. Des. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 35–48, 2007.
- [12] F. Manzoor Arain and L. Sui Pheng, “The potential effects of variation orders on institutional building projects,” *Facilities*, vol. 23, no. 11/12, pp. 496–510, 2005.
- [13] Office of Government Commerce (OGC), *Achieving excellence in construction, procurement guide 04 risk and value management*, London, 2003.
- [14] D. C.-W. Ho et al., “A survey of the health and safety conditions of apartment buildings in Hong Kong,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 5, pp. 764–775, 2008.
- [15] NASA, *Report on sustainable design: design for maintainability and total building commissioning*, National Aeronautics and Space Administration Facilities Engineering Division, USA, 2001.
- [16] Ş. Eryürük, F. Kürüm Varolgüneş, and S. Varolgüneş, “Assessment of stakeholder satisfaction as additive to improve building design quality: AHP-based approach,” *J. Housing Built Environ.*, vol. 37, no. 1, pp. 505–528, 2022.
- [17] S. Adams, *Practical Buildability*. London, England: Construction Industry Research & Information Association, 1989.
- [18] J. H. K. Lai, “Building operation and maintenance: manpower in Hong Kong,” *Facilities*, vol. 35, no. 3/4, pp. 220–241, 2017.
- [19] H. Yan, H. Elzarka, C. Gao, F. Zhang, and W. Tang, “Critical success criteria for programs in China: Construction companies’ perspectives,” *J. Manage. Eng.*, vol. 35, no. 1, p. 04018048, 2019.
- [20] H. F. Kaiser, “An index of factorial simplicity,” *Psychometrika*, vol. 39, no. 1, pp. 31–36, 1974.

## การศึกษาแนวทางการเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมโครงสร้างเครื่องบิน

### โดยวิธีบ่มแข็งทางความร้อน

## Study of Strengthening of Aluminum in Aircraft Structure

### by Aging Heat Treatment

จรรรัตน์ พันธุ์สุวรรณ สุรชัย นุ่มสารพัดนึก\*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

200 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลรังสิต อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Jarungrat Pansuwan Surachai Numsaraphatnuek\*

School of Engineering, Faculty of Industrial Engineering,

Eastern Asia University, 200 Moo1 Rangsit-Nakornnayok Rd, Thanyaburi Pathumthani 12110

Thailand

\*Corresponding author Email: numsarapatnuk.s@gmail.com

(Received: December 8, 2021; Revised: June 6, 2022; Accepted: June 15, 2022)

#### บทคัดย่อ

แม้ว่าวัสดุที่ใช้ในการบินและอวกาศมีหลากหลายประเภท เช่น แมกนีเซียม ไททาเนียม เหล็กกล้า และวัสดุคอมโพสิตโพลีเมอร์เสริมเส้นใย โลหะอะลูมิเนียมก็ยังคงเป็นวัสดุโครงสร้างที่สำคัญสำหรับเครื่องบินและยานอวกาศและยังคงได้รับความนิยมในปัจจุบัน เพราะว่า อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่ดีหลายอย่าง เช่น การตัดเฉือนและขึ้นรูปง่าย ราคาไม่แพง มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง ไม่ติดไฟ และน้ำหนักเบาแต่รับแรงกระทำได้สูง สามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้ บทความนี้เริ่มต้นอธิบายถึงการจัดแบ่งประเภทอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมออกเป็น 2 ประเภท คือ อะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดเย็น และอะลูมิเนียมผสมหล่อ อะลูมิเนียมทั้งสองกลุ่มนี้ยังแบ่งออกเป็นอะลูมิเนียมผสมกลุ่มเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการอบชุบทางความร้อนวิธีบ่มแข็งเพื่อให้ตกตะกอน และอะลูมิเนียมผสมกลุ่มเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยวิธีขึ้นรูปเย็น อะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดเย็นและสามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีบ่มแข็งทางความร้อน ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้สร้างชิ้นส่วนโครงสร้างเครื่องบินเพราะมีความแข็งแรงสูงกว่าและความเหนียวสูงกว่าอะลูมิเนียมกลุ่มหล่อ และกลุ่มเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีขึ้นรูปเย็น เช่น AA 2xxx AA 6xxx AA 7xxx AA8xxx เป็นต้น รวมทั้งอธิบายถึงลักษณะวิธีการบ่มแข็งให้ตกตะกอนซึ่งเป็นกลไกเพิ่มความแข็งแรงที่สำคัญสำหรับชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมโครงสร้างเครื่องบิน ข้อกำหนดเทมเปอร์ต่าง ๆ

**คำสำคัญ:** วัสดุคอมโพสิตโพลีเมอร์เสริมเส้นใย อะลูมิเนียมผสมรีดเย็น การเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีตกตะกอน การอบชุบทางความร้อน

#### ABSTRACT

Although a wide range of aerospace materials is used, such as magnesium, titanium, steel, and fiber-reinforced polymer composite, Aluminium is an important structural material for aircraft and aerospace and remains popular in the present day because aluminium has many good properties such

as ease of machining and shaping, low cost, high corrosion resistance, non-combustibility, light weight and high strength and recyclability. This research paper starts with describing a classification of aluminium and its alloys into two categories: Wrought aluminium alloy and Casting aluminium alloy. These two alloy groups are also divided into two subgroups. Age heat-treatable aluminium alloy subgroup is strengthened by precipitation hardening process and Non heat- treatable alloy subgroup is strengthened by cold working (forming). Age heat-treatable wrought alloy is mainly employed to product the airframe components because of its higher strength and higher toughness than those of the casting alloy group and the cold forming alloy group. Example of this alloy group is AA2xxx, AA6xxx, AA7xxx, AA8xxx, etc. It includes to describe method characteristics of precipitation strengthening which is an significant mechanism for strengthening the airframe sections and various temper designations.

**Keyword:** Fibre-reinforced polymer composite, wrought aluminium alloy, precipitation strengthening, heat treatment.

## 1. บทนำ

อะลูมิเนียมนำมาใช้ทำวัสดุโครงสร้างที่สำคัญของเครื่องบิน [1] เนื่องจากชิ้นส่วนอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา แนวนอนเริ่มนำมาใช้ [2] ตั้งแต่ช่วงทศวรรษที่ 1930 การพัฒนาเครื่องบินที่สามารถบินด้วยความเร็วสูงและบินได้ที่ระดับความสูงจะยังคงเป็นเรื่องยากหากปราศจากการใช้อะลูมิเนียมผสมที่มีความแข็งแรงสูงมาทำเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่สำคัญ เช่น ลำตัวเครื่องบิน (fuselage) และปีก เมื่อเทียบกับวัสดุที่ใช้ในการบินและอวกาศอื่น ๆ เช่น แมกนีเซียม ไททาเนียม เหล็กกล้าและวัสดุ คอมโพสิตโพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ส่วนใหญ่อะลูมิเนียมถูกนำมาใช้ในปริมาณที่มากกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ โดยใช้ทำเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างเครื่องบินคิดเป็นน้ำหนักถึง 60–80% ของน้ำหนัก เครื่องบินสมัยใหม่ เฮลิคอปเตอร์และยานอวกาศ อะลูมิเนียมมีแนวโน้มที่จะยังคงเป็นวัสดุโครงสร้างที่สำคัญของเครื่องบิน ถึงแม้ว่าจะมีการใช้วัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในเครื่องบินโดยสารขนาดใหญ่ เช่น Airbus 380 และ 350 XWB และ Boeing 787 ในแต่ละปีมีการใช้อะลูมิเนียมประมาณถึง 400,000 ตัน เพื่อใช้สร้างเครื่องบินทางทหารและพลเรือน ชิ้นส่วนโครงสร้างเครื่องบินของสายการบินหลายประเภท ส่วนใหญ่ยังคง

สร้างผลิตด้วยอะลูมิเนียม รวมทั้งเครื่องบินที่สร้างขึ้นเป็นจำนวนมาก อย่างเช่น โบอิง 737, 747 และ 757 และแอร์บัส A 320 และ A 340 เป็นต้น ถึงแม้ว่าการแข่งขันระหว่างโลหะอะลูมิเนียมและวัสดุผสมคอมโพสิต ในฐานะเป็นวัสดุโครงสร้างเครื่องบินที่โดดเด่นกว่า มีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงมากขึ้นในปีต่อ ๆ มา อะลูมิเนียมก็ยังคงเป็นที่นิยมเพราะว่า การตัดขึ้นรูปสะดวก ราคาไม่แพง ทนทานต่อกัดกร่อนดี ไม่ติดไฟ และมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักดีมาก [3] ตัวอย่างที่เด่นชัดที่แสดงถึงการใช้อะลูมิเนียมอัลลอยด์ในเครื่องบินทางทหารและพลเรือนในปัจจุบัน คือ เครื่องบินทหาร Hornet F/A-18 มีการใช้อะลูมิเนียมผสม 50% ของน้ำหนักโครงสร้างเครื่องบิน อีก 10% เป็นน้ำหนักของวัสดุคอมโพสิต และวัสดุโครงสร้างเครื่องบินโดยสาร Boeing 747 ที่สร้างขึ้นระหว่างปี พ.ศ.2503 ถึง พ.ศ.2543 ส่วนใหญ่ใช้อะลูมิเนียมผสมที่มีความแข็งแรงสูงมีน้ำหนักถึง 80% และใช้โลหะและวัสดุคอมโพสิตอื่น ๆ อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อะลูมิเนียมถูกใช้ทำชิ้นส่วนโครงสร้างที่สำคัญของ B 747 รวมทั้ง ปีก ลำตัวเครื่องบิน และ Empennage (พวงหางทั้งหมดของเครื่องบินประกอบด้วยแผนหางระดับและขายกระโดงหาง) ชิ้นส่วนสำคัญเพียงสิ่งเดียวที่

ไม่ได้สร้างจากอะลูมิเนียมคือ landing gear (ส่วนทำหน้าที่ช่วยรับแรงกระแทกในขณะที่เครื่องบินร่อนลงและช่วยรองรับเครื่องบินในขณะที่อยู่บนพื้นดินประกอบด้วยล้อสามล้อ) ทำจากเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงและไททานเนียม ส่วนเครื่องยนต์เทอร์โบไบน์ผลิตจากวัสดุทนความร้อน เช่น Nickel-based superalloy นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังคงเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับโครงสร้างยานอวกาศทุกประเภทเนื่องจากน้ำหนักเบา และทนทานต่อแรงกดดันที่เกิดขึ้นระหว่างการปล่อยตัวยานจากภาคพื้นดินและขณะ

อยู่ในอวกาศ จึงนำมาใช้ทำยานอวกาศอพอลโล สกายแล็ป กระสวยอวกาศ และสถานีอวกาศนานาชาติ รวมถึงยานอวกาศ Orion ที่ทำจากอะลูมิเนียมผสมลิเทียมตารางที่ 1 แสดงชิ้นสำคัญของโครงสร้างเครื่องบิน (air frame) ที่ทำจากอะลูมิเนียมผสมเกรดต่าง ๆ และธาตุผสมหลักส่วนใหญ่เป็นอะลูมิเนียมกลุ่มอบชุบทางความร้อนได้ และสามารถ [4] เพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีบ่มแข็ง (aging) ให้ตกตะกอน [5]

ตารางที่ 1 การใช้อะลูมิเนียมผสมทำชิ้นส่วนเครื่องบิน

| ชิ้นส่วน                                 | เกรดอะลูมิเนียมผสม            | ธาตุผสมหลัก                                          | คุณสมบัติ                                                                  |
|------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Front legs of seat                       | 2017, 2024                    | Copper, Magnesium                                    | Good machining, high strength, high fatigue strength, corrosion resistance |
| Wing leading edge                        | 2024                          |                                                      |                                                                            |
| Seat ejectors                            | 2024                          |                                                      |                                                                            |
| Backrests and armrests                   | 6xxx                          | Magnesium, Silicon                                   | High strength, good formability and weldability, corrosion resistance      |
| Fuselage skins, stringers and bulkheads  | 6013, 6050, 7050, 7079        |                                                      |                                                                            |
| Wing skins, panels and covers            | 7075                          | Zinc, Magnesium, Copper                              | Highest strength, high toughness, good formability                         |
| Rear legs of seat and seat spreaders     | 7075                          |                                                      |                                                                            |
| Wing spars, ribs                         | 7055-T77                      |                                                      |                                                                            |
| Wheels and loading gear links            | 7055-T77                      |                                                      |                                                                            |
| Horizontal and vertical stabilisers      | 7xxx                          |                                                      |                                                                            |
| Upper and lower wing skins               | 8090-T86, 2055-T8, 2199-T8E80 | Lithium, Copper, Magnesium (8xxx, 2xxx /Al-Li alloy) | Low density, excellent fatigue and toughness, crack growth resistance      |
| Floor sections of the aircraft           | 2090-T83, 2090-T62            |                                                      |                                                                            |
| Sear structure                           | 2090-T83                      |                                                      |                                                                            |
| Supporting members of fuselage structure | 8090-T651, 2090-T651          |                                                      |                                                                            |



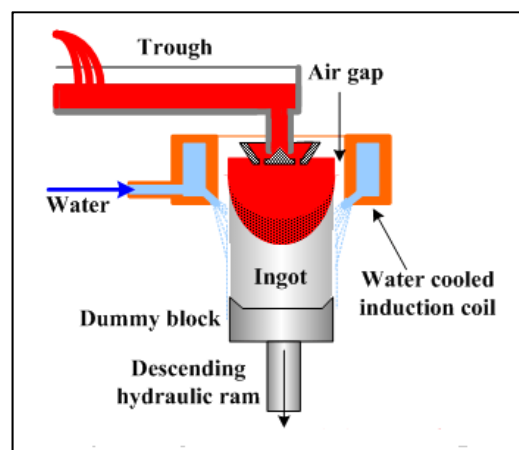
## 2. การจำแนกแบ่งประเภทของอะลูมิเนียม และ อะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดเย็น (Wrought Aluminium Alloys) และอะลูมิเนียมผสมหล่อขึ้นรูป (Aluminium Casting Alloys)

### 2.1 อะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดเย็น

กระบวนการผลิตโดยวิธีหล่อกิ่งต่อเนื่องแบบเย็นตัวโดยตรง (direct-chill semicontinuous casting) คือ การเทโลหะหลอมเหลวลงไปในแม่พิมพ์ (mold) ทองแดงที่หล่อเย็นด้วยน้ำ ขณะที่ Dummy block กำลังเคลื่อนที่ลง แท่งโลหะหล่อที่กำลังไหลออกจากแม่พิมพ์จะถูกพันด้วยน้ำที่ออกมาจากแม่พิมพ์ตอนล่างทำให้เย็นตัวโดยเร็ว (Direct-Chill: DC) ดังรูปที่ 1 มักเติมธาตุปรับขนาดเกรน (Grain refiner) เข้าไปในโลหะหลอมเหลว เช่น Ti, B, Zr เพื่อทำให้โลหะมีเกรนเล็กและแข็งแรงเพิ่มขึ้น แท่งหล่อที่แข็งตัวแล้วจะเรียกว่า Ingot slab หรือ billet ตามขนาดที่แตกต่างกัน แท่งโลหะหล่อจะผ่านการปอกผิวหน้าออก  $\frac{1}{2}$  นิ้ว (scalping) เพื่อกำจัดออกไซด์ ทำให้ผิวสะอาดและเรียบ ต่อจากนั้นผ่านการอุ่นร้อน (preheat) หรืออบโฮโมจีไนซ์ (Homogenizing) ที่อุณหภูมิสูง  $450^{\circ}\text{C}$ – $600^{\circ}\text{C}$  ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เป็นเวลา 10–24 ชม. เพื่อให้เกิดการแพร่ของอะตอมทำให้ส่วนผสมสม่ำเสมอ และทำให้ได้โครงสร้างสมดุลแท่งโลหะหล่อผ่านการรีดร้อน (hot rolling) ด้วยลูกกลิ้งชนิด Four reversing mill เพื่อลดขนาดได้ถึง 3 นิ้วและถูกให้ความร้อนอีกครั้ง รีดร้อนต่ออีก ลดความหนาได้ประมาณ  $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$  นิ้ว และรีดร้อนด้วยชุดลูกกลิ้งชนิด Tandem hot-rolling mill เพื่อลดขนาดต่อไป ให้ได้แผ่นโลหะที่มีความหนา 0.1 นิ้ว หลังผ่านการอบอ่อน (annealing) โลหะแผ่นจะถูกรีดเย็น (cold working) ต่อไปอีกด้วยลูกกลิ้งชนิด 4 ตัวชุดเดียว (four high single mill) เพื่อลดขนาด 30–65% สุดท้ายจะได้แผ่นอะลูมิเนียมซีท (sheet) นำไปอบอ่อนก่อนจัดจำหน่าย อีกวิธีโดยนำแท่งบิลเลทที่ผ่านการหล่อกิ่งต่อเนื่องโดยวิธีเย็นตัวโดยตรง (DC casting) มาผ่าน

กระบวนการอัดรีดร้อน (hot extrusion) เป็นแท่งบิลเลทอัดรีด (extruded billet) นำไปผ่านการขึ้นรูปเย็น (fabrication) ต่อไป ผลิตภัณฑ์ของอะลูมิเนียมกลุ่มรีดเย็น ได้แก่ อะลูมิเนียมแผ่นที่มีความหนาเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนี้ foil, sheet, plate หรือแท่งสี่เหลี่ยม (bar) แท่งกลม (rod) ท่อ (tube, pipe) คาน (beam) หน้าตัดต่าง ๆ ได้มาจากวิธีอัดรีดเป็นวัสดุโครงสร้าง [6] และเส้นลวด



รูปที่ 1 การหล่อแท่ง Ingot อะลูมิเนียมผสมโดย  
กระบวนการหล่อกิ่งต่อเนื่องแบบเย็นตัวโดยตรง

อะลูมิเนียมผสมรีดเย็นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่เพิ่มความแข็งแรงโดยใช้วิธีทางความร้อนและไม่ใช้ความร้อนช่วยดังในตารางที่ 2 และอะลูมิเนียมผสมรีดเย็นแบ่งออกเป็น 9 กลุ่ม (ดังในตารางที่ 3) คือ กลุ่ม 1xxx–9xxx ซึ่งแต่ละกลุ่มแตกต่างกันที่ธาตุผสมหลักในอะลูมิเนียมดังต่อไปนี้

(1) กลุ่มอบชุบทางความร้อนไม่ได้ (non-heat-treatable alloys) เป็นกลุ่มที่เพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงโดยวิธีขึ้นรูปเย็น (cold working) เท่านั้น เนื่องจากจำนวนดิสโลเคชันเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ทำให้เกิดความแข็งแรงเครียด (strain hardening)

(2) กลุ่มอบชุบทางความร้อนได้ (heat-treatable aluminum alloys) เป็นกลุ่มที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงวิธีตกตะกอน (precipitation strengthening) โดยใช้วิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เกิดตะกอนของสารประกอบของ

ธาตุผสมหลักในโลหะนั้น เช่น ทองแดง (Cu), ซิลิกอน(Si), แมกนีเซียม (Mg), สังกะสี (Zn), Ti สารประกอบขนาดเล็กเหล่านี้จะกระจายตัวอย่างหนาแน่นและยังคงมีโครงสร้างผลึก และจัดเรียงตัวของอะตอมต่อเนื่องสัมพันธ์กับแมทริกซ์อะลูมิเนียมที่ให้งานเน็ด เรียกว่า โคฮีเรนตพรีซิพิตเตต(Coherent Precipitate) ส่งผลให้เกิดความเครียดที่รอยต่อระหว่างอนุภาคตกตะกอนกับแมทริกซ์ เรียกว่า lattice strains ซึ่งจะต้านทานการเคลื่อนที่ของ dislocation จึงรับแรงได้สูงขึ้น ยกตัวอย่าง อะลูมิเนียมกลุ่ม 2xxx มีทองแดง (Cu) เป็นธาตุผสมหลัก สามารถละลายในเฟสพื้น (matrix) ได้สูงสุด ที่ 5.65% ที่อุณหภูมิ 548 °C และลดลงเหลือ 0.45% ที่ 200 °C แต่ Mg อาจจะถูกเติมลงไปด้วย ธาตุผสมอื่น ๆ อาจถูกเติมลงไป ในปริมาณเล็กน้อยอะลูมิเนียมผสมที่สำคัญในกลุ่ม 2xxx เช่น AA 2024 มีส่วนผสม 4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn โลหะผสมกลุ่มนี้เพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีตกตะกอน เนื่องจากเกิดตะกอนของสารประกอบธาตุผสมซึ่งเป็นเฟสที่สอง ที่สำคัญ ได้แก่ CuAl<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>CuMg และอื่น ๆ ดังนั้นค่า Tensile strength ของ 2024-O เท่ากับ 186 MPa (27 ksi) หลังจากผ่านการบ่มแข็งวิธีตกตะกอนแล้ว

ทำให้ค่าความแข็งแรง Tensile strength เพิ่มขึ้นมาก เช่น 2024-T6 เท่ากับ 427 MPa (62 ksi) และมักถูกใช้ทำลำตัวเครื่องบิน กระบะล้อเครื่องบิน Wing leading edge Lower wing covers

## 2.2 อะลูมิเนียมผสมหล่อ

การขึ้นรูปทำได้โดยวิธีการหล่อ 3 วิธี คือ (1) หล่อแบบทราย (green sand casting) สำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ผลิตจำนวนน้อย (2) หล่อแบบถาวร (permanent casting) โดยใช้แม่พิมพ์โลหะ สำหรับชิ้นงานขนาดเล็กถึงขนาดปานกลาง และ (3) หล่ออัดฉีดขึ้นรูป (die casting) โดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตชิ้นงานหล่อขนาดเล็ก ผิวเรียบ ให้รายละเอียดชัดและผลิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนผสมทางเคมีและปริมาณธาตุผสมจะแตกต่างจากอะลูมิเนียมผสมประเภทใช้แรงขึ้นรูปหรือรีดเย็น อะลูมิเนียมผสมหล่อมักไม่ค่อยนำมาใช้ทำชิ้นส่วนโครงสร้างเครื่องบิน เนื่องจากมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำและความเหนียวต่ำ แต่ใช้ทำชิ้นส่วนที่ไม่รับแรง เช่น door handle, avionics cabinets ทำจากเกรด AA 356 และ AA 357

ตารางที่ 2 การแบ่งกลุ่มอะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดเย็น

| อบชุบทางความร้อน                                      | กลุ่มอะลูมิเนียมผสม                       | เกรด      |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------|
| กลุ่มบ่มแข็งทางความร้อนไม่ได้<br>(non age-hardenable) | 1xxx (บริสุทธิ์ทางการค้า (> 99%Al))       | 1100-H18  |
|                                                       | 3xxx (Al-Mn, Al-Mn-Mg alloy)              | 3004-H14  |
|                                                       | 4xxx (Al-Si alloy)                        | 4043-H18  |
|                                                       | 5xxx (Al-Mg, Al-Mg-Mn alloys)             | 5052-H32  |
| กลุ่มบ่มแข็งทางความร้อนได้<br>(age-hardenable)        | 2xxx (Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Li alloy)    | 2024-T3   |
|                                                       | 4xxx (Al-Mg-Si alloy)                     | 4032-T6   |
|                                                       | 6xxx (Al-Mg-Si alloy)                     | 6061-T6   |
|                                                       | 7xxx (Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu alloy) | 7075-T6   |
|                                                       | 8xxx (Al-Li, Sn, Zr, หรือ B)              | 8090-T651 |

ตารางที่ 3 อะลูมิเนียมผสมกลุ่มรีดเย็น

| ธาตุผสมหลัก                                                      | กลุ่มอะลูมิเนียมผสม |
|------------------------------------------------------------------|---------------------|
| อะลูมิเนียม (99.00% อย่างต่ำและมากกว่า)                          | 1xxx                |
| ทองแดง (Cu) (1.9%...6.8%);                                       | 2xxx                |
| แมงกานีส (Mn) ( 0.3%...1.5%)                                     | 3xxx                |
| ซิลิกอน (Si) (0.3%...1.5%)                                       | 4xxx                |
| แมกนีเซียม(Mg) (5%..5.5% )                                       | 5xxx                |
| แมกนีเซียม (Mg) และซิลิกอน (Si) (Mg 0.4%...1.5%, Si 0.2%...1.7%) | 6xxx                |
| สังกะสี (Zn) (1%...8.2%)                                         | 7xxx                |
| ธาตุอื่น ๆ (tin, lithium, and/or iron)                           | 8xxx                |
| ชุดที่ไม่ได้ใช้                                                  | 9xxx                |

### 3. สัญลักษณ์อะลูมิเนียมรีดเย็นตามระบบสมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (Aluminum Association: AA)

อะลูมิเนียมผสมรีดเย็น จะถูกแยกประเภทหรือกลุ่มตามธาตุผสมหลักที่มีอยู่ ตามระบบ AA จะใช้ระบบตัวเลข 4 ตัว โดยตัวเลขหลักที่หนึ่งจะแสดงถึง ธาตุผสมหลัก คือ ธาตุผสมที่ถูกเติมในโลหะที่ปริมาณมากที่สุด ดังตารางที่ 3 ตัวเลขหลักที่สอง แสดงถึง การปรับปรุงในส่วนผสม หรือ ปริมาณจำกัดของสิ่งเจือปน เช่น 0-ไม่มีการเปลี่ยนแปลง 1-9 มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมเล็กน้อยและตัวเลข 2 ตัว หลังสุดท้าย เฉพาะในกลุ่ม 1xxx หมายถึง ความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียม ส่วนกลุ่มที่ 2xxx-8xxx แสดงถึง เกรดต่าง ๆ ในอะลูมิเนียมผสมกลุ่มเดียวกัน

### 4. การกำหนดเทมเปอร์ของอะลูมิเนียมผสม (Temper Designations)

เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้ตามหลังตัวเลข 4 ตัวแรก ที่บอกกลุ่มอะลูมิเนียมผสมรีดเย็น หลังขีด-คั่นเป็นตัวอักษรตัวเดียว ตามด้วยตัวเลขหนึ่งถึงห้าตัว เช่น 6061-T6, 2014-T351, 7075-T6510, 7055-T77511, 1100-H14 เพื่อบอกว่าโลหะผสมนั้นผ่านขั้นตอนการทำอะไรมาบ้าง เช่น ในสภาพรีดเย็นในสภาพหล่อ หรืออบชุบทางความร้อนวิธีใด ดังรายละเอียด ดังนี้ [7]

- F สภาพขึ้นรูป (Fabricated) ขึ้นรูปร่าง โดยวิธี rolling, extrusion, forging, drawing และ casting
- O อบอ่อน (Annealing) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทำให้โลหะเกิดตกผลึกใหม่ ปล่อยให้โลหะเย็นตัวช้า ๆ ในเตา เพื่อลดความเครียดภายในแต่เพิ่มความเหนียว
- H ความแข็งเครียด (Strain Hardening) เกิดจากการขึ้นรูปเย็น (cold work) ใช้กับอะลูมิเนียมผสมกลุ่มบ่มแข็งทางความร้อนไม่ได้ เพิ่มความแข็งแรงโดยการขึ้นรูปเย็นเท่านั้น ตัวเลขหลักที่ 1 ที่ตามหลัง H บอกวิธีทางความร้อนที่ต่อจากขึ้นรูปเย็น (ความแข็งเครียด)
- H 1 ความแข็งเครียดเท่านั้น ไม่มีการอบชุบทางความร้อน
- H 2 ความแข็งเครียดและอบอ่อนบางส่วน (partial annealing)
- H 3 ความแข็งเครียด และอบเพิ่มความเสถียรของโลหะที่อุณหภูมิต่ำ
- H 4 ความแข็งเครียด และอบชุบทางความร้อน Paint curing หรือ lacquering เพื่อให้เสถียรตัวเลขหลักที่สองหลัง H บอกถึง ปริมาณการขึ้นรูป เช่น H18, H36
- HX2 = 1/4 เท่า ของความแข็งเต็มที่ (quarter hard)
- HX4 = 1/2 เท่าของความแข็งเต็มที่ (half hard)
- HX6 = 3/4 เท่าของความแข็งเต็มที่ (three and a quarter hard)

- HX8 = ความแข็งเต็มที่ (full hard) เปรียบเท่าการแปรรูปเย็นโดยลดพื้นที่หน้าตัด 75%
  - HX9 = ความแข็งพิเศษ (extra hard)
  - H18 = โลหะผ่านการขึ้นรูปเย็นโดยลดพื้นที่หน้าตัด 75% เท่านั้น
  - H 14 = โลหะผ่านการขึ้นรูปเย็นโดยทำให้เกิดความเค้นแรงดึงสูงสุด อยู่ระหว่าง O (อบอ่อน) และ H18
  - T อบชุบทางความร้อนเพื่อให้โลหะเสถียร ใช้กับอะลูมิเนียมผสมกลุ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีบ่มแข็งให้ตกตะกอน หลัง T จะตามด้วยตัวเลข 1-5 ตัว
  - T1 เย็นตัวจากอุณหภูมิขึ้นรูปร้อนและบ่มแข็ง (aging) ที่อุณหภูมิห้อง
  - T2 เย็นตัวจากอุณหภูมิขึ้นรูปร้อน ตามด้วยขึ้นรูปเย็นและบ่มแข็ง aging ที่อุณหภูมิห้อง
  - T3 ขึ้นรูปร้อนแล้วอบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน เควนซิง ขึ้นรูปเย็น และบ่มแข็งที่อุณหภูมิห้อง
  - T4 อบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว เควนซิง และบ่มแข็งที่อุณหภูมิห้อง
  - T5 เย็นตัวจากอุณหภูมิขึ้นรูปร้อน และบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อให้ตกตะกอนเพิ่มความแข็งแรง
  - T6 อบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว เควนซิงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำ
  - T7 อบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว เควนซิง และอบเพิ่มความเสถียร/บ่มแข็งเทียมเกิน(stabilized/overage) เพิ่มความต้านทานการผุกร่อน
  - T8 อบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว เควนซิง ขึ้นรูปเย็น และบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำหรือบ่มแข็งเทียม
  - T9 อบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว เควนซิง บ่มแข็งเทียมเพื่อให้ตกตะกอนแล้วขึ้นรูปเย็นให้เพิ่มความแข็งแรง
  - T10 เย็นตัวจากอุณหภูมิขึ้นรูปร้อน ขึ้นรูปเย็นและบ่มแข็งเทียมเพื่อให้ตกตะกอน (ไม่มี ใช้แล้ว)
- ตัวเลข 1-4 ตัวที่ตามหลัง สัญญลักษณ์ T1 ถึง T10
- TX 51 ลดความเค้น (stress relief) ด้วยวิธียืดตัว (stretching) ในช่วง ½ ถึง 3% ใช้กับ plate, cold rolled rod, die หรือ ring forging

- TX 510 ลดความเค้นด้วยวิธียืดตัว (stretching) ในช่วง ½ ถึง 3% ใช้กับชิ้นงานเอ็กซ์ทูรูชั่น
  - TX 511 ลดความเค้นด้วยวิธียืดตัว ในช่วง 1/2 ถึง 3% และทำ twisting or straightening
  - TX 52 ลดความเค้นวิธีบีบอัดเย็น (compressive cold work) ในช่วง 1%-5%
  - TX54 ลดความเค้นวิธีบีบอัดเย็นและวิธียืดตัว
- ในทุกกรณี การลดความเค้นโดยแปรรูปเย็นจะกระทำในขั้นตอนต่อจากชิ้นงานผ่านการอบละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เควนซิงแล้ว ก่อนการบ่มแข็งเทียม ยกตัวอย่าง Alloy 7075-T651 plate คือ แผ่นโลหะผ่านการทำ T6 ประกอบด้วย การอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน เควนซิง และทำบ่มแข็งเทียม แล้วทำการลดความเครียดด้วยวิธียืดตัว ½-3% Alloy 7075-T6511 extruded tube ท่อผ่านการทำ T6 และลดความเค้นด้วยวิธียืดตัว ½-3% Alloy 7075-T652 Hand forging ชิ้นงานตีขึ้นรูปด้วยมือ ผ่านการทำ T6 และลดความเค้นด้วยวิธีบีบอัด 1-5% Alloy 7075-T654 Die forging ชิ้นงานขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ผ่านการทำ T6 และ 54 คือลดความเค้นด้วยวิธีการยืดตัวและบีบอัด 1-5%
- TX1 คือ เควนซิงในน้ำเดือดหรือน้ำมัน หลังจากชิ้นงานผ่านการอบละลายให้เป็นเฟสเดียวที่อุณหภูมิสูง
  - Tx11 คือ การเควนซิงในสารชุบแข็งชนิดอื่น ยกตัวอย่าง Alloy 2014-T61 forging คือ ชิ้นงานผ่านการอบละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เควนซิงในน้ำเดือดและทำบ่มแข็งเทียม Alloy 2014-T611 forging คือ ชิ้นงานผ่านอบละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน เควนซิงในสารชุบอื่น และทำบ่มแข็งเทียม Alloy 2014-T6151 plate คือ แผ่นโลหะผ่านการอบละลายให้เป็นเฟสเดียว เควนซิงในน้ำเดือด ยืดตัว ½-3% และบ่มแข็งเทียม
  - TX2 บอกถึงการอบชุบทางความร้อนที่ถูกกระทำโดยผู้ใช้หรือผู้ขาย ไม่ใช่ผู้ผลิตโลหะนั้น
- ยกตัวอย่าง Alloy 7075-T62 die forging คือชิ้นงานผ่านการอบชุบทางความร้อน T6 โดยผู้ใช้หรือผู้รับเหมาของผู้ใช้ หลังจากชิ้นงานผ่านการทำ O หรือ F

- TX61 ใช้กับโลหะแผ่นที่จะทำการขึ้นรูปเย็นที่มากกว่า ที่ได้จากวิธี straightening or flattening

ยกตัวอย่าง Alloy 2024-T361 sheet คือ แผ่นโลหะผ่านการอบชุบทางความร้อน T3 เหมือนกันแต่ปริมาณการขึ้นรูปเย็นมากกว่าข้อกำหนดใน T3

- T94 ใช้กับสกรูเครื่องจักรและลวดที่ผ่านทำอบชุบ T9 ด้วยปริมาณขึ้นรูปเย็นมากกว่า T9 ยกตัวอย่าง Alloy6061-T94 wire

- T73 ขึ้นงานผ่านการทำ T7 และทำการบ่มเทียมเกิน (Over aging) เพื่อเพิ่มความต้านทานการผุกร่อน stress corrosion cracking: SCC ความแข็งแรงลด 15%

- T76 ขึ้นงานผ่านการทำ T7 และทำการบ่มแข็งเทียมเกิน (over aging) เพิ่มความต้านทานการผุกร่อนชนิด exfoliation corrosion ความแข็งแรงมากกว่า T73

ยกตัวอย่าง Alloy-T7651 plate คือ แผ่นโลหะผ่านการทำ T7 คือ อบละลายให้เป็นเฟสเดียว เควนซึ่ง บ่มแข็งเทียมเกินขนาดเพื่อเพิ่มความต้านทานการผุกร่อนแบบ SCC และลดความเค้นโดยการยืดตัว ½-3% Alloy 7175-T76510-extruded shape คือขึ้นงานเอ็กทรูดขึ้นทำ T7 คือ อบละลายให้เป็นเฟสเดียว เควนซึ่ง บ่มแข็งเทียมเกินขนาดเพิ่มความต้านทานการผุกร่อนแบบ exfoliation และลดความเค้นโดยยืดตัว ½-3% 7075-T73511 extruded shape คือขึ้นงานเอ็กทรูดขึ้น หลังทำ T7 โดยทำการบ่มแข็งเทียมเกินขนาดเพิ่มความต้านทานการผุกร่อนแบบ SCC แล้วลดความเค้นยืดตัว ½-3% และยืดให้ตรงหรือบิดตัว (straightening/ twisting)

- T74-ขึ้นงานผ่านการทำ T7 และเพิ่มกระบวนการพิเศษ เพื่อให้ความแข็งแรงสูง ความเหนียวตกหักสูงขึ้นและความต้านทานการผุกร่อนดีขึ้น ปรับปรุงมาจาก T736 เช่น Alloy 7175-T74 die forging die ขึ้นงานขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ หลังทำ T7 ตามด้วยทำ special treatment และ Alloy 7175-T7454 หลังทำ T74 เพิ่มเติมการคลายความเค้นด้วยการยืดตัวและบีบอัดเย็น

- T86 ขึ้นงานผ่านการทำ T8 และเพิ่มกระบวนการพิเศษ (ลดความหนา 6%) เพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุด เช่น 7175-T86

- T87 ขึ้นงานผ่านการทำ T8 และ ขึ้นรูปเย็นลดความหนา 10%

- T66 ขึ้นงานผ่านการทำ T6 และทำกระบวนการพิเศษให้มีสมบัติเชิงกลสูงกว่า T6

- W อบสารละลายให้เป็นของแข็งเนื้อเดียว เควนซึ่ง และบ่มแข็งที่อุณหภูมิห้อง แต่ยังไม่กำหนดกระบวนการอบชุบทางความร้อน หรือกระบวนการทางกลที่จะตามมา

## 5. ตัวแบบการเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีตกตะกอน (model of precipitation strengthening)

วัตถุประสงค์ คือ การทำให้อนุภาคของสารประกอบธาตุผสมขนาดเล็ก ๆ ตกตะกอน กระจายตัวอย่างหนาแน่นในเฟสพื้นอะลูมิเนียมโดยวิธีอบชุบทางความร้อน อนุภาคตกตะกอนเฟสที่สองเหล่านี้จะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันในขณะโลหะรับแรงกระทำ ส่งผลทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น พิจารณาการอบชุบเพิ่มความแข็งแรง โดยวิธีตกตะกอนของอะลูมิเนียมผสม A ที่ส่วนผสมของธาตุผสม B ที่  $x_1\%$  ในแผนภูมิสมดุลเฟส ของธาตุ A-B ดังรูปที่ 2 ความสามารถในการละลายของธาตุ B ในสารละลายของแข็งเฟส  $\alpha$  ลดลงมากเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก  $T_1$   $x_1\%$  ถึง  $T_3$  ลดลงเป็น  $x_2\%$  วิธีนี้ประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนตามแผนภาพ รูปที่ 3 ดังนี้ [8], [9]

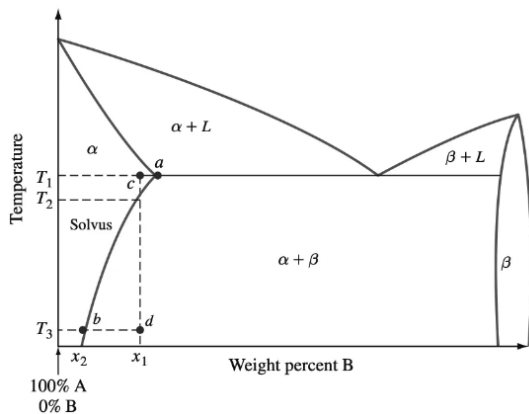
### 5.1. การอบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว (solution heat treatment)

โลหะผสมส่วนผสม  $x_1$  จะถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ  $T_1$  (จุด c) ที่อยู่ตรงกลางระหว่างเส้น Solvus line และ Solidus line ในรูปที่ 2 หรือ  $T(h)$  ในรูปที่ 3 และแช่ไว้ในเตาอบนานพอสมควรเพื่อให้ธาตุผสมละลายเข้าไปในอะลูมิเนียมกลายเป็นสารละลายของแข็งเฟส  $\alpha$  เป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ [10] โดยใช้เวลาแช่หลายชั่วโมง

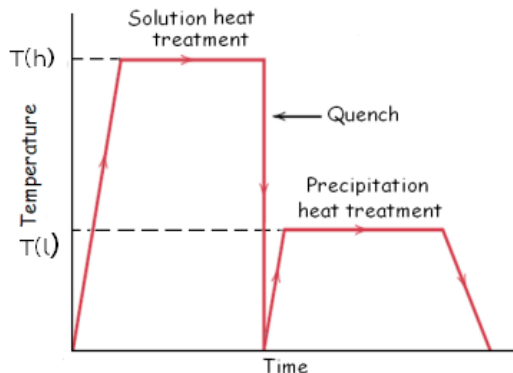
### 5.2 การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว หรือเควนซึ่ง (Quenching)

ขึ้นงานถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มขึ้นงานในสารชุบมักเป็นน้ำ ดังรูปที่ 3 ทำให้ธาตุผสม B ไม่

สามารถแพร่ออกจากเฟสอัลฟา  $\alpha$  ได้ทัน ดังนั้นหลังจากการชุบแข็งหรือเควินซึ่งจะได้เฟสสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution) คือ  $\alpha'$  หรือ SSS ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่เสถียร มีส่วนผสมของ B เกินสมดุล คือ  $x_1\%$  ที่จุด d ที่อุณหภูมิห้อง ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิสมดุลเฟสสองธาตุของโลหะ A และ B บริเวณสารละลายของแข็งปลายด้านข้าง คือเฟส  $\alpha$  และ  $\beta$  โดยที่ความสามารถในการละลายของ B ใน A ในเฟส  $\alpha$  จะลดลง เมื่อ อุณหภูมิลดลง



รูปที่ 3 ขั้นตอนการให้ความร้อนในการบ่มแข็งเทียม (artificial aging) โดยวิธีตกตะกอน

### 5.3 การบ่มแข็ง (aging/precipitation treatment)

ชิ้นงานได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (TU) ในรูปที่ 3 เพื่อให้เฟสที่สองตกตะกอนออกมาจากเฟส  $\alpha'$  เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะผสม [11] คือ เฟสไม่เสถียร GP1 และ  $\beta''$  กระจายตัวอย่างหนาแน่นและสม่ำเสมอ ตะกอนละเอียดเหล่านี้จะเชื่อมประสานกับเฟสพื้นแม่ทริกซ์หรือ

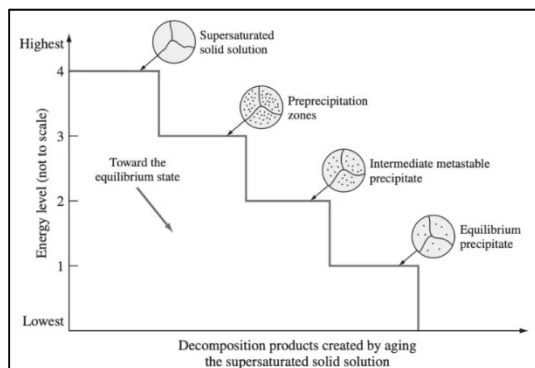
เรียกว่าโคฮีเรนซ์ ทำให้เกิดความเครียดพลาสติกของโครงสร้างผลึกแมทริกซ์ที่อยู่ล้อมรอบ ซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันบนระนาบเลื่อนจึงต้องใช้แรงกระทำสูงขึ้นเพื่อให้โลหะผิดรูป ทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่ความเหนียวลดลงบ้าง [12] ถ้าบ่มแข็งโดยปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้องเรียกว่าบ่มแข็งธรรมชาติ (natural aging) แต่ถ้าบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 115–200 °C เรียกว่าบ่มแข็งเทียม (artificial aging) เพื่อเร่งให้ตกตะกอนของเฟส GP1 zone และ  $\beta''$  เร็วขึ้นทำให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เวลาแช่สั้นลง เวลาที่ใช้บ่มแข็งเทียมควรอยู่ระหว่าง 5-48 ชั่วโมง ถ้าอุณหภูมิบ่มแข็งสูงเกินไปหรือเวลาแช่นานเกินไปค่าความแข็งแรงกลับลดลงเรียกว่าบ่มแข็งเกินขนาด (overaging) เพราะว่า GP1 และ  $\beta''$  เปลี่ยนเป็น  $\beta'$  และ  $\beta$  ตามลำดับ ซึ่งไม่เกาะติดแน่นกับเฟสพื้นแม่ทริกซ์อีกต่อไปหรือ incoherent จึงไม่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (\*เฟสสมดุล  $\beta$  ในแผนภูมิรูปที่ 2 คือ เฟสของสารประกอบกึ่งโลหะของธาตุผสมในอะตอมนิยมผสมเกรตนั้น ตัวอย่าง  $\text{CuAl}_2(\theta)$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}(\beta)$ ,  $\text{MgZn}_2(\eta)$  หรือ  $\text{Al}_3\text{Li}(\delta)$  เป็นต้น [13], [14]

## 6. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายในเฟสสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด ( $\alpha'$ ) ระหว่างการบ่มแข็ง

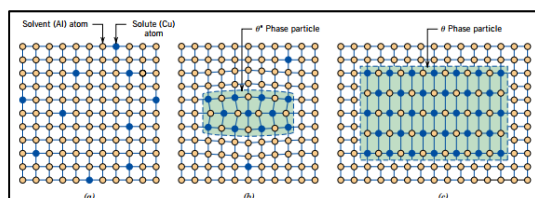
หลังจากผ่านขั้นตอน การอบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว และเควินซึ่งแล้ว จะได้สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดเฟส  $\alpha'$  มีพลังงานสูงมากที่ระดับ 4 ในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 (a) ซึ่งเป็นเฟสไม่เสถียรจึงมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟสที่มีพลังงานต่ำลง เมื่อทำการ aging ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ เฟส  $\alpha'$  ได้รับพลังงานกระตุ้นน้อย อะตอมตัวถูกละลาย (B จุดดำ) จะแพร่มาเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม เกิดโซนตะกอน เรียกว่า GP 1 Precipitation zones บางที่เรียก Guinier–Prest รูปร่างแผ่นกลม (disk) [15] มีความหนาไม่กี่อะตอม (0.4–0.6 nm) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8–10 nm เกิดบนระนาบลูกบาศก์ {100} เป็นโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal มีระดับพลังงานที่ 3 และยังคงเชื่อมประสานติดกับโครงสร้างเฟสพื้น  $\alpha'$  และเมื่อเวลาบ่มแข็งนานขึ้น

หรือ อุณหภูมิบ่มแข็งสูงขึ้น ต่อไปอีก โลหะได้รับพลังงานกระตุ้นมากขึ้นทำให้ GP 1 zone เติบโตใหญ่ขึ้นกลายเป็นโซน GP 2 หรือ  $\theta''$  ที่ระดับพลังงาน 2 รูปที่ 4, 5 (b) ซึ่งประกอบด้วย โซนที่อะตอม B และ A เกาะตัวเป็นรูปร่างจาน (disk) ความหนา 1-4 นาโนเมตร (nm) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 nm ที่ยังคงมีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างผลึกของแมทริกซ์ Al หรือ coherent ถ้าโลหะผสมได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นอีก พลังงานกระตุ้นสูงขึ้น อนุภาคเฟส  $\theta''$  จะเปลี่ยนเป็นเฟส  $\theta'$  [16] ที่ไม่โคฮีเรนต์กับเฟสพื้น  $\alpha$  แต่ยังคงอยู่ที่ระดับพลังงานเท่าเดิม ถ้าได้รับความร้อนต่อไป  $\theta'$  จะเติบโตเปลี่ยนเป็นเฟสสมดุล  $\theta$  ที่ไม่มี coherent กับเฟสพื้นแมทริกซ์อยู่ที่ระดับพลังงาน 1 ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 (c) สรุปว่า เฟสที่เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มแข็ง 4 ชนิด เรียงตามลำดับดังนี้

เฟส  $\alpha'$  (SSS)  $\rightarrow$  GP1 Zone  $\rightarrow$  GP2 ( $\theta''$ )  $\rightarrow$   $\theta'$   $\rightarrow$   $\theta$



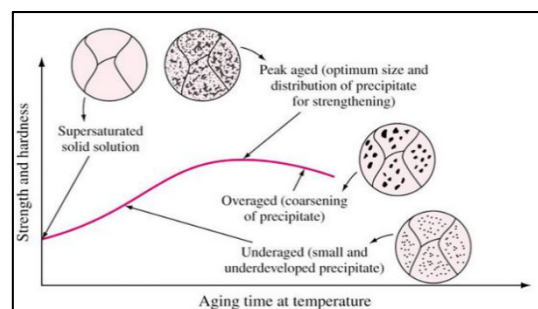
รูปที่ 4 ระดับพลังงานของเฟสที่แตกตัวออกจากเฟส  $\alpha'$  ขณะทำการบ่มแข็ง



รูปที่ 5 เปรียบเทียบลักษณะ (a) สารละลายอิ่มตัวยวดยิ่งเฟส  $\alpha'$  (b) อนุภาคเฟสไม่เสถียร  $\theta''$  และ coherent (c) เฟสสมดุล  $\theta$  ในเฟสพื้น และ incoherent

## 7. ผลกระทบของเวลาบ่มแข็ง (impact of aging time)

เวลาบ่มแข็ง มีผลต่อความแข็งแรงและความแข็งของโลหะผสม ดังในรูปที่ 6 แกน x (สเกลลอการิทึม) คือ เวลาการบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ จากกราฟเส้นโค้งบ่มแข็ง (aging curve) จะเห็นได้ว่า ความแข็งแรงของโลหะผสมที่มีเฟส  $\alpha'$  ที่เป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวยวดยิ่งจะเท่ากับจุดตัดบนแกน y ที่เวลาเริ่มต้น 0.0 เมื่อเวลาบ่มแข็งนานขึ้น โซนตกตะกอนจะเพิ่มปริมาณมากขึ้น และตะกอนมีขนาดเล็กลง ทำให้อะลูมิเนียมผสมมีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้น ความเหนียวลดลงจนกระทั่งเวลาบ่มแข็งที่เหมาะสมจะเป็นช่วงที่เกิดการตกตะกอน ของเฟสไม่เสถียร คือ โซน GP 1 (Guinier–Preston zone) และโซน GP 2 (เฟสกึ่งเสถียร  $\theta''$ ) ตามลำดับ ทำให้โลหะผสมมีค่าความแข็งแรงสูงสุด และถ้าเวลาบ่มแข็งยังคงดำเนินต่อไป เกิดการแพร่ของอะตอมของธาตุผสม B ทำให้โซน GP 1 เปลี่ยนเป็น  $\theta''$  เปลี่ยนเป็น  $\theta'$  เปลี่ยนเป็นเฟสสมดุล  $\theta$  และอนุภาคเฟสมีขนาดใหญ่ขึ้น ตามลำดับ ทำให้ค่าความแข็งแรงและความแข็งของอะลูมิเนียมผสมจะค่อย ๆ ลดลง เรียกว่า บ่มแข็งเกินขนาด (overaging)



รูปที่ 6 กราฟการบ่มแข็ง ระหว่างค่าความแข็งแรงและค่าความแข็งกับเวลาบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิคงที่ของกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงวิธีตกตะกอน

## 8. การเพิ่มความแข็งแรงวิธีตกตะกอนของอะลูมิเนียมผสมทองแดงกลุ่ม 2XXX

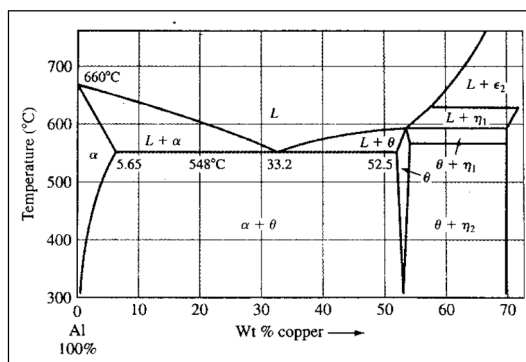
อะลูมิเนียมกลุ่มนี้มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลักและอาจเติมธาตุผสมอื่น ๆ [17] เช่น Si, Mn, Mg, Ni และ Ti ด้วย



พิจารณาอะลูมิเนียมผสมที่มีทองแดง (Cu) 4% แสดงในแผนภูมิสมดุลเฟส Al-Cu รูปที่ 7 ซึ่งมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

(1) อบอุ่นให้เป็นสารละลายเนื้อ/เฟสเดียว (solution treatment) อบอุ่นที่อุณหภูมิ 500-530 °C อยู่ระหว่างเส้นละลายเฟส (solvus line) กับเส้นของแข็ง (solidus line) เวลาแช่ที่เหมาะสม

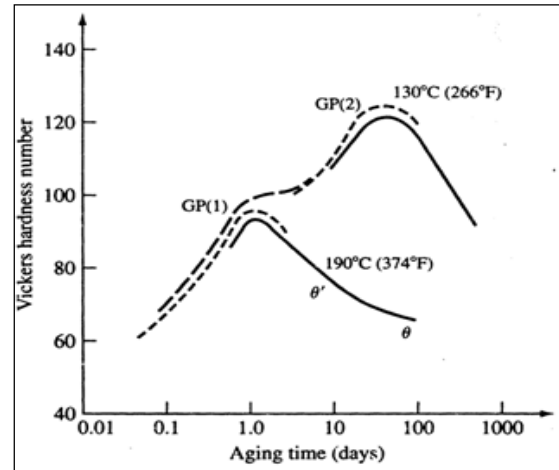
(2) การชุบแข็ง (quenching) ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยจุ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 7 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียมผสมทองแดง Al-Cu

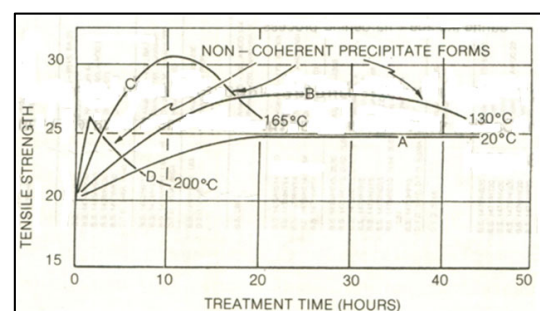
(3) การบ่มแข็ง (aging) ที่อุณหภูมิต่ำระหว่าง 130 °C-190 °C และเวลาแช่นาน 10-20 ชั่วโมง อะลูมิเนียมผสม 4% Cu เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสและความแข็งแรงอย่างต่อเนื่อง ดังในรูปที่ 8 ถ้าอุณหภูมิบ่มแข็งที่ 130 °C เกิดตะกอนเฟส GP 1 และ GP2 ( $\theta''$ ) ที่มีขนาดละเอียดทำให้ได้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสูงสุด แต่ถ้าเวลาบ่มแข็งนานเกินไปทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงไปเรื่อย ๆ เพราะเฟส GP1 และ  $\theta''$  จะค่อย ๆ หมดไป เปลี่ยนเป็น  $\theta'$  ที่หยาบขึ้นเรื่อย ๆ และในที่สุดเปลี่ยนต่อไปเป็นเฟสสมดุล  $\theta$  ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง (เฟส  $\theta$  คือ สารประกอบกึ่งโลหะ เช่น  $\text{CuAl}_2$  หรือถ้ามี Mg จะเกิดเฟส S- $(\text{Al}_2\text{CuMg})$  ถ้าอุณหภูมิบ่มแข็งสูงขึ้นเป็น 190 °C การเปลี่ยนแปลงเฟสตกตะกอนเริ่มต้นคือ  $\theta''$  ขนาดละเอียด ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุด ที่ระยะเวลาที่สั้น ต่อมา  $\theta''$  จะหมดไปเพราะเปลี่ยนเป็น  $\theta'$  จะหยาบขึ้นเรื่อย ๆ และเปลี่ยนเป็น เฟสสมดุล  $\theta$  ทำให้ค่า

ความแข็งแรงลดลง โดยไม่เกิด GP1 เพราะที่อุณหภูมิการบ่มแข็งอยู่สูงกว่าเส้นเกิด GP 1 Solvus [18], [19], [20]



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์โครงสร้างและความแข็งแรงของ Al-4% Cu บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 130 °C และ 190 °C

งานวิจัยเรื่องเวลาการบ่มแข็งที่ได้ทำการทดลองอบชุบทางความร้อนเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีบ่มแข็งให้ตกตะกอนอะลูมิเนียมผสม 4% Cu โดยอบละลายเฟสที่ 515 °C เควนลงในน้ำ และบ่มแข็งเทียม (artificial aging) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ A (20 °C), B (130 °C), C (165 °C) และ D (200 °C) ในรูปที่ 9 จากกราฟจะเห็นความแตกต่างของค่าความแข็งแรงสูงสุดในเวลาแช่ที่ต่างกัน ที่อุณหภูมิบ่มแข็งต่าง ๆ สรุปว่า ถ้าหากใช้อุณหภูมิบ่มแข็งสูงขึ้นเพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุด เวลาบ่มแข็งจะสั้นลงดังนั้นการเลือกอุณหภูมิบ่มแข็งที่เหมาะสมเช่น 165°C ที่เวลาแช่ 10 ชั่วโมง จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงที่สูงสุด



รูปที่ 9 ผลกระทบของเวลาแช่และอุณหภูมิบ่มแข็งอะลูมิเนียมผสม 4% ทองแดง(Cu) ต่อความเค้นแรงดึง



## 9. การเพิ่มความแข็งแรงวิธีตกตะกอนของอะลูมิเนียมผสม กลุ่ม 6XXX

อะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้ที่มีธาตุผสมหลัก 2 ธาตุ คือ Mg 0.6-1.2% และ Si 0.4-1.3% เพราะสามารถละลายในอะลูมิเนียมได้มากที่สุดที่อุณหภูมิสูง และอาจเติมธาตุผสมปริมาณน้อยเช่น Cu, Mn, Cr, Zn, B, Pb, Bi ด้วย [21] ขั้นตอนการอบชุบทางความร้อน ดังต่อไปนี้

(1) อบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน (solution treatment) ที่อุณหภูมิ 520-560 °C อยู่ระหว่างเส้นละลายเฟส (solvus line) กับเส้นของแข็ง (solid line) เวลาแช่ที่เหมาะสม

(2) การชุบแข็ง (quenching) ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยจุ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง

(3) การบ่มแข็ง (aging) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าระหว่าง 160 °C-200 °C เวลาแช่ที่เหมาะสม 10-20 ชั่วโมง อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 6xxx เกิดตกตะกอนและเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสและความแข็งแรงอย่างต่อเนื่อง ดังนี้ เริ่มต้นจากสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด เฟส SSS ในโลหะผสมได้รับความร้อนทำให้อะตอมของธาตุผสมเกิดการแพร่ (diffusion) ทำให้เกิดตะกอนของเฟสไม่สมดุล GP Zone (รูปร่างคล้ายเข็ม) และเกิดเฟส  $\beta''$  ที่มีขนาดละเอียดและกระจายตัวไปทั่วเฟสพื้นและยังคงโคฮีเรนต์กับแมทริกซ์ ทำให้ได้ความแข็งแรงสูงสุด แต่ถ้าเวลาบ่มแข็งนานเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงไปเรื่อย ๆ เพราะว่า GP zone และ  $\beta''$  จะเปลี่ยนไปเป็น เฟส  $\beta'$  เติบโตขึ้น เปลี่ยนเป็นเฟสสมดุล  $\beta$  ที่หยาบขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างผลึกของแมทริกซ์อีกต่อไป (เฟส  $\beta$  คือ สารประกอบกึ่งโลหะของ  $Mg_2Si$  หรืออื่น ๆ ขึ้นกับธาตุผสม) สรุปว่าเฟสตะกอนที่เกิดขึ้นบนเฟสแมทริกซ์ในระหว่างการบ่มแข็ง 4 ชนิด เรียงตามลำดับดังนี้ [22]

เฟส SSS  $\rightarrow$  GP Zone  $\rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta (Mg_2Si)$

## 10. การเพิ่มความแข็งแรงโดย วิธีตกตะกอนของ

### อะลูมิเนียมผสม กลุ่ม 7XXX

อะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้ที่มีธาตุผสมหลักคือ Zn 4-8% และ Mg 1-3% และธาตุผสมปริมาณน้อย Cu, Mn, Cr, Ti

ถ้าเติม Cu 1-2% ร่วมด้วย จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมให้สูงขึ้นอีกหลังจากทำ Precipitation strengthening และสามารถให้ทำชิ้นส่วนเครื่องบินได้ เช่น AA 7075 (5.5 Zn, 2.5 Mg, 1.5 Cu) อยู่ในระบบ Al-Zn-Mg-Cu alloy ความต้านทานแรงดึงสูง (tensile strength) 572 MPa [23] ขั้นตอนการอบชุบทางความร้อนเพิ่มความแข็งแรง ดังต่อไปนี้ [24]

(1) อบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน (solution treatment) อบที่อุณหภูมิ 460-510 °C อยู่ระหว่างเส้นละลายเฟส (solvus line) กับเส้นของแข็ง (solid line) เวลาแช่ที่เหมาะสม

(2) การชุบแข็ง (quenching) ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยจุ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง

(3) การบ่มแข็ง (aging) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าระหว่าง 100-150°C เวลาแช่ที่เหมาะสม 10-20 ชั่วโมง

อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 7xxx จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสและความแข็งแรงอย่างต่อเนื่อง ดังนี้ เริ่มต้นจากสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดเฟส SSS ที่ได้รับจากขั้นตอนที่ 1 และ 2 เมื่อได้รับความร้อนทำให้อะตอมธาตุผสมเกิดการแพร่ (diffusion) ทำให้เกิดตะกอนของเฟสไม่สมดุล GP Zone ขนาดละเอียด และเฟส  $\eta''$  ที่มีขนาดละเอียดและกระจายตัวไปทั่วเฟสพื้นและยังคงโคฮีเรนต์กับแมทริกซ์ ทำให้ได้ความแข็งแรงสูงสุด แต่ถ้าเวลาบ่มแข็งนานเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงไปเรื่อย ๆ เพราะว่า GP zone และ  $\eta''$  หมดไป เพราะเปลี่ยนไปเป็นเฟส  $\eta'$  [25] และเฟสสมดุล  $\eta$  ที่หยาบขึ้นเรื่อย ๆ และไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างผลึกของแมทริกซ์ (incoherent) (เฟส  $\eta$  คือ สารประกอบกึ่งโลหะของ  $MgZn_2$  หรือถ้ามี Cu จะเกิด  $Mg (Zn, Cu, Al)_2$  อื่น ๆ ขึ้นกับธาตุผสม) สรุปว่าเฟสตะกอนที่เกิดขึ้นจากเฟสสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (SSS) ในระหว่างการบ่มแข็ง 4 ชนิด เรียงตามลำดับดังนี้ [26], [27], [28]

## 11. สรุป

อะลูมิเนียมผสมยังคงนำมาใช้ทำ ชิ้นส่วนโครงสร้างที่สำคัญของเครื่องบินรวมทั้งยานอวกาศในปริมาณที่มาก

กว่าวัสดุการบินและอวกาศชนิดอื่น ๆ เนื่องจากคุณสมบัติเด่น เช่นน้ำหนักเบากว่าเหล็กถึง 3 เท่า แต่ความแข็งแรงสูง ขึ้นรูปร่างง่าย ราคาไม่แพง มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงเนื่องจากเกิดฟิล์มออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ที่ผิว และไม่ติดไฟ ส่วนใหญ่เป็นอะลูมิเนียมผสมรีดเย็นกลุ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีอบชุบทางความร้อนได้เพื่อให้ตกตะกอนของ สารประกอบกึ่งโลหะ ขนาดละเอียด กระจายตัวไปทั่วโครงสร้างผลึกของเฟสพื้นอะลูมิเนียมผสม หรือแมทริกซ์ ได้แก่กลุ่ม 2xxx, 6xxx, 7xxx, 8xxx กระบวนการเพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีบ่มแข็งทางความร้อนประกอบด้วย 3 ขั้นตอน (1) อบละลายให้เป็นเฟสเดียว (2) ชุบแข็งหรือ quenching (3) บ่มแข็งเทียม ระยะเวลาและอุณหภูมิอบชุบในแต่ละขั้นตอนต้องกำหนดให้เหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับเกรดโลหะผสมของกลุ่มที่เราเลือกมา ตะกอนคืออนุภาคขนาดเล็กของสารประกอบของธาตุผสมหลัก เช่น Cu, Mn, Mg, Zn, Si, Li ในอะลูมิเนียมผสมกลุ่มต่าง ๆ ดังนี้ กลุ่ม 2xxx เช่น AA2024 คือ  $CuAl_2$ ,  $Al_2CuMg$ , AA2090 คือ  $Al_2CuLi$  กลุ่ม 6xxx คือ  $Mg_2Si$  กลุ่ม 7xxx เช่น AA7075 คือ  $MgZn_2$  กลุ่ม 8xxx เกรดที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องบิน คือ 8090 เป็น Al-Li alloy อนุภาคตกตะกอน คือ  $AlLi$ ,  $Al_2Li_3$  เป็นต้น ความแข็งแรงของโลหะเพิ่มขึ้นเกิดเนื่องจากอนุภาคตะกอนเหล่านี้ มีโครงสร้างผลึกยังคงต่อเนื่องกับโครงสร้างผลึกของโลหะผสมหรือแมทริกซ์ เรียกว่า coherent ทำให้ต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ ส่งผลทำให้ แรงภายนอกที่ใช้ขึ้นรูปสูงขึ้น ดังนั้นความเค้นจุดครากเพิ่มขึ้น ถ้าอนุภาคตะกอนเติบโตขึ้นจนกลายเป็นโครงสร้างผลึกอิสระแยกตัวจากโครงสร้างผลึกพื้นแมทริกซ์ ความแข็งแรงจะกลับลดลงเรียกว่าบ่มแข็งเกินขนาด การกำหนดเทมเปอร์ที่สำคัญคือ อักษร T คือ อบชุบทางความร้อนที่ใช้กับอะลูมิเนียมกลุ่มที่เพิ่มความแข็งแรงโดยวิธีบ่มแข็งให้ตกตะกอน หลัง T จะตามด้วยตัวเลข 1-5 ตัวเช่น T6-อบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวควนชิงและบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิต่ำเพื่อเร่งการตกตะกอนให้เร็วขึ้น และ T651-อบให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว ควนชิง ขึ้นรูปเย็นโดยวิธีโดย วิธียืดตัว (straightening) 1/2-3% และบ่มแข็งเทียม เป็นต้น

## 12. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Aamir, K. Giasin, M. Tolouei-Rad and A. Vafadar, "A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 12484-12500, 2020.
- [2] A. T. Kermanidis, "Aircraft aluminum alloys: Applications and future trends" . in *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*, Spiros Pantelakis and Konstantinos Tserpes Eds. NewYork: Springer Cham, 2020, pp. 21-55.
- [3] P. Rambabu, N. Eswara Prasad, V. V. Kutumbarao and R. J. H Wanhill, "Aluminium alloy for Aerospace Application," in *Aerospace Materials and Material Technologies Vol1: Aerospace Materials*, N. Eswara Prasad and R. J. H Wanhill, Eds. , Singapore: Springer Nature, 2017, pp. 29-52.
- [4] Abd EL-Hameed, M. Afaf and Y. A. Abdel-Aziz, "Aluminium Alloys in Space Applications: A Short Report," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 2 no. 1, pp. 1-7, 2021.
- [5] O. Ostash, V. Uchanin, O. Semenets, Y. Holovatyuk, L. Kovalchuk and V. Derecha, "Evaluation of aluminium alloys degradation in aging aircraft," *Research in Nondestructive evaluation*, vol. 29, no. 3, pp. 156-166, 2018.
- [6] E. Georgantzia, M. Gkantou and G. S. Kamaris, "Aluminium alloys as structural material: A review of research," *Eng. Struct.*, vol. 227, 111372, Jan 2021.
- [7] John Weritz, "Aluminum alloy nomenclature and temper designations" in *Aluminum*

- Science and Technology*, Kevin Anderson, John Weritz, and J. Gilbert Kaufman, Eds. OH, Materials Parks: ASM International, 2018, pp.3-30.
- [8] S. J. Andersen, C. D. Marioara, J. Friis, S. Wenner and R Holmestad, “Precipitates in aluminium alloys,” *Advances in physics: X*, vol. 3, no. 1, 1479984, 2018.
- [9] H. Fröck, L. V. Kappis, M. Reich, O. Kessler, “A Phenomenological Mechanical Material Model for Precipitation Hardening Aluminium Alloys,” *Metals*, vol. 9, no. 11, p. 1165, 2019.
- [10] W. Lee, J. Lee, W. Kyoung, H. Lee, H. Lee and D. Kim, “Effect of inhomogeneous composition on the thermal conductivity of an Al alloy during the precipitation-hardening process,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 10139- 10147, 2020.
- [11] L. Tian, Y. Guo, J. Li, J. Wang, H. Duan and F. Xia, “Elevated re-aging of a piston aluminium alloy and effect on microstructure and mechanical properties,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 738, pp. 375-379, 2018.
- [12] H. Chen, Z. Chen, G. Ji, S. Zhong, H. Wang, A. Borbély, Y. Ke and Y. Bréchet, “Experimental and modelling assessment of ductility in a precipitation hardening Al MgScZr alloy,” *International Journal of Plasticity*, vol. 139, 2021.
- [13] Y. Fan and M. Makhlof, “Precipitation strengthening in aluminum– zirconium– vanadium alloys,” *Journal of Alloy and Compounds*, vol. 725, pp. 171-180, 2017.
- [14] W. Sun, Y. Zhu, R. Marceau, L. Wang, Q. Zhang, and X. Gao, “Precipitation strengthening of aluminum alloys by room-temperature cyclic plasticity,” *Science*, vol. 363, no. 6430, pp. 972-975, 2019.
- [15] Y. Li, B. Holmedal, H. Li, L. Zhuang, J. Zhang and Q. Du, “Precipitation and strengthening modeling for disk- shaped particles in aluminum alloys: Size distribution consider” *Journal of Materialia*, vol 4, pp. 431-443, 2018.
- [16] R. Santos-Güemes, B. Bellón and G. Esteban - Manzanares, “Multiscale modelling of precipitation hardening in Al– Cu alloys: Dislocation dynamics simulations and experimental validation,” *Acta Materialia*, vol.188, pp.475-485, April 2020.
- [17] J. V. de Sousa Araujo, M. X. Milagre, R. O. Ferreira, C. S. C. Machado, C. P. de Abreu and I. Costa, “Microstructural Characteristics of Al Alloys: The Dissimilarities Among 2XXX Alloys Series used in Aircraft Structures,” *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 9, no. 5 pp. 744-758, 2020.
- [18] M. Prudhomme, F. Billy, J. Alexis, G. Benoit, “Effect of actual and accelerated ageing on microstructure evolution and mechanical properties of a 2024- T351 aluminium alloy,” *International Journal of Fatigue*, vol. 107, pp. 60-71, 2018.
- [19] J. L. García - Hernández, C. G. Garay-Reyes and R. Martínez- Sánchez, “Influence of Plastic Deformation and Cu/ Mg Ratio on the Strengthening Mechanisms and Precipitation Behavior of AA 2024 Aluminium Alloy,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, pp. 5471-5475, 2019.

- [20] V. S. Krasnikov, A. E. Mayer, V. V. Pogorelko, and M. R. Gazizov, "Influence of  $\theta'$  Phase Cutting on Precipitate Hardening of Al–Cu Alloy during Prolonged Plastic Deformation: Molecular Dynamics and Continuum Modeling," *A ppl. Sci.*, vol. 11, no. 11, p. 4906, 2021.
- [21] Y. Weng, Y. Xu, L. Ding, Z. Jia, Z. Zhang and J. Chen, "Effect of Sn contents on natural aging and precipitation hardening in Al-Mg-Si alloys," *Materials Characterization*, vol. 179, 111383, 2021.
- [22] F. Qian, D. Zhao, E.A. Mørtzell, S. Jin and J. Wang, "Enhanced nucleation and precipitation hardening in Al–Mg–Si (–Cu) alloys with minor Cd additions," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 792, 139698, 2020.
- [23] J. Osten, B. Milkereit, M. Reich, B. Yang and A. Springer, "Development of precipitation hardening parameters for high strength alloy AA 7068," *Materials*, vol. 13, no. 4, 918, 2020.
- [24] S. H. Lee, J.G. Jung, S.I. Baik, D.N. Seidman, M. S. Kim, Y. K. Lee and K. Euh, "Precipitation strengthening in naturally aged Al–Zn–Mg–Cu alloy," *Materials Science and Engineering : A*, vol. 803, 140719, 2021.
- [25] M. Chemingui, R. Ameur, V. Optasanu and M. Khitouni, "DSC analysis of phase transformations during precipitation hardening in Al–Zn–Mg alloy (7020)." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 136 no. 5, pp. 1887-1894, 2019.
- [26] R. BAKHSHI, M. H. FARSHIDI and S. A. SAJJADI, "Strengthening of aluminium alloy 7005 through imposition of severe plastic deformation supplemented by different ageing treatments," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 31, pp. 2909–2921, 2021.
- [27] A. Azarniya, A. K. Taheri and K. K. Taheri, "Recent advances in ageing of 7xxx series aluminum alloys: a physical metallurgy perspective," *Journal of Alloys and Compound*, vol. 781, pp. 945-983, 2019.
- [28] J. A. Österreicher, G. Kirov, S. S. A. Gerstl, E. Mukeli., "Stabilization of 7xxx aluminium alloys." *Journal of alloys and compounds*, vol. 740, pp. 167-173, 2018.

## การออกแบบและสร้างเครื่องตัดฟางข้าว

### Design and Fabrication of Straw Cutting Machine

ปณณวิชญ์ ทองคำ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์\* รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ สุนัน ปานสาคร

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Pannawit Thongkham Jaturong Langkapin\* Roongruang Kalsirisilp Sunan Parnsakhorn

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani 12110, THAILAND

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

(Received: April 14, 2022; Revised: September 18, 2022 ; Accepted: September 29, 2022)

#### บทคัดย่อ

เครื่องตัดฟางข้าวถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดเวลาและแรงงานคนในการตัดฟางข้าวสำหรับนำฟางข้าวมาแปรรูปเป็นกระดาษ โดยเครื่องตัดฟางข้าวประกอบด้วย ชุดโครงสร้างเครื่อง ชุดป้อนลำเลียง ชุดใบมีดตัด และระบบส่งกำลัง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง โดยทดสอบที่ความเร็วของใบมีด 3.03, 6.27 และ 7.80 m/min และ มุมของใบมีด 25, 45 และ 65° ตามลำดับ ผลการทดสอบของเครื่องตัดฟางข้าวพบว่าความเร็วของใบมีดที่มีความสามารถในการทำงานที่ดีที่สุดคือ 7.80 เมตรต่อนาที และมีมุมของใบมีด 45° มีความสามารถในการตัดฟางข้าวเท่ากับ 8.39 kg/hr มีเปอร์เซ็นต์การตัดฟางข้าว 64.4% และมีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.74 kW-hr ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าเมื่อใช้เครื่องตัดฟางข้าว 2,000 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่อง 50.7 บาทต่อชั่วโมง มีระยะเวลาในการคืนทุน 10.12 เดือน จุดคุ้มทุนในการทำงาน 467.4 ชั่วโมงต่อปี และพบว่าเครื่องตัดฟางข้าวมีความสามารถในการทำงานมากกว่าแรงคนประมาณ 6.7 เท่า

**คำสำคัญ:** ฟางข้าว, การออกแบบ, เครื่องตัดฟางข้าว, เครื่องตัด

#### ABSTRACT

The straw cutting machine was designed and built to minimize the time and labor requirement in straw cutting for straw paper processing. The straw cutting machine consists of a set of machine structures, feeding unit, cutting blade unit, power transmission unit and a 1 hp electric motor which was used as a prime mover. The results of the prototype testing revealed that among the blade speeds of 3.03, 6.27, and 7.80 m/min and blade angles of 25, 45, and 65° respectively, the machine performed best at 7.80 m/min and blade angles of 45°, capable of running at 8.39 kg/hr. The percentage of cutting was 64.4% with power consumption was 0.74 kW-hr. Based on the analysis of engineering economics, it was found that the straw cutting machine worked 2,000 hours per year, with an average cost of 50.7 baht per hour. The payback period was 10.12 months and the break-even point of the machine was 467.4 hours per year. This prototype can work at least 6.7 times as fast as human labor.

**Keyword:** straw, design, straw cutting machine, cutter.

## 1. บทนำ

ข้าว เป็นเมล็ดของพืชในสกุลข้าวที่พบมากในเอเชีย ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Oryza sativa* ข้าวเป็นธัญพืชซึ่งประชากรโลกบริโภคเป็นอาหารสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปเอเชีย ข้าวเป็นธัญพืชซึ่งมีการปลูกมากที่สุดเป็นอันดับสองทั่วโลก รองจากข้าวโพด ข้าวเป็นธัญพืชสำคัญที่สุดในด้านโภชนาการและการได้รับแคลอรีของมนุษย์ เพราะข้าวโพดส่วนใหญ่ปลูกเพื่อจุดประสงค์อื่น มิใช่ให้มนุษย์บริโภค ทั้งนี้ ข้าวคิดเป็นพลังงานกว่าหนึ่งในห้าที่มนุษย์ทั่วโลกบริโภค ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 64 ล้านไร่ ได้ผลผลิตข้าว 24 ล้านตัน [1] การปลูกข้าวนั้นเกิดขึ้นควบคู่ไปกับวัฒนธรรมไทยมากกว่า 5,500 ปีมาแล้ว โดยหลักฐานทางประวัติศาสตร์ที่สำคัญก็คือเครื่องปั้นดินเผาที่เป็นภาชนะไวใส่ข้าว ในสมัยสุโขทัย ศิลาจารึกยังถูกบันทึกไว้ด้วยข้อมูลที่ระบุถ้อยคำว่า "ในน้ำมีปลา ในนามีข้าว" นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญที่สุดในประวัติศาสตร์ก็คือการเปิดเสรีทางการค้ากับต่างประเทศ ในสมัยอยุธยา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ข้าวเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเป็นสินค้าส่งออกของประเทศไทยตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา [2] ซึ่งประเทศไทยนิยมปลูกข้าวสายพันธุ์ ข้าวหอมมะลิ ข้าวเหนียว ข้าวขาว และข้าวเพื่อสุขภาพสำหรับประเทศไทยข้าวที่ปลูกจะเป็นชนิด indica โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ข้าวเจ้าและข้าวเหนียว นอกจากนี้พันธุ์ข้าวยังได้ถูกปรับปรุงและคัดสรรสายพันธุ์มาโดยตลอด จึงทำให้มีหลากหลายสายพันธุ์ทั่วโลกที่มีรสชาติและคุณสมบัติของข้าวที่แตกต่างกันออกไป โดยพันธุ์ข้าวไทยที่มีชื่อเสียงระดับโลกก็คือ ข้าวหอมมะลิ โดยข้าวที่มีคุณค่าทางอาหารสูงก็คือ ข้าวกล้อง ข้าวซ้อมมือ ข้าวกล้องงอก และข้าวเสริมวิตามิน [3] ซึ่งหลังจากการเก็บเกี่ยวจะมีปริมาณฟางข้าวจำนวนมาก แต่การนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มคุณค่าและมูลค่าเชิงเศรษฐกิจนั้นมีจำนวนที่น้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเกษตรกรยังขาดความรู้ความเข้าใจและเทคโนโลยีในการนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์ ส่งผลให้เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมเผาทำลายฟางข้าว เพื่อการเตรียมดินทำนาปีต่อไป การเผาฟางข้าวทั้งของเกษตรกรนี้ทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าและมูลค่าเชิง

เศรษฐกิจอย่างมากทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมามากมาย เช่น ทำให้พื้นที่เพาะปลูกเสื่อมโทรมเผาผลาญอินทรีย์วัตถุและธาตุอาหารในดิน ทำลายโครงสร้างดินที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชลงอย่างต่อเนื่องทุกปี ก่อให้เกิดเขม่าควัน เถ้า ฝุ่นละออง ก๊าซพิษ ส่งผลเสียต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดการเสียสมดุลธรรมชาติ อากาศร้อน ขึ้น เป็นต้น แคมยังทำให้เกิดมลภาวะโลกร้อน ทำให้น้ำแข็งที่ขั้วโลกละลายอาจทำให้เกิดน้ำท่วมขึ้นได้ [4]

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยในการปลูกข้าวแต่ละครั้งย่อมมีฟางข้าวที่หลงเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก จะเผาทิ้งก็จะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ และปัญหาอื่น ๆ อีกตามมา ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดในการทำกระดาดจากฟางข้าวโดยกลุ่มแม่บ้านแสงตะวัน ต. กระแซง อ.สามโคก จ.ปทุมธานี มีวิธีการทำกระดาดจากฟางข้าวดังนี้ โดยในขั้นตอนแรกในการทำคือ การตัดฟางข้าวให้มีขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว ให้ได้ปริมาณพอสมควร หลังจากตัดฟางข้าวเสร็จแล้วก็นำฟางข้าวมาใส่หม้อที่ต้มน้ำไว้ แล้วใส่โซดาไฟลงไปต้มด้วย โดยจะทำการต้มฟางประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ฟางอ่อนตัวลง เมื่อฟางอ่อนตัวลงแล้ว ก็นำมาล้างมือออกด้วยความระมัดระวัง ให้ปลอดภัยก็ควรดูมืออย่างในการทำ หลังจากนั้นก็นำฟางที่ล้างสะอาดแล้วมาใส่ลงในเครื่องปั่น ใส่เข้าไปประมาณ 1 ถ้วยตวง แล้วจึงปั่น ปั่นฟางจนละเอียดแล้ว ก็นำมาใส่ลงในแบบที่ทำกระดาด เกลี่ยฟางให้เสมอกัน แล้วจึงไปตากแดดทิ้งไว้จนกระดาดแข็ง แล้วจึงลอกกระดาดออกจากแม่แบบ ก็จะได้กระดาดจากฟางข้าวแล้ว ซึ่งการทำกระดาดในแต่ละครั้งต้องใช้ฟางข้าวจำนวนมากทำให้ต้องสับฟางข้าวเป็นจำนวนมาก โดยในการทำนั้นจะต้องใช้มีดในการสับฟางข้าวและต้องสับฟางข้าวให้มีขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว แล้วจึงนำฟางข้าวที่ตัดได้ไปทำในขั้นตอนต่อไป [5] ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะต้องใช้แรงงานคนในการตัดฟางข้าวเป็นหลัก ดังรูปที่ 1 ทำให้มีความเสี่ยงต่อการถูกมีดบาดและมีอาการปวดเมื่อย ใช้เวลานานและใช้แรงงานในการตัดค่อนข้างมาก จึงเกิดแนวคิดในการออกแบบและสร้างเครื่องตัดฟางข้าวเพื่อนำมาใช้ในการตัดฟางข้าว เพื่อลด

แรงงานคนและเวลาที่ใช้ในการตัดฟางข้าวลง โดยฟางข้าวที่ตัดได้จะถูกนำไปทำเป็นกระดาดจากฟางข้าว ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 การตัดฟางข้าวด้วยแรงงานคน



รูปที่ 2 กระดาดจากฟางข้าว [5]

## 1. วัตถุประสงค์

ออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดฟางข้าวเพื่อช่วยลดระยะเวลาและแรงงานในการตัดฟางข้าว ลดอันตรายที่เกิดจากการทำงาน และเพิ่มผลผลิตในการเตรียมวัสดุ ทำให้สามารถผลิตกระดาดจากฟางข้าวสำหรับชุมชนได้มากยิ่งขึ้น

## 2. วิธีดำเนินงาน

### 3.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดฟางข้าว

การศึกษาลักษณะกายภาพของฟางข้าว เพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของฟางข้าวได้แก่ ขนาดความยาว

และเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบช่องใส่ฟางข้าว และการปรับตั้งต่าง ๆ ที่จำเป็นของการออกแบบและสร้างเครื่อง ซึ่งได้ออกแบบขนาดช่องใส่สำหรับฟางข้าว และระยะสำหรับการวางใบมีดตัดเพื่อให้สามารถใส่ฟางข้าวได้พอดีกับช่องลำเลียง

ศึกษาชุดใบมีดตัดที่เหมาะสม จากการศึกษาข้อมูลทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับฟางข้าว โดยส่วนมากเกษตรกรจะใช้กรรไกรกับมีดในการตัดฟางข้าว ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ชาวบ้านสามารถหาได้ทั่วไปตามท้องตลาดมาใช้ในการตัดฟางข้าว โดยในการตัดฟางข้าวจะต้องตัดให้ได้ฟางข้าวเป็นเส้นสั้น ๆ โดยฟางข้าวที่ตัดได้จะมีขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว ดังรูปที่ 4 ดังนั้นเครื่องตัดฟางข้าวที่สร้างขึ้นจึงเลือกใช้วัสดุจากอะลูมิเนียมมาใช้ในการตัดฟางข้าว เพราะไม่เป็นสนิม มีน้ำหนักค่อนข้างเบา หาซื้อได้ตามท้องตลาด และสามารถตัดฟางข้าวขาดได้ค่อนข้างง่าย

เครื่องตัดฟางข้าว มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ โครงสร้างเครื่อง ชุดป้อนลำเลียง ชุดใบมีดตัด และระบบต้นกำลัง ซึ่งวิธีการออกแบบนั้นจะดำเนินการโดยรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับฟางข้าว รวมถึงการประยุกต์ใช้ความรู้และหลักการทางวิศวกรรมศาสตร์มาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตัดฟางข้าว หลังจากรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นต่อการศึกษาและสร้างเครื่องตัดฟางข้าว การออกแบบจึงต้องมีการปรับระยะห่างของลูกกลิ้งที่จะใช้ในการลำเลียงฟางข้าว จึงต้องศึกษาลักษณะกายภาพของฟางข้าวรูปที่ 3 จากการศึกษาพบว่าฟางข้าวที่สั้นที่สุดจะมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 40 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 2 มิลลิเมตร และฟางข้าวที่โตเต็มที่จะมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 80 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 4 มิลลิเมตร จึงจำเป็นต้องออกแบบลูกกลิ้งเพื่อให้เหมาะสมกับฟางข้าวสำหรับการลำเลียงฟางข้าวไปยังใบมีดตัด ส่วนต้นกำลังที่จะทำการส่งกำลังไปยังกลไกต่าง ๆ นั้นเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า เป็นตัวส่งกำลัง [6] โดยใช้สมการสูตรการคำนวณหาค่ากำลังของมอเตอร์ 1 เฟส ได้จาก  $P = (V \times I \times PF \times EFF) / 1000$  หลังจากคำนวณแล้วจะได้ค่าเท่ากับ 0.32 kW แปลงเป็นแรงม้าจะมีค่าเท่ากับ

0.43 แรงม้า ดังนั้นมอเตอร์ 1 แรงม้า จึงเพียงพอต่อการเป็นมอเตอร์ต้นกำลัง ในการส่งกำลังไปยังกลไกต่าง ๆ ซึ่งเครื่องตัดฟางข้าวจะมีชุดกลไกเจนีวในการขับเคลื่อนลูกกลิ้งลำเลียง [7] โดยตัวกลไกเจนีวที่สร้างขึ้นมาจะต้องเข้ากับชุดลูกกลิ้งลำเลียงฟางข้าว เพื่อให้ลูกกลิ้งลำเลียงฟางข้าวไปยังชุดใบมีดตัด โดยกลไกเจนีวจะทำงานด้วยการหมุนไปหนึ่งครั้งก็จะรอบครั้งต่อไป โดยในแต่ละครั้งที่กลไกเจนีวทำการหมุนก็จะทำให้ลูกกลิ้งลำเลียงหมุนตามไปด้วย และเมื่อลูกกลิ้งลำเลียงหมุนไปจะทำให้ฟางข้าวเคลื่อนที่ลงไปถึงตรงช่องใบมีดตัด ซึ่งใบมีดตัดจะถูกติดตั้งกับกลไก scotch yoke เพื่อให้ใบมีดเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา [8] ใบมีดจะได้ทำงานได้ต่อเนื่อง และใบมีดก็จะทำการตัดฟางข้าวให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ โดยในการออกแบบใช้หลักการทางวิศวกรรม และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ และเขียนแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3 ลักษณะของฟางข้าวก่อนตัด

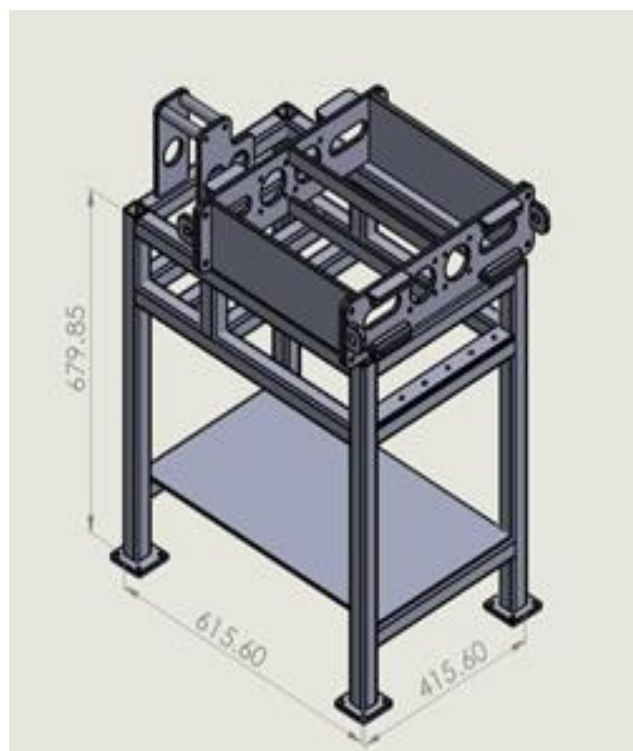
### 3.1.1 โครงสร้างเครื่อง

ทำหน้าที่เป็นโครงใช้เป็นที่ยึดให้กับ ระบบส่งกำลัง ชุดใบมีดและชุดป้อนลำเลียง ทำจากเหล็กกล่องขนาด 38×38×3.2 มิลลิเมตร นำมาตัดและประกอบ ให้มีขนาด

ความกว้าง x ความยาว x ความสูง เท่ากับ 415 มิลลิเมตร 615 มิลลิเมตร 680 มิลลิเมตร มีลักษณะ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ฟางข้าวที่ตัดได้ตามขนาดที่ต้องการ

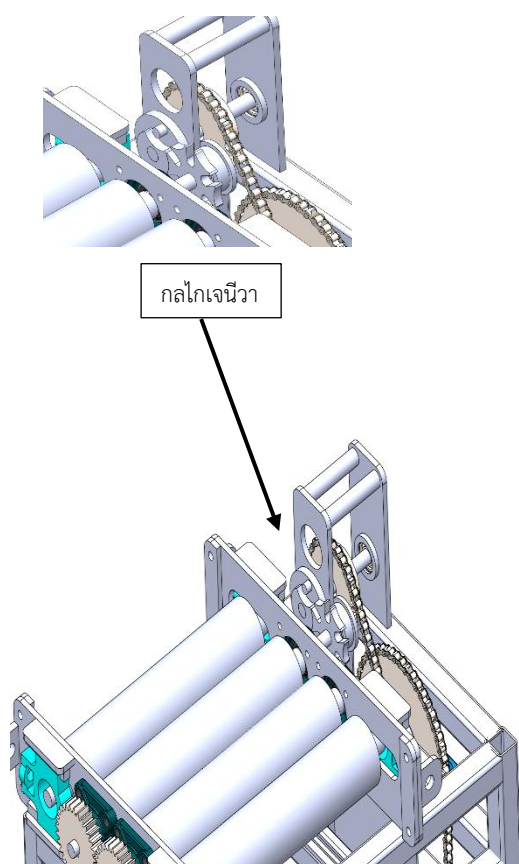


รูปที่ 5 โครงสร้างเครื่อง



### 3.1.2 ชุดป้อนลำเลียง

ชุดป้อนลำเลียงฟางข้าว ใช้ในการป้อนฟางข้าวเข้าไปยังชุดใบมีดเพื่อให้ชุดใบมีด ตัดฟางข้าวให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ชุดป้อนลำเลียงจะใช้กลไกเจนิวาในการทำงาน ซึ่งกลไกเจนิวา จะต่อเข้ากับเพลลาที่ติดอยู่กับชุดป้อนลำเลียง โดยเมื่อกลไกเจนิวาทำงาน ตัวลูกกลิ้งลำเลียงก็จะทำงานด้วย โดยลูกกลิ้งป้อนลำเลียงทำจากเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร จำนวน 4 ลูก ชุดป้อนลำเลียงและกลไกเจนิวามีลักษณะดังรูปที่ 6

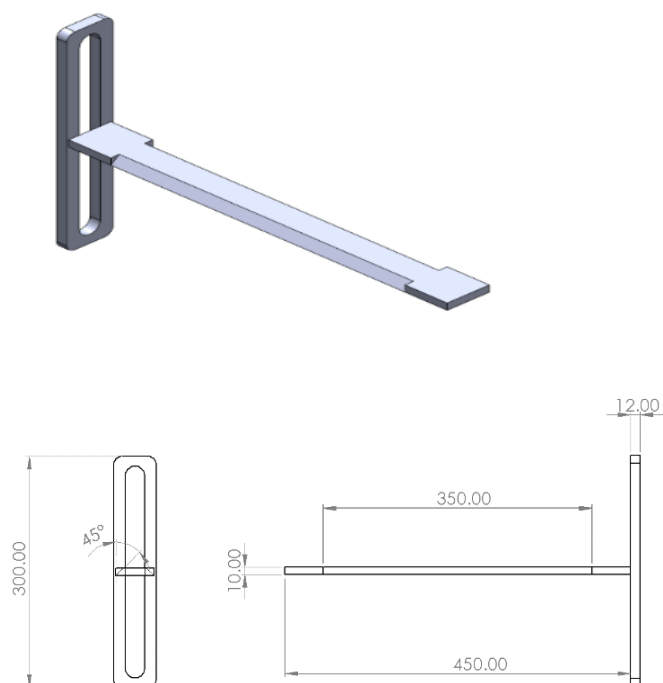
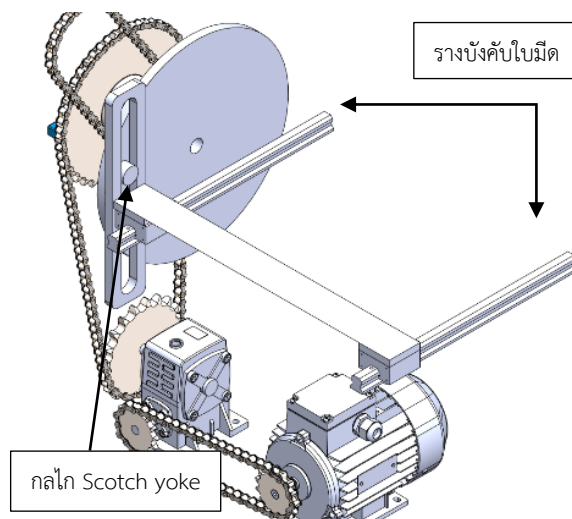


รูปที่ 6 ชุดป้อนลำเลียงและกลไกเจนิวา

### 3.1.3 ชุดใบมีดตัด

ชุดใบมีดใช้ในการตัดฟางข้าวให้ขาดออกจากกัน โดยการใช้ใบมีดเป็นตัวตัด ซึ่งใบมีดจะถูกออกแบบมาให้เหมาะสมกับการตัดฟางข้าว ใบมีดทำจากแผ่นอะลูมิเนียม โดยผ่านการควบคุมจังหวะในการตัด ด้วยกลไก scotch

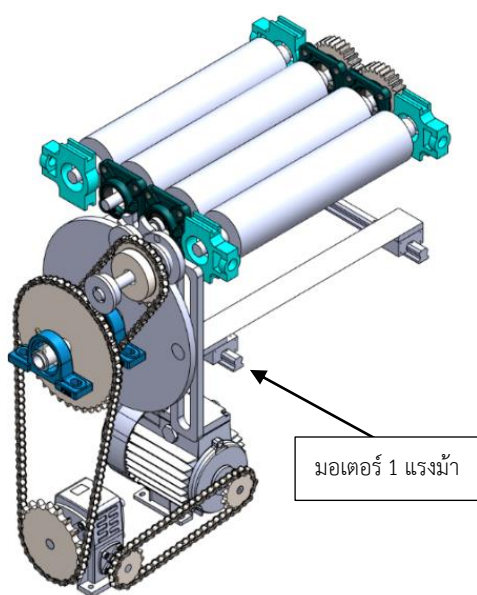
yoke โดยการออกแบบกลไกตัวนี้เพื่อให้ใบมีดเคลื่อนที่กลับไปและกลับมา จะทำให้ตัดฟางข้าวได้ต่อเนื่อง โดยตัวกลไกนี้จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง โดยจะมีรางบังคับยึดติดอยู่ที่หัวกับปลายใบมีดเพื่อให้ใบมีดเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ทำให้ได้ขนาดความยาวมาที่ต้องการ โดยชุดใบมีดมีลักษณะ ดังรูปที่ 7



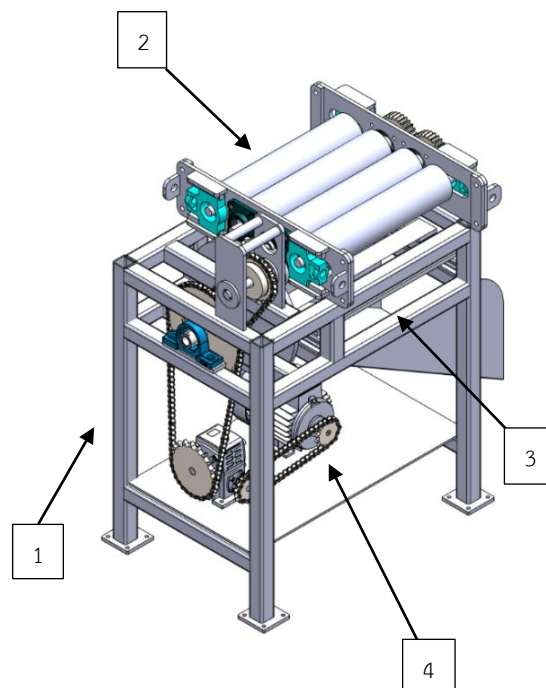
รูปที่ 7 ชุดใบมีดตัด

### 3.1.4 ชุดส่งกำลัง

ชุดระบบส่งกำลัง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง เพื่อถ่ายทอดกำลังไปยังเกียร์ทดขนาด 1:20 ด้วยโซ่ หลังจากนั้นส่งถ่ายกำลังไปยังชุดใบมีด และจากชุดใบมีดก็ถูกส่งต่อไปยังชุดลูกกลิ้งลำเลียงด้วยเฟืองและโซ่ เพื่อให้ชุดกลไกต่าง ๆ ทำงาน ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า ชุดส่งกำลังมีลักษณะ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ชุดส่งกำลัง



| หมายเลข | รายละเอียด       |
|---------|------------------|
| 1       | โครงสร้างเครื่อง |
| 2       | ชุดป้อนลำเลียง   |
| 3       | ชุดใบมีดตัด      |
| 4       | ชุดส่งกำลัง      |

รูปที่ 9 การเขียนแบบทางวิศวกรรม

### 3.1.5 ผลการออกแบบเครื่องตัดฟางข้าว

รายละเอียดในการออกแบบเครื่องตัดฟางข้าว มีส่วนประกอบหลักคือ โครงสร้างเครื่อง ชุดป้อนลำเลียง ชุดใบมีดตัด และชุดส่งกำลัง โดยมีมอเตอร์ 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง ในการถ่ายทอดกำลังไปยังกลไกต่าง ๆ ด้วยเฟืองและโซ่ เพื่อให้ชุดป้อนลำเลียง ได้ลำเลียงฟางข้าวไปยังชุดใบมีดตัด ด้วยกลไกเจนิวา โดยใบมีดตัดจะทำงานด้วยกลไก Scotch yoke ทำงานแบบกลับไปกลับมาเมื่อตัดฟางข้าวเสร็จแล้วก็จะไหลลงไปในช่องที่รองรับฟางข้าว โดยรายละเอียดการเขียนแบบทางวิศวกรรม แสดงดังรูปที่ 9 และเครื่องตัดฟางข้าวที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 เครื่องตัดฟางข้าวที่สร้างเสร็จแล้ว

### 3.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบเครื่องตัดฟางข้าวมีวัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องดำเนินการทดสอบดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักของฟางข้าวให้น้ำหนักเท่า ๆ กันทุกการทดสอบ

2. สำหรับการทดสอบความสามารถในการตัดฟางข้าว จะใช้ฟางข้าวทดสอบครั้งละ 500 กรัม จะทำการชั่งน้ำหนักของฟางข้าวก่อนที่จะนำฟางข้าวเข้าเครื่องตัดฟางข้าว โดยการทดสอบจะใช้ฟางข้าวที่มีขนาดความยาวใกล้เคียงกันในการทดสอบ การทดสอบที่มีความเร็วใบมีดที่ต่างกัน 3 ความเร็วรอบของใบมีด โดยความเร็วใบมีดที่ใช้ในการทดสอบคือ 3.03, 6.27 และ 7.80 เมตรต่อนาที หรือที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 1,000 และ 1,500 รอบต่อ นาที ตามลำดับ และทดสอบมุมของใบมีดในการตัดฟางข้าวโดยมุมของใบมีดที่ใช้ในการทดสอบคือ 25 องศา, 45 องศา และ 65 องศา ดังรูปที่ 11 พร้อมจับเวลาการทำงานของเครื่องตัดฟางข้าว คำนวณความสามารถในการทำงาน เปอร์เซ็นต์ในการตัดฟางข้าว และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

3. โดยการทดสอบจะเปิดเครื่องแล้วจึงนำฟางข้าวใส่ลงไปในช่องป้อน เพื่อให้ฟางข้าวถูกกล่าเลียงไปยังชุดใบมีดตัด และให้เครื่องทำการตัดฟางข้าวให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ โดยในแต่ละการทดสอบจะทำการทดสอบจากใบมีดที่มุม 25 องศา แล้วจึงเริ่มการทดสอบที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ได้กำหนดเอาไว้ คือความเร็วใบมีด 3.03, 6.27 และ 7.80 เมตรต่อนาที หลังจากทดสอบความเร็วของใบมีดที่มุม 25 องศา เสร็จแล้ว จึงทำการถอดใบมีดอันเก่าออกแล้วนำใบมีดอันใหม่ที่ต้องการการทดสอบใส่เข้าไปแทน โดยจะทำการทดสอบทั้งหมด 5 ซ้ำ พร้อมจับเวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด ซึ่งปัจจัยที่นำมาพิจารณาได้แก่ความสามารถในการทำงาน เปอร์เซ็นต์ในการตัดฟางข้าว การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของเครื่อง



รูปที่ 11 ใบมีดที่ใช้ในการทดสอบ ที่มีมุมใบมีดต่างกัน

รูปที่ 11 ใบมีดที่ใช้ในการทดสอบ ที่มีมุมใบมีดต่างกัน

1) ความสามารถในการทำงานของเครื่องตัดฟางข้าว  
คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$C_c = \frac{W_1}{t} \quad (1)$$

เมื่อ  $C_c$  = ความสามารถในการตัดฟางข้าว  
(กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

$W_1$  = น้ำหนักฟางข้าวที่ตัดได้ตาม  
ขนาด (กิโลกรัม)

$t$  = เวลาที่ใช้ในการทำงาน (ชั่วโมง)

2) เปอร์เซ็นต์ในการตัดฟางข้าวที่ตัดได้ตาม  
ขนาดที่ต้องการ คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$C_t = \frac{W_1}{W} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ  $C_t$  = เปอร์เซ็นต์การตัดฟางข้าว (%)

$W_1$  = น้ำหนักของฟางข้าวที่ตัดได้ตาม  
ขนาด (kg)

$W$  = น้ำหนักของฟางข้าวทั้งหมด

3) อัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการที่ (3) [9]

$$P = \frac{IVt}{1000} \quad (3)$$

เมื่อ  $P$  = การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า  
(kW-hr)

$I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

$V$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

$t$  = เวลา (ชั่วโมง)

4) วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์วัตถุดิบประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทำงานจุดคุ้มทุน และวิเคราะห์หาระยะเวลาในการคืนทุนของเครื่อง วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวม ในการใช้งาน โดยพิจารณาจาก เกษตรกรซื้อเครื่องแทนวิธีการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วยต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และต้นทุนผันแปร (Variable cost) โดยต้นทุนคงที่ได้แก่ ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องตัดฟางข้าวเท่ากับ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดอัตราดอกเบี้ย 10 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการใช้งานของเครื่อง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จะไม่คิดต้นทุนคงที่เกี่ยวกับประกันภัย ค่าภาษี ค่าโรงเรือน และค่าจ้างขนย้ายเครื่องไปทำงานตามสถานที่ต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับต้นทุนแปรผันซึ่งเป็นต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการทำงาน ได้แก่ ค่าจ้างแรงงานคนเพื่อทำงานร่วมกับเครื่อง ค่าไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษาและค่าซ่อมแซม เป็นต้น

(1) ค่าเสื่อมราคา (Depreciation) คำนวณได้จากสมการที่ (4) [10]

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

เมื่อ  $D$  = ค่าเสื่อมราคา (บาท/ปี)

$P$  = ราคาเครื่องจักร (บาท)

$S$  = มูลค่าซาก (บาท)

$L$  = อายุการใช้งาน (ปี)

(2) ค่าดอกเบี้ย หรือค่าเสียโอกาสในการลงทุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) [10]

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

เมื่อ  $I$  = ค่าดอกเบี้ย (บาท/ปี)

$P$  = ราคาเครื่องจักร (บาท)

$S$  = มูลค่าซาก (บาท)

$i$  = อัตราดอกเบี้ยทศนิยม

(3) ระยะเวลาในการคืนทุน (Pay Back Period, PBP)

เป็นการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องจักรว่ามีระยะเวลานานเท่าไร เมื่อลงทุนในเครื่องจักรไปแล้วจะได้ผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปแล้วภายในระยะเวลาที่ปีคำนวณได้จากสมการที่ (6) [11]

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

เมื่อ  $PBP$  = ระยะเวลาในการคืนทุน (ปี)

$P$  = ราคาเครื่องจักร (บาท)

$R$  = กำไรสุทธิต่อปี (บาท/ปี)

(4) จุดคุ้มทุน (Break Even Point)

จุดคุ้มทุนในการทำงานของเครื่องคือจุดที่รายได้และรายจ่ายจากการใช้เครื่องมีค่าเท่ากัน หรือจุดที่ไม่ก่อให้เกิดผลกำไร คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างผลรวมของค่าใช้จ่ายคงที่กับผลต่างระหว่างอัตราการผลิตและค่าใช้จ่ายผันแปร ดังสมการที่ (7) [11]

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

เมื่อ  $BEP$  = จุดคุ้มทุน (ชั่วโมง/ปี)  
 $F_c$  = ค่าใช้จ่ายคงที่ (บาท/ปี)  
 $B$  = อัตราการรับจ้าง (บาท/ชั่วโมง)  
 $VC$  = ค่าใช้จ่ายผันแปร (บาท/ชั่วโมง)

(5) ค่าใช้จ่ายรวมของเครื่อง (Total Cost)

ค่าใช้จ่ายรวมของเครื่องตัดฟางข้าว ได้แก่ ผลรวมค่าใช้จ่ายคงที่และค่าใช้จ่ายผันแปร คำนวณได้จากสมการที่ (8) [11]

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

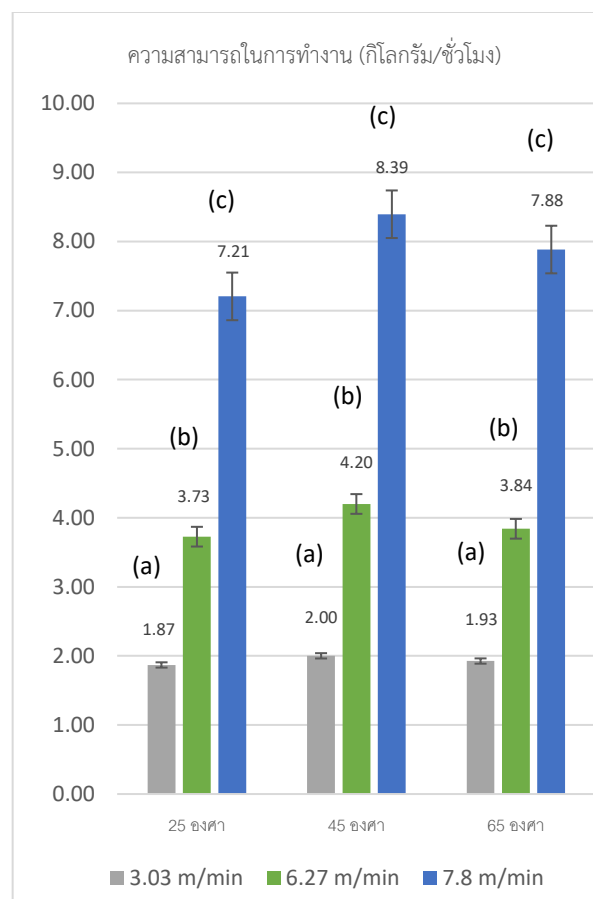
เมื่อ  $TC$  = ค่าใช้จ่ายรวมของเครื่อง (บาท/ชั่วโมง)  
 $F_c$  = ค่าใช้จ่ายคงที่ (บาท/ปี)  
 $X$  = ชั่วโมงการทำงานต่อปี (ชั่วโมง)  
 $VC$  = ค่าใช้จ่ายผันแปร (บาท/ชั่วโมง)

#### 4. ผลการศึกษา

##### 4.1 ความสามารถในการทำงานของเครื่องตัดฟางข้าว

จากผลการทดสอบเครื่องตัดฟางข้าวมีความสามารถในการตัดฟางข้าวเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของใบมีดตัดที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความเร็วใบมีดตัดคือ 3.03, 6.27 และ 7.80 เมตรต่อนาที และมุมใบมีด 25°, 45° และ 65° จากรูปที่ 12 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การตัดที่ดีที่ความเร็ว ใบมีด 7.80 เมตรต่อนาที และมีมุมใบมีดอยู่ที่ 45 องศา จะมีความสามารถในการตัดอยู่ที่ 8.39 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และจะมีความสามารถในการตัดที่น้อยที่สุดอยู่ที่ความเร็ว ใบมีด 3.03 เมตรต่อนาที และมุมใบมีดอยู่ที่ 25 องศา คือ 1.87 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะเห็นว่าความสามารถในการตัดฟางข้าวได้ดีที่สุดคือมุม 45 องศา เนื่องจาก 25 องศา มีมุมของใบมีดที่น้อยเกินไป กับมุม 65 องศา มีมุมค่อนข้างที่จะ

มากจนเกินไปจึงทำให้ตัดฟางข้าวขาดไม่หมด หรืออาจจะขึ้นอยู่กับความเร็วของใบมีด ยิ่งมีความเร็วใบมีดสูงก็จะทำให้ความสามารถในการตัดฟางข้าวมีมากด้วยเช่นกัน

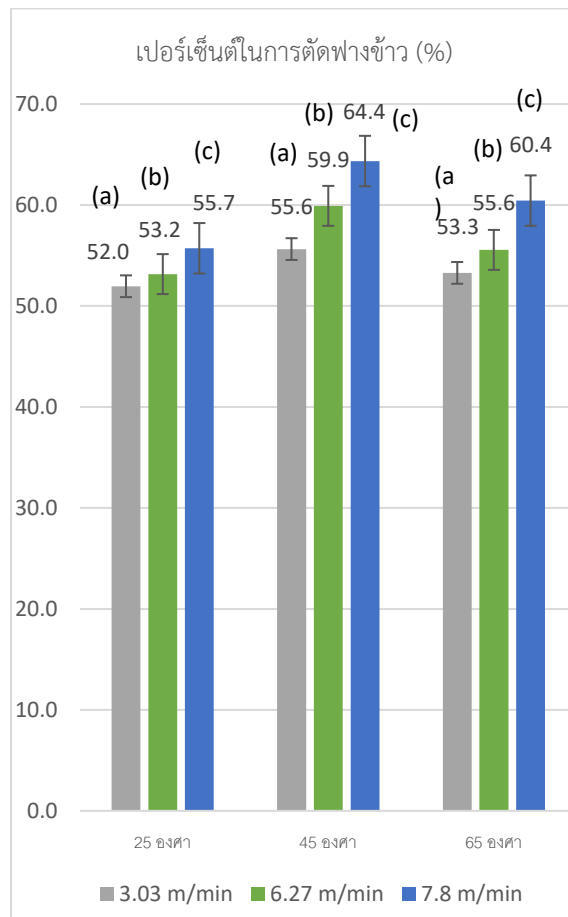


รูปที่ 12 ความสามารถในการทำงานของเครื่อง  
abc อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

##### 4.2 เปอร์เซนต์ในการตัดฟางข้าว

จากผลการทดสอบเครื่องตัดฟางข้าวมีเปอร์เซ็นต์การตัดฟางข้าวเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของใบมีดตัดที่เพิ่มขึ้น โดยจากรูปที่ 13 มีเปอร์เซ็นต์การตัดที่ดีที่สุดมี ความเร็ว ใบมีด 7.80 เมตรต่อนาที และมีมุมใบมีดอยู่ที่ 45 องศา จะมีเปอร์เซ็นต์การตัดอยู่ที่ 64.4 % และเปอร์เซ็นต์การตัดที่น้อยที่สุดคือ 52.0 % มีความเร็วใบมีด 3.03 เมตรต่อนาที และมีมุมใบมีดคือ 25 องศา โดยในการตัดที่ดีที่สุดจะมี เปอร์เซนต์การตัดอยู่ที่ 64.4% ดังนั้นจะมีส่วนที่ตัดไม่ได้

ตามขนาดอยู่อีก 35.6% จึงต้องนำส่วนตัดไม่ได้ตามขนาด  
ป้อนเข้าไปใหม่หรืออาจจะใช้กรรไกรในการตัดฟางข้าวที่  
ตัดไม่ได้ตามขนาด เพื่อตัดให้ได้ตามที่ต้องการ



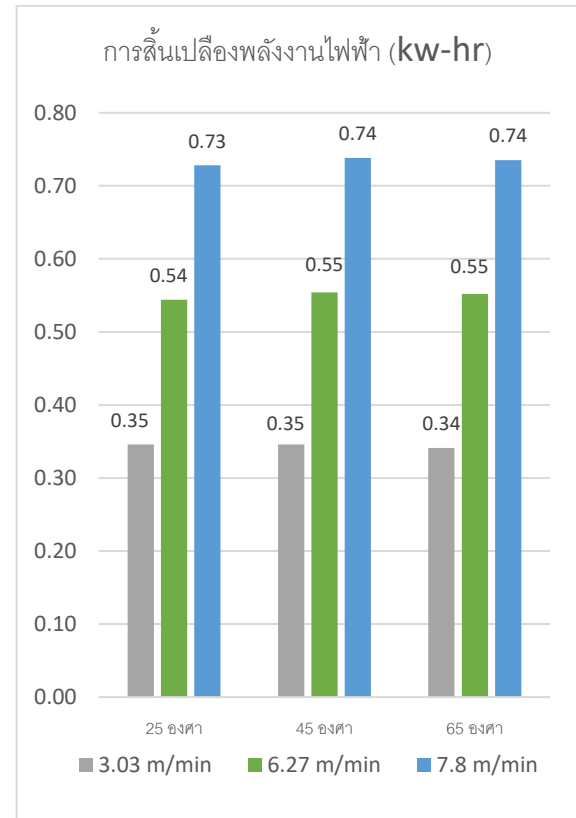
รูปที่ 13 เปอร์เซ็นต์ในการตัดฟางข้าว

abc อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสถานะทดสอบแสดงความ  
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 4.3 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากการทดสอบพบว่าที่ความเร็วใบมีด 3.03 เมตร  
ต่อวินาที จะใช้กระแสน้อย เมื่อคำนวณหาอัตราการใช้  
สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจึงมีค่าต่ำ และที่ความเร็วใบมีด  
6.27 เมตรต่อวินาที จะใช้กระแสไฟฟ้าในระดับปานกลาง  
และที่ความเร็วใบมีด 7.80 เมตรต่อวินาที จะใช้กระแส  
ไฟฟ้าในระดับสูง แต่ถ้าเทียบกับประสิทธิภาพในการ  
ทำงานแล้วถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและมีอัตราในการตัดฟาง  
ข้าวที่สูงที่สุด จึงนำเอาค่าของอัตราการใช้สิ้นเปลืองพลังงาน

ไฟฟ้าของความเร็วใบมีด 7.80 เมตรต่อวินาที ไปคำนวณหา  
ค่าไฟฟ้าในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป



รูปที่ 14 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

#### 4.4 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์

จากการทดสอบพบว่า เครื่องตัดฟางข้าวที่ได้ออกแบบ  
และพัฒนาขึ้นโดยใช้แรงงานคนปฏิบัติงาน 1 คน  
ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง 66,000 บาท การสิ้นเปลือง  
พลังงานไฟฟ้าคิดที่มากที่สุด 0.74 กิโลวัตต์-ชั่วโมง  
พิจารณาค่าไฟฟ้าหน่วยละ 4 บาท (อ้างอิงจากการไฟฟ้า  
นครหลวง) รวมค่าไฟฟ้า 4.44 บาทต่อชั่วโมง เมื่อ  
กำหนดให้เครื่องทำงาน 8 ชั่วโมง/วัน ทำงานปีละ 250 วัน  
ค่าแรงงานในการควบคุมเครื่อง 300 บาทต่อวัน หรือ  
ประมาณ 37.5 บาทต่อชั่วโมง ค่าบำรุงรักษา 20 บาท  
ชั่วโมงการทำงานของเครื่อง 2,000 ชั่วโมงต่อปี ผลการ  
วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องตัดฟางข้าว



พบว่า มีค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่อง 50.7 บาทต่อชั่วโมง จุดคุ้มทุนในการทำงาน 467.4 ชั่วโมงต่อปี มีระยะเวลาในการคืนทุน 10.12 เดือน

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องตัดฟางข้าวโดยใช้ค่าชี้ผลทางการศึกษา คือ ความสามารถในการทำงานของเครื่องตัดฟางข้าว เพอร์เซ็นต์การตัดฟางข้าว การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าเครื่องตัดฟางข้าวมีความสามารถที่ดีที่สุดในการทำงานคือ 8.39 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วใบมีด 7.80 เมตรต่อนาที และมีมุมใบมีดที่ 45° โดยมีเพอร์เซ็นต์ในการตัดฟางข้าวอยู่ที่ 64.4% เนื่องจากเพอร์เซ็นต์ความในการตัดฟางข้าวมีเพอร์เซ็นต์ที่ค่อนข้างต่ำ จึงจำเป็นต้องนำฟางข้าวใส่เข้าไปในเครื่องเพื่อทำการตัดฟางข้าวอีกครั้ง หรือนำฟางข้าวที่ตัดไม่ได้ตามขนาดนำมาตัดด้วยกรรไกรหรือมีด เพื่อให้ได้ฟางข้าวตามขนาดที่ต้องการ มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าประมาณ 0.74 กิโลวัตต์-ชั่วโมง อยู่ที่ความเร็วใบมีด 7.80 เมตรต่อนาที เครื่องตัดฟางข้าวนี้มีความสามารถในการทำงานมากกว่าแรงงานคน 6.7 เท่า และจะมีระยะเวลาคืนทุน 10.12 เดือน หรือ 0.84 ปี และจุดคุ้มทุน 467.4 ชั่วโมงต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับการตัดด้วยแรงงานคน ซึ่งเครื่องตัดฟางข้าวสามารถทำงานได้รวดเร็ว และต่อเนื่องช่วยประหยัดเวลาและแรงงานคนในการตัดฟางข้าว รวมทั้งสามารถพัฒนาให้ใช้ทดแทนแรงงานคนได้ต่อไปในอนาคต

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก “ทุนนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาพื้นที่ ประเภทร่วมทุน” ประจำปีงบประมาณ 2563 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ricethailand. (2021, March 20). Rice [Online]. Available: [www.ricethailand.go.th/main.php](http://www.ricethailand.go.th/main.php)
- [2] KU. (2021, August 30). Rice is life [Online]. Available: <https://dna.kps.ku.ac.th>
- [3] Pollution Control Department. (2021, April 6). Information and services [Online]. Available: [www.pcd.go.th](http://www.pcd.go.th)
- [4] Wangithok. (2021, May 27). Campaign to reduce the burning of rice straw [Online]. Available: <https://www.wangithok.go.th>
- [5] Suphanburi Provincial Livestock Office. (2021, April 15). Straw products [Online]. Available: <http://pvlo-spr.dld.go.th>
- [6] Ai-corporation. (2021, May 17). What-is-a-motor [Online]. Available : <https://www.ai-corporation.net>
- [7] Hmong. (2021, August 10). Geneva mechanism [Online]. Available: [https://hmong.in.th/wiki/Geneva\\_drive](https://hmong.in.th/wiki/Geneva_drive)
- [8] J. Langkapin, Theory of agricultural machinery. 3rd ed. Bangkok: Triple Education Co., Ltd, 2015.
- [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, 1980.
- [11] D. Hunt, *Farm Power and Machinery Management*. Waveland Press, 2016.

**การอบแห้งมะเขือเทศราชินีด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์  
ชนิดพาความร้อนแบบบังคับร่วมกับความร้อนเสริมจากอินฟราเรด**  
**Drying of Cherry Tomatoes Using Forced Convection Solar  
Greenhouse in Association with Infrared Heating**

กมลวรรณ จิตจักร\* ธวัชชัย อ่องประเสริฐ

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

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

Kamonwan Jitjack\* Thawatchai Ongprasert

Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of

Technology Tawan-Ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,

Siracha District, Chonburi 20110, Thailand

\*Corresponding author Email: , kamonwan\_ji@mutto.ac.th

(Received: June 1, 2022; Revised: September 29, 2022 ; Accepted: September 30, 2022)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่แข็ง ทำการทดสอบเปรียบเทียบการอบแห้งโดยวิธีการพาความร้อนแบบบังคับภายในโรงเรือน 2 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ 1 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศ และระบบที่ 2 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศและเสริมความร้อนจากฮีตเตอร์อินฟราเรดที่กำหนดค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการอบแห้ง 45-60 °C โดยทั้งสองระบบเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดธรรมชาติ ทำการศึกษอัตราการอบแห้ง ระยะเวลาในการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง คือ คุณภาพสี ปริมาณน้ำอิสระ ความหวาน และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ในการทดลองค่าความชื้นเริ่มต้นของมะเขือเทศราชินีแช่แข็งจะมีค่าเฉลี่ย 81.88 %d.b. อบแห้งจนมีค่า 11-25 %d.b. เทียบกับผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายในท้องตลาด จากผลการวิจัยพบว่า ระบบที่ 2 อัตราการอบแห้งมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.173 kg/h ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดคือใช้เวลาในการอบแห้ง 12 ชั่วโมง มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 3.47 kWh/kg ซึ่งมีค่าต่ำกว่าระบบที่ 1 ถึง 68.79% ค่าปริมาณน้ำอิสระทั้ง 2 ระบบ มีค่า 0.54-0.55 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$  และมีค่าต่ำกว่า 0.6 แสดงว่าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา แบคทีเรีย และจุลินทรีย์ได้ ส่งผลให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้นานยิ่งขึ้น ค่าความหวานของผลิตภัณฑ์ทุกระบบมีค่า 28.33-29.50 %Brix ซึ่งไม่มีความต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$  การเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมในรูปของ  $\Delta E$  เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการอบแห้ง พบว่ามะเขือเทศราชินีแช่แข็งหลังการอบแห้งระบบที่ 2 มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีต่ำที่สุด โดยค่าความสว่างของทุกระบบอบแห้งมีค่าความสว่างในช่วง 29.11-29.84 ซึ่งความต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$  เมื่อเทียบกับความสว่างก่อนการอบแห้ง ค่าสีเหลืองของระบบที่ 2 จะมีความใกล้เคียงกับสีเหลืองก่อนอบแห้งมากที่สุด

**คำสำคัญ:** โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์, ระบบความร้อนเสริม, มะเขือเทศราชินีแช่แข็ง, การพาความร้อนแบบบังคับ



## ABSTRACT

This research was aimed to compare the drying of preserve cherry tomatoes in forced convection solar greenhouse in two different systems: System 1, solar greenhouse installing ventilation fan; System 2, solar greenhouse installing ventilation fan and infrared heater fixed drying temperature at 45-60 °C. The two systems were compared to open sun drying. Drying rate, drying time, and product quality after drying including color, water activity, sweetness and specific energy consumption were investigated. The samples with average initial moisture content at 81.88 %d.b. were dried until the final moisture content reached the same level of the products in the market at 11- 25 %d.b. The results showed that the average drying rate in System 2 was the highest at 1.173 kg/h and took the shortest drying time at 12 hours, where specific energy consumption was 3.47 kWh/kg which was 68.79% less than System 1, in a range of 0.54- 0.55. The water activities of both systems were less than 0.6 and were also less than the one from open sun drying with statistical significance at  $P \leq 0.05$ . Fungal growth, bacterial growth and microbial growth were not occurred at those water activity values, resulting in longer preservation. Sweetness values of all systems were in a range of 28.33- 29.50 %Brix and not different with statistical significance at  $P \leq 0.05$ . The total color different  $\Delta E$  comparing to before drying of preserve cherry tomatoes dried in System 2 was the least. The brightness values of the samples from all systems were in a range of 29.11- 29.84. They were different from the beginning of the drying with statistical significance at  $P \leq 0.05$ . The yellowness values of the samples from System 2 before and after drying were close.

**Keyword:** Greenhouse drying , Auxiliary heating system, Cherry tomatoes, Forced convection.

## 1. บทนำ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันประชากรไทยส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมและปลูกพืชเป็นหลักทั้งพืชไร่และพืชสวน มะเขือเทศราชินี (Cherry tomato) เป็นพืชอีกชนิดที่เกษตรกรนิยมปลูก เพราะมีความต้องการของท้องตลาดสูง มีความนิยมในการรับประทานทั้งผลสดซึ่งมีขนาดผลเล็ก รสชาติออกเปรี้ยวอมหวาน รับประทานง่ายมีกลิ่นหอมต่างจากมะเขือเทศทั่วไปและมีราคาสูง เกษตรกรส่วนใหญ่จึงนิยมปลูกมะเขือเทศราชินีในทุกๆภูมิภาคของประเทศ แต่ข้อเสียของมะเขือเทศราชินีคืออายุการเก็บรักษามีระยะเวลาจำกัดทำให้เกิดการเน่าเสียง่ายไม่สามารถนำออกจำหน่ายได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเกษตรกรและผู้ประกอบการจำนวนมาก การแปรรูปจึงมี

ความสำคัญอย่างยิ่งต่อการยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าให้แก่มะเขือเทศราชินี วิธีการแปรรูปของเกษตรกรส่วนใหญ่จะทำการแช่ต้มแล้วนำไปตากแดดตามธรรมชาติ เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ต้นทุนต่ำและใช้กันมายาวนาน แต่การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้นทำได้ยาก เนื่องจากปัญหาฝุ่นละออง ฝนตก สัตว์และแมลงที่มารบกวน ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีกลุ่มเกษตรกรบางกลุ่มนำได้เทคโนโลยีอบแห้งมาใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์แทนการตากแดดตามธรรมชาติ เพื่อรักษาคุณภาพและความสะอาดของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ นั่นคือเทคโนโลยีการ

อบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Greenhouse Drying)

การอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์อาศัยหลักการกักเก็บความร้อนจากแสงแดดซึ่งเป็นพลังงานสะอาด รังสีแสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนใช้ออบแห้ง [1] เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบกับหลังคาโรงเรือนซึ่งทำจากวัสดุโปร่งแสง บางส่วนจะสะท้อนออกสู่บรรยากาศ และมีรังสีอาทิตย์คลื่นสั้นเคลื่อนที่มายังภายในโรงเรือน เกิดการตกกระทบและดูดกลืนกับวัสดุต่าง ๆ ภายในโรงเรือนทำให้รังสีคลื่นสั้นมีค่าพลังงานลดลงกลายเป็นรังสีอาทิตย์คลื่นยาวซึ่งเป็นรังสีความร้อนหรืออินฟราเรด ซึ่งไม่สามารถผ่านออกจากแผ่นปกคลุมได้ ทำให้ความร้อนภายในโรงเรือนมีค่าสูงขึ้นและถ่ายเทไปยังผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบแห้งในโรงเรือน [2] รูปแบบโรงเรือนมีหลายรูปแบบ เช่นรูปทรงโค้งพาราโบลา (Parabola) ปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต การไหลเวียนและทิศทางความเร็วของอากาศภายในโรงเรือนมีความสม่ำเสมอ ซึ่งถือว่าเหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้ครั้งละจำนวนมาก อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาของการอบแห้งลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการของเกษตรกรและผู้ประกอบการ โดยทั่วไปสามารถแบ่งตามลักษณะการพาความร้อนได้ 2 แบบ คือ การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural Convection) เป็นการให้หลักการความแตกต่างของอุณหภูมิให้เกิดค่าความดันที่แตกต่างกัน ก่อให้เกิดการพาความร้อนไหลผ่านชั้นของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งและระบายอากาศขึ้นออกสู่ภายนอก และการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) เป็นการให้พัดลมจะเป็นการเพิ่มอัตราความเร็วของอากาศภายในโรงเรือนอบแห้ง [3] ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้งเป็นอย่างมาก โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์พบว่า การใช้พัดลมระบายอากาศขึ้นภายในโรงเรือนออกสู่ภายนอกสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ เช่น งานวิจัยการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์รูปทรงพาราโบลาคคลุมด้วยแผ่น

โพลีคาร์บอเนต ที่มีการติดตั้งพัดลมระบายอากาศสามารถลดความชื้นกล้วยน้ำว้าจาก 70% w.b. จนเหลือความชื้น 20% w.b. ใช้ระยะเวลาเพียง 5 วัน ในขณะที่การตากแดดธรรมชาติจะใช้เวลาถึง 7 วัน [4] และงานวิจัยการใช้โรงเรือนโพลีคาร์บอเนตพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศสำหรับอบแห้งยางพาราแผ่น ความชื้นเริ่มต้น 24-31 % w.b. ใช้เวลา 5 วัน ที่สามารถทำให้ความชื้นของยางพาราแผ่นคงเหลือ 0.4-13% w.b. เทียบกับการตากแดดธรรมชาติจะใช้ระยะเวลาถึง 15 วัน [5] แต่อย่างไรก็ตามโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ก็ยังมีปัญหาการใช้งานเมื่อปริมาณแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอในระหว่างการอบแห้ง โดยเฉพาะในช่วงในช่วงฤดูฝนจากการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวพบว่าการใช้ระบบความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดสามารถทำให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องและแก้ปัญหาระยะเวลาการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่เย็นได้ในกรณีที่แสงแดดไม่เพียงพอ จากความชื้นเริ่มต้น 94-95% d.b. เหลือความชื้น 22% d.b. ภายในระยะเวลาอบแห้งเพียง 2 วัน ซึ่งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวและการตากแดดธรรมชาติที่ใช้เวลา 3 วัน และ 6 วัน ตามลำดับ [6]

ดังนั้นจากข้อดีดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่เย็นโดยการประยุกต์ใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดการพาความร้อนแบบบังคับด้วยพัดลมระบายอากาศร่วมกับระบบความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรด โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบ 2 ระบบได้แก่ โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศ และโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศที่มีความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรด โดยทั้ง 2 ระบบทำการเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดตามธรรมชาติ แล้วทำการศึกษาอัตราการอบแห้ง ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ค่าความหวาน ค่าสี ปริมาณน้ำอิสระ และความชื้นเปลือกพลังงานจำเพาะ โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเทคโนโลยีระบบอบแห้งนี้จะใช้เป็นทางเลือกใหม่แก่

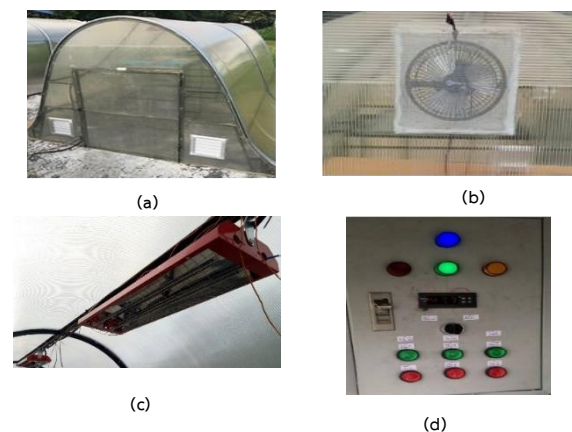
ภาคอุตสาหกรรมอาหารหรือผู้ประกอบการที่สนใจในการประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป

## 2. อุปกรณ์การทดลองและวิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนร่วมกับระบบความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดและพัดลมระบายอากาศ

โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดและพัดลมระบายอากาศเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ ได้ดำเนินการสร้างและทดลอง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จังหวัดชลบุรี โดยโรงเรือนมีรูปทรงพาราโบลาเพิ่มพื้นที่รับแสงด้านข้าง [7] มีขนาดความกว้าง 3 m ยาว 3.5 m สูง 1.55 m คลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตวางบนพื้นปูนซีเมนต์ที่ทาสีดำเพื่อดูดซับความร้อนจากรังสีอาทิตย์และแผ่ความร้อนเพิ่มให้แก่โรงเรือน โครงสร้างหลักทำด้วยเหล็กกล่องชนิดแบน มีช่องรับอากาศเข้าด้านหน้าจำนวน 2 ช่อง ด้านในติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบหลอดแก้ว (Quartz Infrared Heater) ขนาดกำลังไฟฟ้า 1,000 W จำนวน 4 หลอด ที่ตำแหน่งกึ่งกลางใต้โครงหลังคาซึ่งครอบคลุมภายใต้ผลผลิต และกำหนดระยะห่างระหว่างฮีตเตอร์อินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์อบแห้ง 20 cm ส่วนด้านหลังติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 7 นิ้ว จำนวน 1 ตัว ขนาดกำลังไฟฟ้า 35 W พัดด้วยความเร็วลม 2.3 m/s ติดตั้งที่ความสูง 1.40 m ซึ่งวัดจากตำแหน่งพื้นถึงจุดกึ่งกลางของพัดลมระบายอากาศ โดยฮีตเตอร์อินฟราเรดและพัดลมระบายอากาศเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก มีตัวควบคุมระบบความร้อนเสริมที่ติดตั้งภายนอกโรงเรือน ระบบความร้อนเสริมสามารถทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อภายในโรงเรือนมีอุณหภูมิต่ำกว่า 45 °C และจะหยุดการทำงานเมื่อภายในโรงเรือนมีอุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 60 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม ที่ทำให้สีของผลิตภัณฑ์มีค่าใกล้เคียงกับท้องตลาด โดยแสดงลักษณะโรงเรือนอบแห้ง

ตัวควบคุมระบบความร้อนเสริมอัตโนมัติจากฮีตเตอร์อินฟราเรดและพัดลมระบายอากาศ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 (a) ช่องรับอากาศเข้าด้านหน้าโรงเรือนจำนวน 2 ช่อง (b) พัดลมระบายอากาศด้านหลังโรงเรือน (c) ฮีตเตอร์อินฟราเรดติดตั้งภายในโรงเรือน (d) ตัวควบคุมระบบความร้อนเสริม

### 2.2 มะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม

ใช้มะเขือเทศพันธุ์ราชินีจากแหล่งจำหน่ายชุมชนตลาดบ่อบัว จังหวัดฉะเชิงเทรา กระบวนการแช่อิ่มเริ่มต้นโดยการเตรียมวัตถุดิบ ได้แก่ น้ำตาล 3 kg ปูนใส 1 kg เกลือ 500 g มะนาว 5 ผล คัดเลือกมะเขือเทศที่มีขนาดใกล้เคียงกันจำนวน 10 kg จากนั้นเด็ดขั้วแล้วล้างให้สะอาด น้ำ กรีดตามความยาวผล 4-6 แฉก แช่น้ำปูนใส 30 นาที ผึ่งให้สะเด็ดน้ำปูนใส ใส่มะเขือเทศลงในหม้อเติมน้ำตาล มะนาว และเกลือป่น เชื่อมด้วยความร้อนปานกลาง จนกว่ามะเขือเทศอมน้ำเชื่อมและงวดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นแช่น้ำเชื่อมไว้เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง [8] ซึ่งมะเขือเทศที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการแช่อิ่ม แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 มะเขือเทศราชินีหลังจากผ่านกระบวนการแช่อิ่ม

### 2.3 วิธีการทดลองและดำเนินงานวิจัย

ในกระบวนการอบแห้งเป็นการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ไปยังวัสดุที่มีน้ำหรือความชื้น เพื่อให้ความชื้นจากวัสดุนั้นๆ ออกมาโดยกระบวนการระเหย ซึ่งอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝง และเกิดการถ่ายเทความร้อนพร้อมกับการถ่ายเทมวลจากวัสดุสู่อากาศ ทำให้ความชื้นในวัสดุลดลง ปริมาณความชื้นที่เหลือในวัสดุจะบอกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นสามารถคำนวณได้ 2 วิธี คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, w.b.) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, d.b.) ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ในการคำนวณความชื้นมาตรฐานเปียกเป็นที่นิยมใช้เพราะเข้าใจง่าย แต่ไม่เหมาะที่จะใช้คำนวณในกระบวนการอบแห้งเพราะมวลของวัสดุจะเปลี่ยนค่าตลอดเวลา ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกกว่าที่จะใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานในการคำนวณความชื้นนั้น คือ การคำนวณความชื้นมาตรฐานแห้ง [9]

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \quad (1)$$

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ  $M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%)

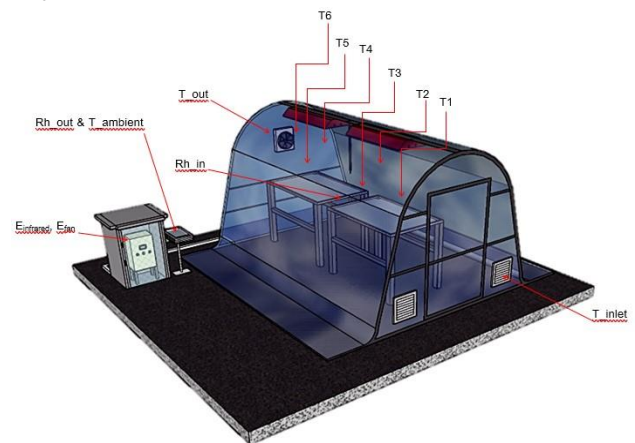
$M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)

w คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุชื้น (g)

d คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุ (g)

ในการทดลองนี้จะทำการอบแห้งมะเขือเทศแช่อิ่มใน 2 ระบบ คือ โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศ และโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดและพัดลมระบายอากาศ โดยทั้ง 2 ระบบ ทำการเปรียบเทียบกับ การตากแดดตามธรรมชาติ โดยทดลองอบแห้งมะเขือเทศแช่อิ่มแบบเต็มพื้นที่สามารถอบแห้งมะเขือเทศแช่อิ่มได้ครั้งละ 10 kg ตั้งแต่เวลา 08:00-20:00 น. จนกว่าความชื้นของมะเขือเทศแช่อิ่มจะมีค่าประมาณ 11-25 %d.b. ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่ตรงกับความชื้นที่วางจำหน่ายในท้องตลาด

หรือคิดเป็น 10-20% w.b. [10] พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักที่ลดลงตามเวลาทุก ๆ 30 นาที โดยนำน้ำหนักไปคำนวณหาปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งได้ดังสมการที่ (2) กรณีความชื้นยังไม่ได้ตามที่กำหนด ได้ทำการเก็บมะเขือเทศแช่อิ่มใส่กล่องสุญญากาศเข้าตู้เย็นไว้เนิเวลากลางคืน และทำการอบแห้งต่อในช่วงเช้าของวันถัดไป ระหว่างการทดลองได้ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิภายในและภายนอกโรงเรือน อุณหภูมิที่ตำแหน่งช่องรับอากาศเข้าและระบายอากาศของโรงเรือน ความชื้นสัมพัทธ์ภายในและภายนอกโรงเรือน ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และทำการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ตำแหน่งการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการทดลอง

### 2.4 อัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง

จากปริมาณความชื้นที่ลดลงตามเวลา นำมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) ในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณโดยการประมาณค่า คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล ( $M_{eq} = 0$ ) โดยตั้งสมมติฐานว่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ของการอบแห้ง ดังนั้นอัตราส่วนความชื้นสามารถสรุป และเขียนอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (3) [9]

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

เมื่อ  $MR$  คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)  
 $M_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้น (%d.b.)  
 $M_f$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (%d.b.)

คำนวณหาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุหรือผลิตภัณฑ์อบแห้งต่อเวลา สามารถคำนวณค่าอัตราการอบแห้งได้ดังสมการที่ (4) [11]

$$DR = \frac{d(M_i - M_f)}{t} \quad (4)$$

เมื่อ  $DR$  คือ อัตราการอบแห้ง (kg/h)  
 $d$  คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุ (g)  
 $M_f$  คือ ความชื้นสุดท้าย (%d.b.)  
 $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

## 2.5 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดและแสดงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่แข็งในงานวิจัยนี้ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่ใช้ในการระเหยความชื้นออกจากมะเขือเทศราชินีแช่แข็งในระหว่างที่ทดลอง ในงานวิจัยนี้ คำนวณจากพลังงานไฟฟ้าจากพัดลมระบายอากาศและค่าพลังงานไฟฟ้าจากชุดฮีตเตอร์อินฟราเรด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5) [12]

$$SEC = \frac{(A_c \times I_T \times t) + (E_{electric})}{m_i - m_f} \quad (5)$$

เมื่อ  $SEC$  คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg)  
 $m_i$  คือ มวลของมะเขือเทศราชินีแช่แข็งก่อนการทดลอง (kg)  
 $m_f$  คือ มวลของมะเขือเทศราชินีแช่แข็งหลังการทดลอง (kg)

$A_c$  คือ ขนาดพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของโรงเรือนอบแห้ง ( $m^2$ )

$I_T$  คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบโรงเรือนอบแห้ง ( $W/m^2$ )

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

$E_{electric}$  คือ พลังงานไฟฟ้าของพัดลมและฮีตเตอร์อินฟราเรด (kWh)

## 2.6 การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ

ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity,  $a_w$ ) เป็นดัชนีที่ใช้ชี้วัดระดับของปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีผลต่ออายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์จะเติบโตได้ภายใต้ค่าปริมาณน้ำอิสระที่จำกัด การทดสอบได้ทำการหาค่าปริมาณน้ำอิสระของมะเขือเทศราชินีแช่แข็งก่อนและหลังการอบแห้ง โดยนำมะเขือเทศราชินีแช่แข็งมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ภาชนะทดลองแบบดิลบพลาสติกแล้วนำไปใส่เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ รุ่น AQUALAB PRE ความแม่นยำ  $\pm 0.01$  มีช่วงการวัดปริมาณน้ำอิสระ 0.05-1.00 ความแม่นยำ  $\pm 0.01$  ควบคุมอุณหภูมิการวัดค่าที่  $25^\circ C$  ตั้งเวลาวัดค่าประมาณ 5 นาที จากนั้นรอจนกระทั่งเครื่องวัดส่งเสียงสัญญาณเตือนและอ่านค่าที่หน้าจอแสดงผล ซึ่งแสดงลักษณะของเครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระได้ดังรูปที่ 4 โดยทดลองวัดปริมาณน้ำอิสระจำนวน 3 ตัวอย่างต่อเงื่อนไขการทดลอง แล้วนำค่าปริมาณน้ำอิสระที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ



รูปที่ 4 เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ รุ่น AQUALAB PRE

### 2.7 การวัดค่าความหวาน

น้ำตาล (Sugar) เป็นส่วนหนึ่งของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solid, TSS) ทั้งหมดจะเป็นดัชนีที่ใช้วัดค่าความหวาน (Brix) ซึ่งแสดงค่าในรูปของ %Brix ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Brix Refractometer ยี่ห้อ OEM รุ่น RHB-90ATC ความแม่นยำ  $\pm 0.05$  ดังรูปที่ 5 การทดสอบค่าความหวานของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มก่อนและหลังการอบแห้ง วิธีการคือนำมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มมาใส่ภาชนะทำการบดให้ละเอียด เติมน้ำบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 หยดลงบนปริซึมของเครื่อง Refractometer และอ่านค่าบนแถบแสดงผล จากนั้นนำค่าความที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ [13]



รูปที่ 5 เครื่องวัดค่าความหวาน Brix Refractometer

### 2.8 การทดสอบคุณภาพด้านสี

ทดสอบคุณภาพสีด้านสีของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี Portable colorimeter 3NH รุ่น NH310 ช่วงอุณหภูมิการวัด -10 ถึง 40°C ช่วงความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 85% ความละเอียดการแสดงผล 0.01 มาตรฐานชนิดแหล่งกำเนิดแสง D65 (Noon daylight) ดังรูปที่ 6 เป็นการทดสอบสีในรูปแบบ  $L^* a^* b^*$  ในเทอมของความสว่างหรือมีด (Lightness, L) ค่าสีแดงหรือสีแดง (Redness, a) และค่าสีเหลืองหรือน้ำเงิน (Yellowness, b) โดยทำการวัดค่าสีที่ตำแหน่งกึ่งกลางของผล จำนวน 10 ตัวอย่าง ต่อการทดลอง



รูปที่ 6 เครื่องวัดค่าสี 3NH Portable colorimeter

หลังจากนั้นนำค่าสีที่วัดได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติและคำนวณหาความแตกต่างของสีที่เปลี่ยนไปหลังการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ และการตากแดดตามธรรมชาติ ดังสมการที่ (6)

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

เมื่อ  $\Delta E$  คือ ความแตกต่างกันของสีโดยรวม

$\Delta L$  คือ ความแตกต่างของความสว่าง

$\Delta a$  คือ ความแตกต่างของความเข้มสีแดงถึงสีเขียว

$\Delta b$  คือ ความแตกต่างของความเข้มสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน

## 3. ผลการทดลองและวิจัย

ดำเนินการทดลองอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มด้วยโรงเรือน 2 ระบบ โดยดำเนินการทดลองในช่วงเดือนกรกฎาคม และเดือนสิงหาคม 2563 ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

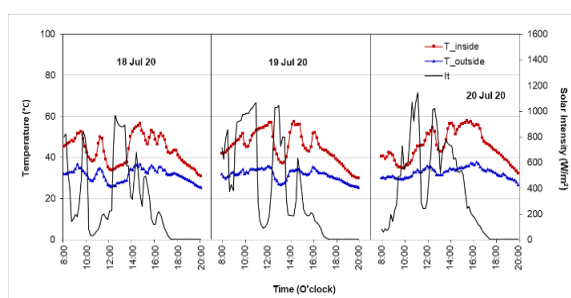
3.1 ผลการทดลองอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบบังคับ 2 ระบบ เปรียบเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ

3.1.1 ระบบที่ 1 อบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศ

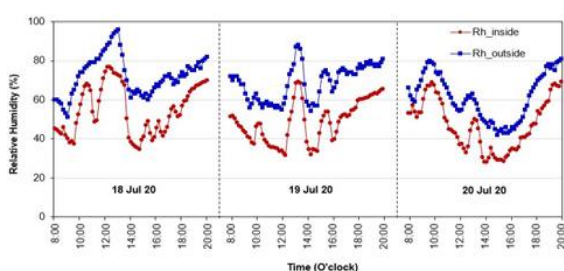


ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – กันยายน พ.ศ. 2565

ทำการทดลองในวันที่ 18-20 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 ตลอดระยะเวลาการทดลองในแต่ละวันท้องฟ้ามีเมฆสลับกับแสงอาทิตย์และมีฝนตกในบางเวลา ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ย  $434.16 \text{ W/m}^2$  อุณหภูมิภายในโรงเรือนและอุณหภูมิแวดล้อมโดยเฉลี่ยมีค่า  $44.70^\circ\text{C}$  และ  $31.91^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนมีค่าต่ำกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ ดังรูปที่ 8 เนื่องจากอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่สูงกว่าและการระบายความชื้นออกสู่ภายนอกตลอดเวลาด้วยพัดลม



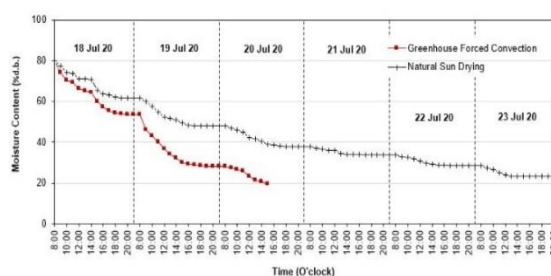
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งและอุณหภูมิภายนอก ในช่วงที่ดำเนินการทดลอง



รูปที่ 8 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้ง เปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกในช่วงที่ดำเนินการทดลอง

อัตราการลดลงของความชื้นพบว่า ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง ดังรูปที่ 9 ช่วงวันแรกความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มมีความชื้นเริ่มต้นสูงโดยมีค่า  $80.26\%$  d.b. จากนั้นความชื้นค่อยๆ ลดลง แต่ในช่วงเวลาฝนตก

ความชื้นลดลงน้อยมากจนคงที่ ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะเหลือความชื้นสุดท้าย  $19.47\%$  d.b. โดยใช้เวลา 31 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดตามธรรมชาติจะใช้เวลาถึง 6 วัน ที่ค่าความชื้นสุดท้ายใกล้เคียงกัน ในการทดลองนี้ได้ทำการเปิดพัดลมระบายอากาศ ตลอดระยะเวลาการทดลอง ทำให้มีการพาทั้งความชื้นและค่าความร้อนออกสู่ภายนอก แม้ในเวลาที่มีฝนตก พัดลมดูดอากาศยังทำหน้าที่ในถ่ายเทความชื้นจากตัวผลิตภัณฑ์ออกสู่ภายนอกตลอดเวลา ทำให้ค่าความปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงต่อเนื่อง และแห้งเร็วกว่าภายนอก โดยเป็นการพาความร้อนแบบบังคับนี้ใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าซึ่งคิดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าได้  $0.569 \text{ kWh}$  ต่alapการทดลอง

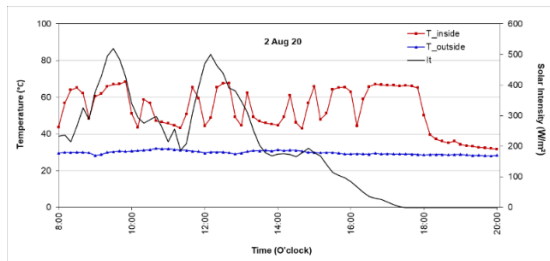


รูปที่ 9 ความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มภายในโรงเรือนอบแห้งเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดภายนอก ในช่วงที่ดำเนินการทดลอง

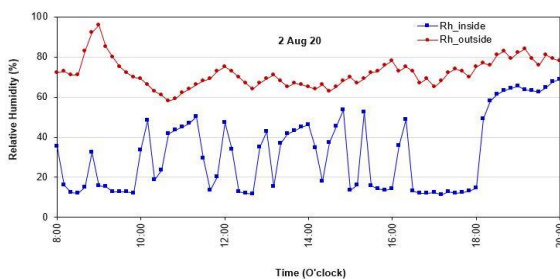
3.1.2 ระบบที่ 2 อบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดและพัดลมระบายอากาศ

ทำการทดลองในวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2563 ช่วงเช้ามีเมฆปกคลุมเป็นส่วนใหญ่ และฝนตกจนถึงเวลา 09:30 น. หลังจากนั้นไม่มีเมฆสลับกับแสงแดดตลอดทั้งวัน โดยความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ย  $239.64 \text{ W/m}^2$  อุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์แต่ยังคงสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก ซึ่งพัดลมระบายอากาศเปิดทำงานตลอดเวลาในช่วงที่ดำเนินการทดลองเพื่อระบายความชื้นของผลิตภัณฑ์ และพบว่า

ในช่วงที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เพียงพอหรือฝนตก ระบบความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดทำงานอัตโนมัติ เพื่อให้ความร้อนแก่ระบบอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งสูงกว่าการตากแดดโดยภายในโรงเรือนมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่  $56.29^{\circ}\text{C}$  และตากแดดภายนอกมีค่าเฉลี่ย  $30.21^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 10

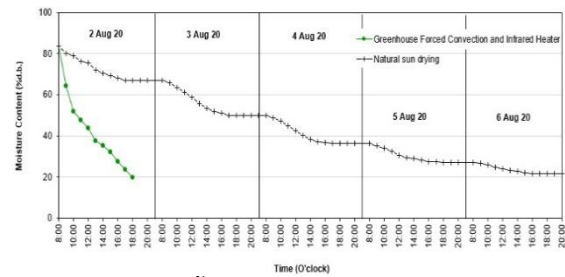


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้ง และอุณหภูมิภายนอกในช่วงที่ดำเนินการทดลอง



รูปที่ 11 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้งเปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกในช่วงที่ดำเนินการทดลอง

ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้งยังคงมีค่าต่ำกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ ดังรูปที่ 11 และสามารถลดความชื้นเริ่มต้นจาก 83.54% d.b. เหลือเพียง 19.62% d.b. โดยใช้เวลาเพียง 12 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับตากแดดตามธรรมชาติจะใช้เวลาถึง 5 วัน ณ ที่ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 12 ซึ่งในการทดลองมีการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 22.95 kWh จากระบบอัตโนมัติที่ใช้ความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรด และพัดลมระบายอากาศ

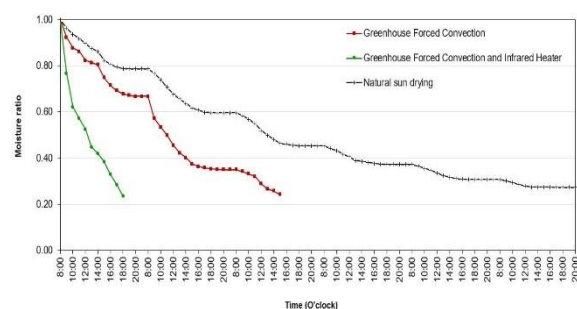


รูปที่ 12 ความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มภายในโรงเรือนอบแห้งเปรียบเทียบกับตากแดดภายนอกในช่วงที่ดำเนินการทดลอง

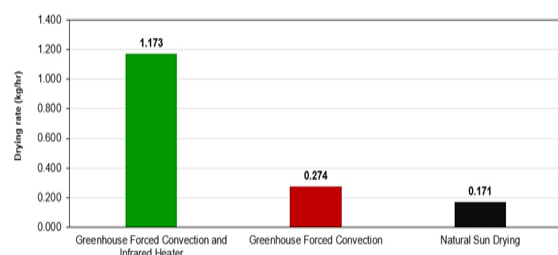
จากผลการทดลองอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มด้วยโรงเรือนอบแห้ง ระบบที่ 1 เปรียบเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ ความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและแปรผันตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาการใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์อินฟราเรดและพัดลมระบายอากาศในระบบที่ 2 พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนอบแห้งมีค่าสูงสุด ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้งต่ำที่สุด ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง แม้ว่าในช่วงที่ดำเนินการทดลองจะมีแสงแดดไม่เพียงพอหรือฝนตก ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่มีค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.173\text{ kg/h}$  ซึ่งมากกว่าการอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้พัดลมระบายอากาศเพียงอย่างเดียว และการตากแดดตามธรรมชาติที่มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย  $0.274\text{ kg/h}$  และ  $0.171\text{ kg/h}$  ตามลำดับ โดยแสดงแผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งดังรูปที่ 14 จากผลของอัตราการอบแห้งสูงของระบบที่ 2 เนื่องจากการเพิ่มระบบเสริมความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิภายในคงที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการอบแห้งมะเขือเทศ และยังทำงานร่วมกันกับพัดลมระบายอากาศที่นำเอาความชื้นออกสู่ภายนอกตลอดเวลาทำให้อัตราการระเหยน้ำได้กว่าใช้พัดลมระบายอากาศเพียงอย่างเดียวหรือการเปิดระบบเสริมความร้อนอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว [6]



ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – กันยายน พ.ศ. 2565



รูปที่ 13 อัตราส่วนความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่อบที่อบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ และการตากแดดตามธรรมชาติ



รูปที่ 14 แผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ และการตากแดดตามธรรมชาติ

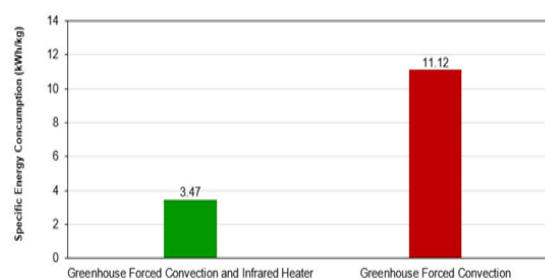
### 3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ในการทดลองทั้งสองระบบ ได้ทำการเก็บข้อมูล ค่าความเข้มข้นสีกาติตย์ ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยนำมาคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบ

ตารางที่ 1 บันทึกข้อมูลการทดลองของโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ

| Parameter       | หน่วย            | System1 | System2 |
|-----------------|------------------|---------|---------|
| IT              | W/m <sup>2</sup> | 434.16  | 239.64  |
| Drying Times    | h                | 32      | 10      |
| Heater infrared | kWh              | -       | 22.757  |
| Ventilation fan | kWh              | 0.569   | 0.193   |

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งทั้ง 2 ระบบ พบว่าระบบที่ 2 มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 3.47 kWh/kg โดยระบบนี้ทำงานอัตโนมัติซึ่งสามารถคงค่าอุณหภูมิตามที่กำหนดได้เพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียไปในกรณีที่ค่าความเข้มข้นสีกาติตย์ไม่เพียงพอหรือฝนตก และสามารถทำให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ระเหยได้รวดเร็ว ใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นลง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ 1 คือการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศเพียงอย่างเดียวที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 11.12 kWh/kg ทั้งนี้ระบบที่ 2 มีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าเฉลี่ย 68.79% ซึ่งแสดงในแผนภูมิเปรียบเทียบดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แผนภูมิเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ

### 3.3 ผลการทดสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์

#### 3.3.1 ค่าปริมาณน้ำอิสระ

ผลการวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity,  $a_w$ ) หลังการทดลองอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ เปรียบเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ โดยการนำตัวอย่างมาทำการสุ่มแต่ละการทดลองจำนวนการทดลองละ 3 ตัวอย่าง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2 จากผลการทดลองพบว่ามะเขือเทศราชินีแช่อบที่ผ่านการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าปริมาณน้ำอิสระน้อยกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$  โดยมีค่าน้อยกว่า 0.6 ซึ่งแสดงว่าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา แบคทีเรีย และจุลินทรีย์ได้ ส่งผลให้สามารถยืด

อายุการเก็บรักษาได้นานยิ่งขึ้น และไม่เกินค่ามาตรฐาน  
ผลิตภัณฑ์ชุมชนที่สามารถจำหน่ายได้ในท้องตลาด [14]

ตารางที่ 2 ค่าปริมาณน้ำอิสระของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม  
หลังการทดลอง

| วิธีการอบแห้ง     | ปริมาณน้ำอิสระ<br>( $a_w$ ) |
|-------------------|-----------------------------|
| ระบบที่ 1         | $0.55 \pm 0.02^a$           |
| ระบบที่ 2         | $0.54 \pm 0.01^a$           |
| ตากแดดตามธรรมชาติ | $0.67 \pm 0.01^b$           |

หมายเหตุ: ตัวอักษรเดียวกันในแนวตั้งหมายถึงไม่มีความ  
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

### 3.3.2 ค่าความหวาน

ผลการวัดค่าความหวาน (Brix) หลังการทดลอง  
อบแห้ง แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า มะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม  
ที่ตากแดดตามธรรมชาติมีค่าความหวานมากที่สุด แต่ไม่มี  
ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$   
นอกจากนี้ยังพบว่าหลังการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้ง  
พลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ มีค่าความหวานไม่แตกต่าง  
กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$

ตารางที่ 3 ค่าความหวานของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม  
หลังการทดลอง

| วิธีการและระบบ    | ความหวาน (%Brix)      |
|-------------------|-----------------------|
| ระบบที่ 1         | $28.67 \pm 0.58^{ns}$ |
| ระบบที่ 2         | $28.33 \pm 1.53^{ns}$ |
| ตากแดดตามธรรมชาติ | $29.50 \pm 0.58^{ns}$ |

หมายเหตุ : ns (non-significant) ตัวอักษรหมายถึงไม่มีความ  
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

### 3.3.3 ค่าคุณภาพสี

ผลการวัดคุณภาพสี ของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มก่อน  
การอบแห้งเปรียบเทียบกับหลังการอบแห้งด้วยโรงเรือน

อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบกับการตากแดดตาม  
ธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 4 จากผลการทดสอบพบว่า  
ก่อนการอบแห้งมีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) เท่ากับ 32.95 โดย

การอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์  
2 ระบบ และการตากแดดตามธรรมชาติ จะทำให้ค่าความ  
สว่างลดลงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$   
ด้านค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน  
แต่การอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์  
ร่วมกับพัดลมระบายอากาศและความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดจะทำให้ค่าสีเหลืองลดลงน้อยที่สุดเมื่อ  
เปรียบเทียบกับก่อนการอบแห้ง ซึ่งไม่มีความแตกต่าง  
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$  อย่างไรก็ตามค่าสี  
แดง ( $a^*$ ) ของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มที่อบแห้งด้วยโรงเรือน  
อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ระบบ และการตากแดด  
ตามธรรมชาติมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย โดยไม่มีความ  
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $P \leq 0.05$  สำหรับการ  
เปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมในรูปของ  $\Delta E$  เมื่อ  
เปรียบเทียบกับก่อนการอบแห้งพบว่ามะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม  
หลังการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงาน  
แสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศและความร้อน  
เสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดมีค่าต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากใช้  
ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุดผลิตภัณฑ์ไม่ได้รับรังสี  
UV เป็นระยะเวลานาน ซึ่งทำให้มะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม  
ยังคงมีสีแดงสดออกน้ำตาล [11] ไม่แตกต่างจากสีของ  
มะเขือเทศราชินีแช่อิ่มก่อนการอบแห้ง โดยลักษณะของ  
มะเขือเทศราชินีแช่อิ่มก่อนและหลังการอบแห้งของการ  
ทดลองแสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แสดงลักษณะทางกายภาพของมะเขือเทศ  
ราชินีแช่อิ่มก่อนและหลังการอบแห้ง

ตารางที่ 4 ค่าสีของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มหลังการทดลอง

| วิธีการและระบบ | ค่าสี                   |                          |                         |            |
|----------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------|
|                | L*                      | a*                       | b*                      | $\Delta E$ |
| ก่อนอบแห้ง     | 32.95±0.99 <sup>b</sup> | 19.43±1.96 <sup>ns</sup> | 12.79±2.25 <sup>b</sup> | -          |
| ระบบที่ 1      | 29.80±1.19 <sup>a</sup> | 15.69±1.96 <sup>ns</sup> | 8.62±1.23 <sup>a</sup>  | 6.43       |
| ระบบที่ 1      | 29.11±1.76 <sup>a</sup> | 16.18±2.35 <sup>ns</sup> | 11.05±1.71 <sup>b</sup> | 5.32       |
| ตากแดดธรรมชาติ | 29.84±1.69 <sup>a</sup> | 16.17±1.98 <sup>ns</sup> | 8.36±0.63 <sup>a</sup>  | 6.31       |

หมายเหตุ : ns (non-significant) และตัวอักษรเดียวกันในแนวตั้งหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P ≤0.05)

#### 4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มด้วยโรงเรือนอบแห้งรูปทรงพาราโบลาเพิ่มพื้นที่รับแสงอาทิตย์ด้านข้างชนิดการพาความร้อนแบบบังคับอากาศ 2 ระบบ คือระบบที่ 1 ใช้พัดลมระบายอากาศเพียงอย่างเดียว และระบบที่ 2 ใช้พัดลมระบายอากาศร่วมกับการติดตั้งระบบความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรด ซึ่งจะทำงานอัตโนมัติเมื่อค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งต่ำกว่าหรือสูงกว่าในช่วง 45 ถึง 60 °C เปรียบเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ สามารถสรุปได้ว่าโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดลมระบายอากาศที่มีระบบความร้อนเสริมจากฮีตเตอร์อินฟราเรดใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยที่สุด เนื่องจากสามารถลดเขยความร้อนและคงค่าอุณหภูมิตามที่กำหนดได้ ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ อัตราความเร็วของอากาศภายในโรงเรือนอบแห้งสม่ำเสมอ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของอากาศสู่ผลิตภัณฑ์มีความต่อเนื่อง ความชื้นของมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มลดลงอย่างรวดเร็ว และเป็นระบบที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด ด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งพบว่า การเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการอบแห้ง ความหวานหลังการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้ง 2 ระบบ

มีค่าไม่แตกต่างกัน และค่าปริมาณน้ำอิสระหลังการอบแห้งสองระบบมีค่า 0.54-0.55 ซึ่งต่ำกว่า 0.6 ซึ่งจุลินทรีย์ทุกชนิดไม่สามารถเจริญได้[15][16] และไม่เกินค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่สามารถจำหน่ายได้ในท้องตลาด

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Janjai , *Solar drying technology*. 1sted. Nakhon Pathom: Petchkaset Printing Co., Ltd; 2017.
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2021, Jan 2). "Solar heating" [online]. Available : <https://ienergyguru.com>
- [3] A. Taikhao and S. Teekasap, "Natural convection and forced convection solar dryers," *EAU HERITAGE JOURNAL Science and Technology*, vol.7(1), pp. 23-31, May. 2013.
- [4] C. Sritus, "An investigation of the performance of a large-scale greenhouse solar dryer using polycarbonate cover," M.S. thesis, Dept. Physics., Silpakorn University., Thailand, 2008.
- [5] J. Piwsaoad, "Performance of solar greenhouse dryer for drying para rubber sheets" M.S. thesis, Dept. Physics., Silpakorn University., Thailand, 2014.
- [6] T. Ongprasert and K. Jitjack. "A study of solar greenhouse drying in association with infrared heater for dehydration cherry tomatoes," *Kasem Bundit Engineering Journal*. vol.10,

- pp.62-83, December. 2020.
- [7] K. Jitjack, S. Thepa, K. Sudaprasert and P. Namprakai. "Improvement of a rubber drying greenhouse with a parabolic cover and enhanced panels," *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 178-193, July. 2016.
- [8] S. Nabnean, "Design construction and performance investigation of a solar dryer for drying tomatoes" Ph.D. thesis, School of Energy, Environment and Materials., King Mongkut's University of Technology Thonburi., Thailand, 2015.
- [9] N. Keeratiyadatanapat and P. Toomthong, "Drying of wolffia arrhizal in a fluidized bed dryer," *Koch Cha Sarn Journal of Science*, vol. 38(2), pp. 12-21, December. 2016.
- [10] S. Nabnean "An investigation of the performance of large – scale greenhouse solar drying system with auxiliary heaters" M.S. thesis, Dept. Physics., Silpakorn University., Thailand, 2009.
- [11] R. Kumwan, S. Thiangchanta and S. Kesai, "Determination of drying rate of jackfruit by infrared dryer," *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, vol. 11(2), pp. 67-77, December. 2018.
- [12] W. Jeentada, B. Niyomvas and A. Thaikul, "Experimental study on drying conditions of solar fish dryer with temperature controlled by open-closed ventilating system," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28(3), pp. 525-536, September. 2018.
- [13] A. Bharathkumar, S.L. Jagadeesh, G. Bhuvaneshwari, S.N. Patil, D.L. Rudresh, M. Viresh Hiremath and I. Prabhakar, "Influence of pre-treatment on total soluble solids, titratable acidity and sugars of raisin," *International Journal of Chemical Studies*, vol.6(5), pp. 230-232, August. 2018.
- [14] N. Wisaiprom, N. Kadsayapanand and W. Palasai, "The comparative study of shrimp drying process with low humidity air and hot air drying" *Princess of Naradhiwas University Journal*, vol.11(1), pp. 83-94, April. 2019.
- [15] N. Rattanapanon, *Food Chemistry*, 4th Ed., Odean Store Publisher, Bangkok, 2000.
- [16] P. Fellows, *Food Processing Technology Principles and Practice*, 2nd Ed. Woodhead Publishing, Ltd., Cambridge, 2000, pp. 575.

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม – กันยายน พ.ศ. 2565) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- |                                            |                                                                                                      |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง  | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                             |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค   | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี                        |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพล สกุลหลง      | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                             |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ  | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ                     |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรพงศ์ บริรักษ์      | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย                               |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภกิตต์ สายสุนทร     | ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรวิทยาเขตบางเขน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                                    |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ เนียมสอน | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                                      |
| 8. อาจารย์ ดร.สุรัชย์ เหมหิรัญ             | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ                       |
| 9. ผศ. ดร.จิรวัดน์ คำรินทร์นันต์           | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร                |
| 10. ผศ.ดร.รัฐวุฒิ รู้แทนคุณ                | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม                                                |
| 11. ผศ.ดร. วุฒิพงศ์ เมืองน้อย              | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี                          |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิโยรส พรหมติเรก | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 13. รศ.ดร.พัชราภรณ์ บุญยวานิชกุล           | ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน                |

**คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์**  
**วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศ) เป็นวารสารที่ตีพิมพ์บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเผยแพร่ความก้าวหน้าทางทฤษฎีและทางการทดลองในทุกสาขาวิศวกรรม ตันฉบับทุกบทความที่ส่งมายังกองบรรณาธิการ จะได้รับการประเมินโดยมีผู้ทรงคุณวุฒิ 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review วารสารตีพิมพ์ 3 ฉบับต่อปี ในเดือน เมษายน สิงหาคม และ ธันวาคม เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online)

**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 หรือคัดลอกผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 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** ขอบขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

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

## 2. วิธีการส่งบทความ

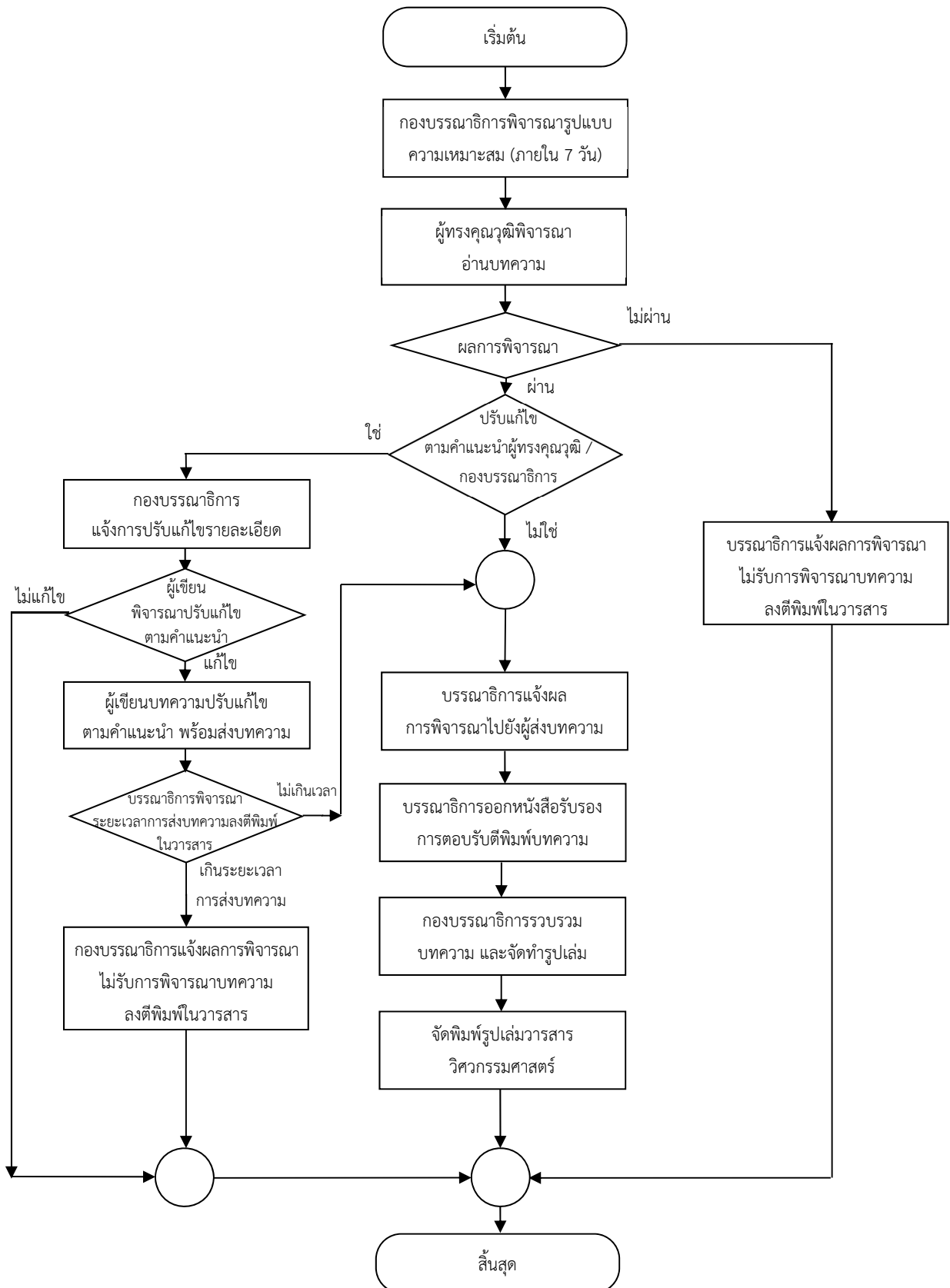
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่  
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม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

## 3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

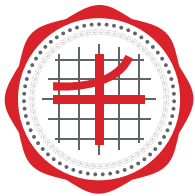
การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

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

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ







คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

# Srinakharinwirot University Engineering Journal

Vol. 17 No.2 (May - September 2022)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)

## บทความวิจัย

- การศึกษาสาเหตุและการเพิ่มคุณค่าของงานเปลี่ยนแปลงภายในโครงการก่อสร้าง : กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยในกรุงเทพมหานคร  
A study on cause and value creation of variation order in construction project : Case study of a residential building project in Bangkok  
นัฐพล ท้วมพงษ์ ปิยนุช เวทย์วิวัฒน์
- การออกแบบและสร้างเครื่องตัดฟางข้าว  
Design and Fabrication of Straw Cutting Machine  
ปณณวิชญ์ ทองคำ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ สุนัน ปานสาคร
- การอบแห้งมะเขือเทศราชินีด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาความร้อนแบบบังคับร่วมกับความร้อนเสริมจากอินฟราเรด  
Drying of Cherry Tomatoes Using Forced Convection Solar Greenhouse in Association with Infrared Heating  
กมลวรรณ จิตจักร ธวัชชัย อ่องประเสริฐ

## บทความวิชาการ

- การศึกษาแนวทางการเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมโครงสร้างเครื่องบิน โดยวิธีบ่มแข็งทางความร้อน  
Study of Strengthening of Aluminum in Aircraft Structure by Aging Heat Treatment  
จรรรัตน์ พันธุ์สุวรรณ สุรัชย์ นุ่มสารพัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th>