

วารสารวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL  
ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เมษายน พ.ศ. 2563



## คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 1 พ.ศ. 2558-2562 เลขที่ ISSN 1905-4548 เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้รู้เสมอ (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (single-blind) และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

## วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแหล่งรวบรวม เผยแพร่บทความวิจัย และบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

## เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอโศก อำเภอบางพลี

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

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติ สถาพรประสาธน์

รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

### รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

|                            |                  |                                                                      |
|----------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------|
| ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ   | เกียรติศิริโรจน์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                                                 |
| ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ      | ศิริธราธิวัตร    | มหาวิทยาลัยขอนแก่น                                                   |
| ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์    | เดชะอำไพ         | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                                |
| ศาสตราจารย์ ดร.ประยูทธ     | อัครเอกผาลิน     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์    | จำนงไทย          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี                                |
| ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ      | ริมดุสิต         | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                                |
| ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน    | เหลื่องไพบูลย์   | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                                                |
| ศาสตราจารย์ ดร.จิตชนก      | เหลื่อสินทรัพย์  | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                                |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ  | โสภาแดง          | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                                                 |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย | เปรมฤดีปรีชาชาญ  | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                                                 |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ  | ศฤงคารินทร์      | มหาวิทยาลัยมหิดล                                                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง   | ปรีชานนท์        | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                                |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์   | มั่งวัฒนา        | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                                               |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต    | ชาลิรักษ์ตระกูล  | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                                                |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม    | ฤกษ์บุตร         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร                                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ  | สมบูรณ์วิวัฒน์   | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี                                |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์ | ยิ้มมัน          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต  | พรหมวงศ์         | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร | เจริญสุข         | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี      | มาสุจันทร์       | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร   | กิมเรศ           | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา    | ทิพย์สุวรรณพร    | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล     | โอฬารไพโรจน์     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา                                    |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ | ศรีสรณ์          | 46/18 ซอยพหลโยธิน 51 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน<br>กรุงเทพมหานคร 10220 |

### บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช

### หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์

## กองบรรณาธิการ

|                               |                  |                                                                      |
|-------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------|
| รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล       | นาพล             | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา     | จับศิลป์         | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ     | ชุ่มฤทธิ์        | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ทิมพันธุ์   | เจริญพงษ์        | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ      | สุภาพ            | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล      | ธาราธิ์เศรษฐ์    | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา       | บุญยวานิชกุล     | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ | คงประเสริฐ       | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ | ศรีรมรินทร์      | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| อาจารย์ ดร.สุธิดา             | ทีปักษ์พันธุ์    | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| อาจารย์นาวิ                   | รุจิตามพ์        | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ      | เกียรติศิริโรจน์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                                                 |
| ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ         | ศิริธราธิวัตร    | มหาวิทยาลัยขอนแก่น                                                   |
| ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์       | เดชะอำไพ         | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                                |
| ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ        | อัครเอกผาลิน     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์       | จำนงไทย          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี                                |
| ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ         | ริมดุสิต         | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                                |
| ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน       | เหลื่องไพบูลย์   | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                                                |
| ศาสตราจารย์ ดร.จิตชนก         | เหลื่อสินทรัพย์  | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                                |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ     | โสภาแดง          | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                                                 |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย    | เปรมฤดีปรีชาชาญ  | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                                                 |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ     | ศฤงคารินทร์      | มหาวิทยาลัยมหิดล                                                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง      | ปรีชานนท์        | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                                |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์      | มั่งวัฒนา        | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                                               |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต       | ชาลิรักษ์ตระกูล  | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                                                |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม       | ฤกษ์บุตร         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร                                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ     | สมบูรณ์วิวัฒน์   | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี                                |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์    | ยิ้มมัน          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต     | พรหมวงศ์         | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร    | เจริญสุข         | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี         | มาสุจันทร์       | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร      | กิมเรศ           | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา       | ทิพย์สุวรรณพร    | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล        | โอฬารไพโรจน์     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา                                    |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ    | ศรีสรณ์ตร์       | 46/18 ซอยพหลโยธิน 51 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน<br>กรุงเทพมหานคร 10220 |

## ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

## บทบรรณาธิการ

ปัจจุบันนี้เป็นที่พูดถึงกันมากว่า ประเทศไทยกำลังเข้าสู่สังคมที่มีจำนวนคนชราเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่คนในวัยทำงานจะมีจำนวนน้อยลงอย่างขาดสมดุล สาเหตุเนื่องมาจากการลดลงของอัตราการเกิด ซึ่งคาดกันว่าจะส่งผลกระทบมากกว่าหนึ่งด้าน อันได้แก่ รัฐบาลเก็บภาษีได้ไม่เพียงพอกับภาระรายจ่ายที่เกิดขึ้นในการดูแลคนชรา และการลดลงของจำนวนผู้ต้องการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาส่งผลทำให้หลักสูตรที่มีผู้สมัครเรียนน้อยอาจจะต้องปิดตัวลง แต่อย่างไรก็ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาแห่งชาติและการประกันคุณภาพการศึกษาของประเทศไทย ได้มีการวางระบบและกลไกให้สถาบันอุดมศึกษามีแนวทางเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน โดยจะต้องดำเนินการสำรวจความต้องการของทั้งนายจ้างและผู้เรียน เพื่อใช้ประกอบการทำหลักสูตร ซึ่งสอดคล้องกับรัฐบาลที่ได้มีการเน้นย้ำให้สถาบันอุดมศึกษาเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน เพื่อให้บัณฑิตสามารถประกอบอาชีพได้

สำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรคนอาจารย์ให้เปลี่ยนแปลงทันกับการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรและความต้องการของสังคมเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เพราะคนอาจารย์สำเร็จการศึกษามาด้วยการทำปริญญาโทในหัวข้อที่ต้องมีความลุ่มลึก ทำให้ขาดมิติความกว้างที่จะปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ด้วยการเปิดรับอาจารย์ใหม่ เพราะอายุการทำงานของคนอาจารย์แต่ละคนยาวนานเกินการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของหลักสูตร การแก้ปัญหาแนวทางนี้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่นาน ปัญหาความไม่สอดคล้องระหว่างคนอาจารย์ที่มีความต้องการของหลักสูตรก็จะวนกลับมาเกิดซ้ำอีก ไม่นับรวมภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องแบกรับในการจ้างคนอาจารย์กลุ่มเดิมที่ไม่สามารถสอนในหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสูงโดยไม่จำเป็น เกิดความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งบประมาณที่ได้รับ

ดังนั้นหากคนอาจารย์มีความพยายามที่จะทำงานวิจัยในหัวข้อใหม่ ๆ ที่ไม่ถนัด และสามารถปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนให้ตรงตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ผู้กำกับดูแลงานวิจัยของหน่วยงานต่าง ๆ จึงควรทำงานบูรณาการกับหลักสูตรและการเรียนการสอน เพื่อกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการสนับสนุนโครงการวิจัยในหน่วยงาน ให้นำไปสู่ความสามารถในการสอนหัวข้อที่ตรงกับหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ อีกทั้งผลลัพธ์ของโครงการวิจัยได้อีกทางคือ การตีพิมพ์บทความวิจัย วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ท่านถืออยู่นี้ จึงเป็นกลไกสำคัญในการผลักดันให้คนอาจารย์ทำวิจัย ซึ่งกองบรรณาธิการดูแลเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอแจ้งว่ากองบรรณาธิการได้ปรับแก้รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง ให้เป็นรูปแบบ IEEE ร้อยละร้อย เพื่อให้ผู้เขียนเตรียมต้นฉบับได้สะดวกขึ้น พร้อมให้ตัวอย่างอย่างครอบคลุม ท่านผู้เขียนที่เคยส่งบทความมาก่อน โปรดใช้รูปแบบ IEEE ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

## สารบัญ

### บทความวิจัย

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| การอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคสเปาต์เต็ดเบดทำงานร่วมกับฟลูอิดไดซ์เบด<br>Pepper Drying Used Spouted Bed Combined with Fluidized Bed Technique<br>กิตติ สถาพรประสาธน์ กรณัฐ ทวีเจริญธรรม กรวิษฐ์ ตลับทอง และ ฉัตรนิตา พรหมมาโน                                                                                                                                                                                      | 1  |
| การแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์โดยใช้วิธีเมตาฮิวริสติก<br>Solving Many-objective Cockpit Crew Pairing Problem of Low-cost Airline using Metaheuristic<br>ณิชา กฤษณพันธ์ และ ปารเมศ ชูติมา                                                                                                                                                                              | 12 |
| สมการออกแบบสำหรับค่าเกนของตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์ไม่อุดมคติที่ใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่<br>เชื่อมต่อกิริตเฟสเดียว<br>The Design Equation for Gains of Non-ideal Proportional-Resonant Controller used in Control<br>of Single-Phase Grid-Connected Inverter<br>เจษฎา พันธุ์ออน และ วิโรจน์ แสงธทอง                                                                                                     | 25 |
| การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกและประเมินผู้ให้บริการด้านการจัดซื้อและผลิต<br>เครื่องจักรด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์<br>PRIORITIZATION OF FACTORS AFFECTING SELECTION AND EVALUATION SERVICE PROVIDERS IN<br>MACHINE PROCUREMENT AND FABRICATION BY USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS<br>ณนัยชนม์ มณีธรรม และ วงษ์ระพี กาญจนะ                                                       | 38 |
| การวิเคราะห์กระบวนการเพื่อปรับปรุงวิธีการตรวจสอบวัดชิ้นส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์<br>Process Analysis for Measured Method Improvement of Server Cabinet Part<br>เริงฤทัย ศิริรักษ์ กฤษณา คำชา และ วรพจน์ ศิริรักษ์                                                                                                                                                                                                    | 50 |
| การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์เพื่อเลือกสถานประกอบการปฏิบัติสหกิจศึกษาของนักศึกษา<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก<br>The application of the Analysis Hierarch Process to select the industry in the Cooperative<br>Learning program, Faculty of Engineering, Rajamangala university of Technology Lanna Tak<br>ปริดา จิ๋วปัญญา สุทธิณี อาชนรากิจ และ อัมพิกา บุญกิจ | 62 |
| จลนศาสตร์การปลดปล่อยของวิตามินบี 2 จากเม็ดเจลอัลจิเนตร่วมกับเวย์โปรตีนหรือแซนแทนกัม<br>Release Kinetic of Riboflavin from Composite Gel Beads Consisting of Alginate Incorporated<br>with Whey Protein or Xanthan Gum<br>สวรัักษ์ จันทรเทพธิมากุล และ สุกัญญา วิชชุกิจ                                                                                                                                        | 73 |

บทความวิจัย (ต่อ)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน<br>Stability Analysis of AC-DC Power System Feeding Paralleled Buck-Converter<br>จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม เทพพนม โสภะเพิ่ม และ กองพัน อารีรักษ์                                                                                                               | 86  |
| การศึกษาาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นข<br>องระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์<br>A Study of Discharge Heads Affecting the Temperature and Amount of Hot Water Using<br>Mathematical Modeling of a Solar Water Heating System<br>จิรวุฒน์ สิตรานนท์ กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์ และ ณัฐพล รุ่งประแสง | 97  |
| การลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายที่มีขนาดละเอียดด้วยเบนโทไนท์<br>Hydraulic conductivity reduction of poorly graded sand by bentonite<br>สหัชชัย ปรีวทรัพย์พันธ์ สมชาย ดอนเจติย์ และ นิมิตร เฉิดฉันทพิพัฒน์                                                                                                                                          | 108 |

## การอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคสเปาต์เต็ดเบตทำงานร่วมกับฟลูอิดไดซ์เบต Pepper Drying Used Spouted Bed Combined with Fluidized Bed Technique

กิตติ สภาพรประสาธน์\* กรณัฐ ทวีเจริญธรรม กรวิชญ์ ตลับทอง ฉัตรนิตา พรหมมาโณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ถนนรังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก, 26120

Kitti Sathapornprasath\* Koranut Taveechoentham Korawit Talabthong Chatnida Promma-aon

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

63 Moo 7 Rangsit-Nakhornnayok Rd., Ongkharak, Nakhorn-Nayok 26120.

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

(Received: December 11, 2020; Accepted: January 3, 2020)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลดความชื้นของเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งสเปาต์ฟลูอิดเบต ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดพริกไทยและเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลมร้อน เวลาที่ใช้อบแห้งต่อการใช้พลังงานและคุณภาพของเมล็ดพริกไทยแห้ง จากผลการทดลองพบว่าที่ความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s อุณหภูมิ 90 °C ที่ความสูงเบต 10 cm สามารถลดค่าความชื้นของเมล็ดพริกไทยได้รวดเร็วที่สุด เมื่อพิจารณาถึงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง (SEC) พบว่าที่ความเร็วลมสเปาต์ 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s อุณหภูมิ 90 °C ความสูงเบต 15 cm มีค่า SEC = 7.936 kWh/kg water ซึ่งมีค่าของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง (SEC) น้อยที่สุด ในกรณีการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดพริกไทยพบว่าสีของเมล็ดพริกไทยที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีสีคล้ำและแดงมากกว่ากรณีอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำในทุกเงื่อนไขการอบแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าการแตกหักของเมล็ดพริกไทยที่ได้จากการอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.054 ถึง 0.382 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วลมสเปาต์ 18 m/s อุณหภูมิ 90 °C ความสูงเบต 10 cm และปิดความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ ทำให้การแตกหักของเมล็ดพริกไทยมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากการปิดความเร็วลมของฟลูอิดไดซ์ทำให้เกิดการกระเฝือกของเบตเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นการลดการกระทบกันของเมล็ดพริกไทยระหว่างการอบแห้ง

**คำสำคัญ:** เทคนิคสเปาต์ฟลูอิดเบต จลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

### ABSTRACT

This research is aimed at examining the dehumidification of pepper seeds by using spout fluid bed dryer. The objectives of this study were the kinetic of dehumidification of pepper seeds and the consequence of factors (i.e. temperature, velocity of hot air, drying time per power and quality used). From the results, it was found that the spout velocity of 24 m/s, the fluid velocity of 9 m/s, the temperature of 90 °C and the bed height of 10 cm are the fastest condition which can decrease

moisture content of pepper seeds. The specific energy consumption (SEC) of the drying process was found at the spout velocity of 18 m/s, the fluid velocity of 9 m/s, the temperature of 90 °C and the bed height of 15 cm are 7.936 kWh/kg water, which was the minimum of the specific energy consumption of the drying process (SEC). The color of pepper seeds while using high temperature will become more red and darker than using low temperature in every condition. In addition, the destruction of pepper seeds is in range of 0.054 to 0.382 % with the spout velocity of 18 m/s, temperature of 90 °C, bed height of 10 cm and blocking of the fluid velocity, which made the destruction of pepper seeds were lowest. The velocity of fluidized was blocked cause less movement of bed which make the destruction of pepper seeds decreased.

**Keyword:** Spout fluidized bed, Drying Kinetics, Specific energy consumption.

## 1. บทนำ

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทยมีการปลูกมากในจังหวัดจันทบุรีโดยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณร้อยละ 95 ของพื้นที่ เพาะปลูกทั่วประเทศโดยในปี 2557 กระบวนการผลิตพริกไทยแห้งของเกษตรกรทำโดยการตากแดดตาม ธรรมชาติ ซึ่งใช้เวลาในการทำแห้งประมาณ 4-5 วันและเนื่องจากจังหวัดจันทบุรีซึ่งเป็นแหล่งปลูกพริกไทย มีฝนตกชุกตลอดปีทำให้เกษตรกรมีปัญหาในการตากแห้งพริกไทยจึงทำให้พริกไทยที่ได้มีความชื้นสูงทำให้ เชื้อราเจริญเติบโตได้ดีซึ่งเป็นสาเหตุให้คุณภาพของพริกไทยลดลงรวมถึงปัญหาด้านคุณภาพของ พริกไทยดังนั้นการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งจึงมีความน่าสนใจด้านคุณภาพ การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นพร้อมกัน กระบวนการที่ซับซ้อนกันนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลมร้อน อัตราการไหลของอากาศ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ ปริมาณของวัสดุที่อยู่ในห้องอบแห้ง [1]

เทคนิคสเปาต์ฟลูอิดเบตได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยนำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบตและสเปาต์เต็ดเบตร่วมกัน เพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องความดันตกคร่อมเบตของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบตและการหมุนเวียนวัสดุต่ำของสเปาต์เต็ดเบต [1],

[3] ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสเปาต์และความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดลักษณะสเปาต์ฟลูอิดเบต ตัวแปรทั้งสองมีความสำคัญในระบบอบแห้งแบบสเปาต์ฟลูอิดเบตมากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในแง่ของการออกแบบและควบคุมระบบในกระบวนการอบแห้ง [2] โดยลักษณะการทำงานของเทคนิคแบบสเปาต์ฟลูอิดเบตนั้นจะเป่าลมร้อนความเร็วสูงเข้าเบตในลักษณะเป็นลำอากาศขนาดเล็กผ่านช่องเปิดบริเวณกึ่งกลางด้านล่างเข้าสู่เบตร่วมกับการเป่าลมร้อนเข้ามายังเบต ลักษณะเช่นนี้จะช่วยให้วัสดุมีอัตราการหมุนเวียนสูงขึ้น การขยายตัวของเบตมีค่าสูง ความหนาแน่นของเบตลดลง ทำให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารระหว่างของไหลและวัสดุดีขึ้น ส่งผลให้การอบแห้งรวดเร็วขึ้นและยังสามารถใช้กับวัสดุที่มีขนาดใหญ่และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ [1], [3], [4] ซึ่งเทคนิคสเปาต์ฟลูอิดไดซ์เบตได้มีการวิจัยและได้ถูกพัฒนาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การเคลือบผิวของแข็ง เครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยา การผสมของแข็ง เป็นต้น [5] ในส่วนการอบแห้งได้มีการประยุกต์เทคนิคสเปาต์ฟลูอิดเบตกับกากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันมะกอก [6] พลาสติคชีวภาพชนิดแซนแทนกัม (Xanthan gum) [7] และแครอท [8], [9] จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าการประยุกต์เทคนิคสเปาต์ฟลูอิดเบตในการอบแห้งยังมีอยู่น้อยมาก ซึ่งส่วนใหญ่เป็น

การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการอบแห้งและพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการศึกษาการอบแห้งด้วยเทคนิคสเปาต์ฟลูอิดเบตในระดับห้องปฏิบัติการ ศึกษาคุณลักษณะทางการไหลด้วยเทคนิค สเปาต์ฟลูอิดเบต ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอบแห้งเมล็ดพริกไทย รวมถึงคุณภาพบางอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง

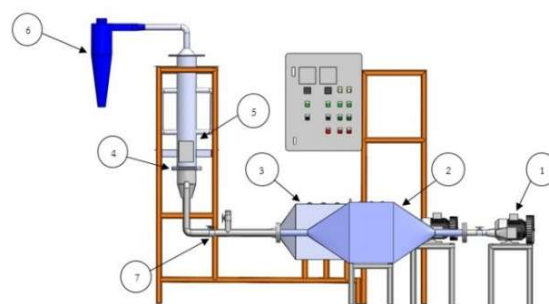
## 2. วิธีการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

กระบวนการอบแห้งจะเริ่มเมื่อลมร้อนที่มี อุณหภูมิ 70-90 °C ถูกส่งเข้าไปในห้องอบแห้งผ่านตะแกรงรองเมล็ดพริกไทยจนถึงบริเวณที่เป็นทรงกรวยที่บรรจุเมล็ดพริกไทยอยู่ จากนั้นเมล็ดพริกไทยจะถูกเป่าขึ้นไปในอากาศ การลอยตัวของเมล็ดพริกไทยนั้นจะลอยขึ้นไปเป็นลำของลมซึ่งเท่ากับขนาดของท่อลมก่อนถึงทรงกรวยมีขนาด  $2\frac{1}{2}$  นิ้ว เรียกว่า ลำสเปาท์ เมื่อเมล็ดพริกไทยที่ลอยขึ้นไปจนไม่สามารถลอยต่อขึ้นไปได้ด้วยอัตราการไหลคงที่แล้วจะตกลงมาในลักษณะของน้ำพุ ที่บริเวณข้างห้องอบแห้ง และจะถูกเป่าขึ้นอีกครั้งด้วยลมที่อยู่ใต้ตะแกรงซึ่งเป็นลมร้อนในส่วนของฟลูอิดไดซ์เบต ทำให้มวลของเมล็ดพริกไทยเกิดการเคลื่อนที่หมุนเวียนกันเช่นนี้เรื่อยๆ ซึ่งมวลของเมล็ดพริกไทยที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งจะถูกวัดอย่างต่อเนื่อง (ทุกๆ 10 นาที) โดยอาศัยอุปกรณ์ชั่งน้ำหนักยี่ห้อ KROTRON SG  $1,500 \pm 0.2$  กรัม พิกัด 1,500 กรัม และบันทึกข้อมูลการทดลอง อุณหภูมิภายในเตาอบแห้ง จะถูกวัดอย่างต่อเนื่องโดยอาศัยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K Thermocouples)

### 2.1 การทดลองและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเน้นไปที่จลนพลศาสตร์การอบแห้งและการถ่ายเทความร้อนของพริกไทยรวมถึงความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ ส่วนที่สองจะเน้นไปที่คุณภาพทางกายภาพบางอย่างของพริกไทยที่

ได้จากการอบแห้ง การทดลองอบแห้งจะกระทำที่อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้ง 3 ระดับ กล่าวคือ 70 °C, 80 °C และ 90 °C ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองมวลของพริกไทยจะถูกวัดอย่างต่อเนื่อง (ทุกๆ 5 หรือ 10 นาที) ขึ้นอยู่กับรูปแบบการอบแห้ง และอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่ระบบทำงานและหยุดพัก) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เมล็ดพริกไทยสดซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ  $28.66 \pm 7.70$  %d.b เป็นวัสดุในการทดลองการอบแห้ง และจะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C ก่อนการทดลองอบแห้งแต่ละครั้ง พริกไทยสดจะถูกนำมาผึ่งลมทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนเริ่มการทดลอง



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วย  
เทคนิคสเปาต์ฟลูอิดเบต

1. พัดลมความดันสูง ขนาด 2.60 กิโลวัตต์ ทำหน้าที่สร้างความดันและป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ
2. เครื่องทำความร้อนของสเปาท์ ขนาด 12 กิโลวัตต์ ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศของ สเปาท์
3. เครื่องทำความร้อนของฟลูอิดไดซ์ ขนาด 12 กิโลวัตต์ ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศของฟลูอิดไดซ์
4. ตะแกรงรองเมล็ด รูตะแกรงมีขนาดเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร
5. ห้องอบแห้ง ซึ่งทำจากเหล็กสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 135 mm และสูง 800 mm อากาศร้อนที่ผ่านชุดทำความร้อนจะไหลเข้าห้องอบแห้งที่ด้านล่างผ่านช่องทางเข้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 mm ซึ่งเชื่อมต่อกับห้องอบแห้งด้วยกรวยสแตนเลส

6. เครื่องดักฝุ่น ซึ่งทำหน้าที่แยกดักฝุ่นออกจากอากาศร้อน

7. วาล์วปรับแรงลม ซึ่งทำหน้าที่ปรับความเร็วของอากาศที่เข้าสู่ระบบให้ได้ค่าที่เหมาะสมโดยความเร็วของอากาศจะถูกรวัดด้วย rotating vane anemometer

## 2.2 ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1. เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลมแรงดันสูงให้อากาศไหลผ่านห้องอบแห้ง และเปิดสวิทช์ฮีตเตอร์ทำงานตั้งอุณหภูมิให้ได้  $70^{\circ}\text{C}$  ตามที่กำหนด โดยใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิ แบบ PID ยี่ห้อ PNC รุ่น REX-C100 ซึ่งมีความแม่นยำในการควบคุม  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  ชุดควบคุมนี้จะทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง ( $T_1$ ) เป็นตัวควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน

2. ปรับความเร็วอากาศร้อนในห้องอบแห้งให้ได้ตามที่ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

3. ใส่เมล็ดพริกไทยลงในห้องอบแห้งและสังเกตผลการทดลอง

4. นำเมล็ดพริกไทยออกจากห้องอบแห้ง เพื่อชั่งน้ำหนักที่หายไป โดยในช่วง 20 นาทีแรกจะชั่งน้ำหนักทุกๆ 5 นาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักทุกๆ 10 นาที ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล และบันทึกผลการทดลองจนกระทั่งความชื้นของพริกไทยไม่เปลี่ยนแปลง (สังเกตได้จากมวลมีค่าคงที่)

5. ทำการทดลองเช่นเดียวกันตั้งแต่ ข้อ 1 ถึง ข้อ 4 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิควบคุมภายในเครื่องอบแห้งที่  $80^{\circ}\text{C}$  และ  $90^{\circ}\text{C}$  และเงื่อนไขอื่นๆ ตามลำดับ

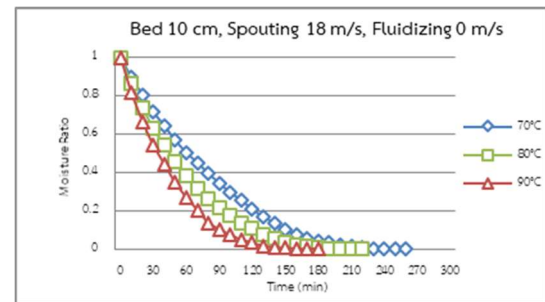
6. วิเคราะห์ผลทางสถิติของสภาวะการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์วิเคราะห์ความแตกต่าง ด้วย โปรแกรม SPSS

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

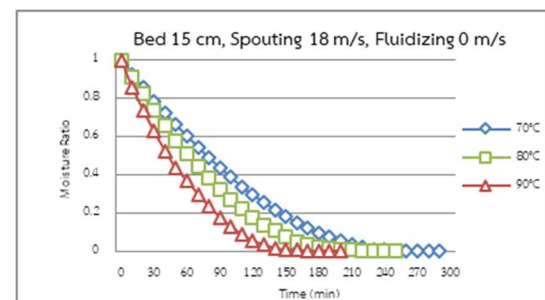
### 3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งของพริกไทย

ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยสำหรับการอบแห้งจะแสดงในเทอมของอัตราส่วนความชื้นจะเห็นได้ว่า การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง

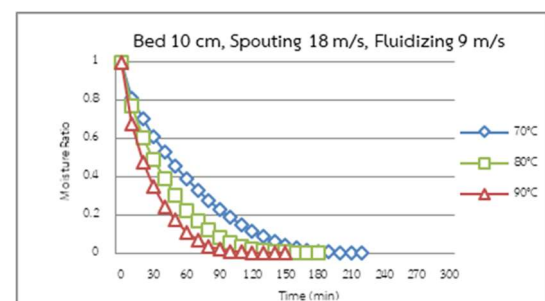
( $90^{\circ}\text{C}$ ) จะทำให้ความชื้นของพริกไทยลดลงเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำ ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่ผิววัสดุมีค่ามากซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวล (ความชื้น) มีค่ามากเช่นกัน



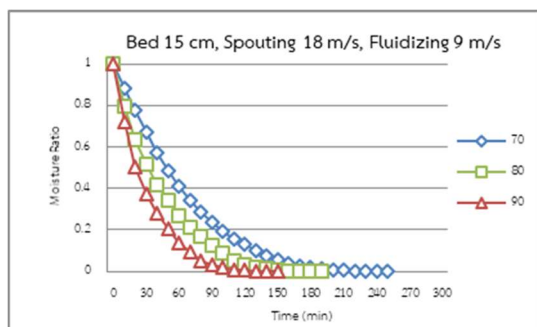
รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่เบดหนา 10 cm ความเร็วลมสปูต 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 0 m/s



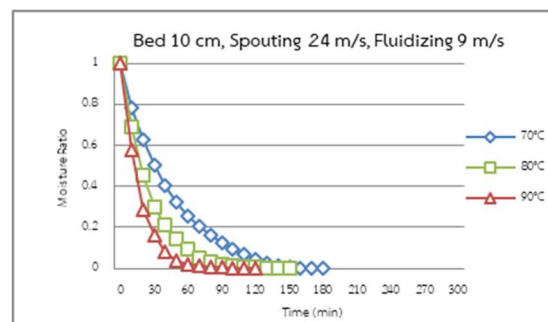
รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่เบดหนา 15 cm ความเร็วลมสปูต 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 0 m/s



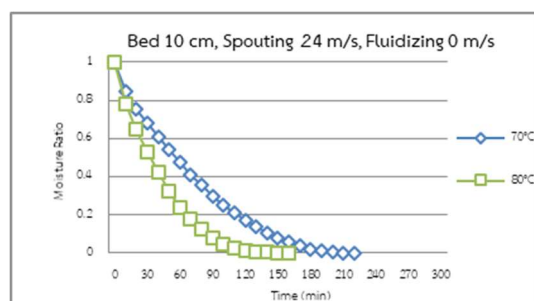
รูปที่ 4 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของพริกไทยที่เบดหนา 10 cm ความเร็วลมสปูต 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s



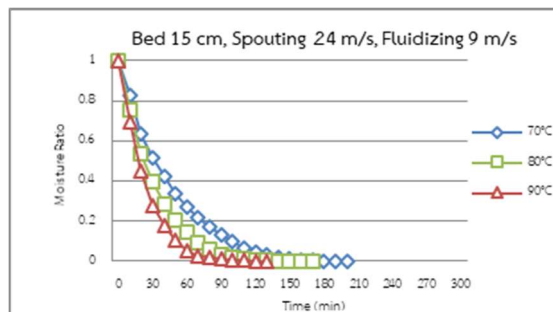
รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของ  
พริกไทยที่เบดหนา 15 cm ความเร็วลมสเปาต์ 18 m/s  
ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s



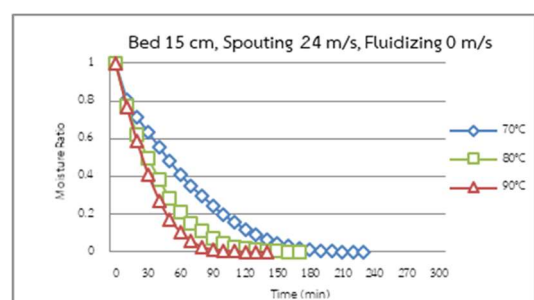
รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของ  
พริกไทยที่เบดหนา 10 cm ความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s  
ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s



รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของ  
พริกไทยที่เบดหนา 10 cm ความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s  
ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 0 m/s



รูปที่ 9 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของ  
พริกไทยที่เบดหนา 15 cm ความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s  
ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s



รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราส่วนความชื้นของ  
พริกไทยที่เบดหนา 15 cm ความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s  
ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 0 m/s

รูปที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของรูปแบบการอบแห้งที่ความสูงเบดแตกต่างกันคือ 10 cm และ 15 cm ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ (70 °C, 80 °C, 90 °C) โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันคือ ความเร็วลมสเปาต์ 18 m/s และความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 0 m/s ทำให้พบว่า ที่การใช้อุณหภูมิต่างกันจะทำให้เมล็ดพริกไทยมีค่าความชื้นคงที่ได้รวดเร็วตามลำดับเนื่องจากพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับเมล็ดที่อุณหภูมิต่างกัน ที่อุณหภูมิสูง (90 °C) จะมีพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับเมล็ดพริกไทยมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า (80 °C, 70 °C) ความสูงเบดที่แตกต่างกันมีผลต่อความเร็วในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยเพราะความสูงเบดส่งผลต่อปริมาณหรือความชื้นรวมของเมล็ดพริกไทยที่อบแห้งในแต่ละครั้ง ความสูงเบดที่สูงสุด (เบด 15 cm) จะมีปริมาณหรือความชื้นเริ่มต้นที่มากกว่าความสูงเบดต่ำสุด (เบด 10 cm) ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาที่มาก

ขึ้นในการดึงความชื้นออกจากเมล็ดพริกไทยจนเมล็ดพริกไทยมีค่าความชื้นที่คงที่

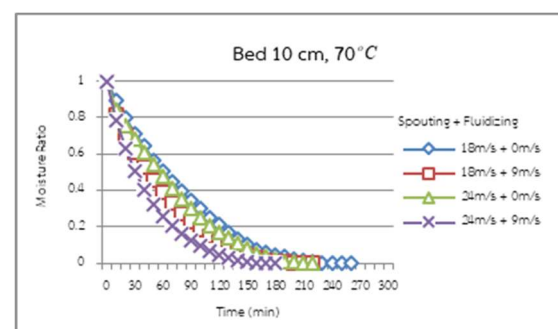
รูปที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของรูปแบบการอบแห้งที่ความสูงเบดแตกต่างกันคือ 10 cm และ 15 cm ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ (70 °C, 80 °C, 90 °C) โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันคือ ความเร็วลมสเปาต์ 18 m/s และความเร็วมวลฟลูอิดไดซ์ 9 m/s จะสังเกตได้ว่าเงื่อนไขที่มีการเปิดความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ร่วมด้วยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่ความสูงเบดเท่ากันและอุณหภูมิเท่ากันในสถานะที่ไม่เปิดความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ร่วมด้วยจะพบได้ว่า ความเร็วลมของฟลูอิดไดซ์มีส่วนช่วยให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงสังเกตได้จากรูปที่ 2

(เบดหนา 10 cm, ความเร็วสเปาต์ 18 m/s, ความเร็วฟลูอิดไดซ์ 0 m/s) เปรียบเทียบกับ รูปที่ 4 (เบดหนา 10 cm, ความเร็วสเปาต์ 18 m/s, ความเร็วฟลูอิดไดซ์ 9 m/s) จะเห็นว่าที่อุณหภูมิเท่ากันผลของการเปิดความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ร่วมด้วยทำให้เมล็ดพริกไทยมีค่าความชื้นคงที่รวดเร็วกว่าแบบไม่เปิดความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ร่วมด้วยเนื่องจากลมฟลูอิดไดซ์เป็นลมร้อนที่ผ่านขึ้นมาจากแผ่นกระจายลม (Distribution plate) รอบๆรูฉีดแรงลมสเปาต์ ทำให้เกิดลมร้อนในลักษณะวงแหวนเมื่อเมล็ดพริกไทยลอยตกลงมาหลังจากสัมผัสกับลำอากาศหรือลมร้อนของสเปาต์ จะมีลมร้อนของฟลูอิดไดซ์ผสมเข้าช่วยก่อนกลับไปลอยตัวในลำอากาศหรือแรงลมร้อนของสเปาต์ ส่งผลทำให้วัสดุเกิดความต่อเนื่องในการคายความชื้น เมล็ดพริกไทยเคลื่อนไหวยิ่งขึ้นและยังส่งผลให้เมล็ดพริกไทยสัมผัสกับลมร้อนได้อย่างทั่วถึง

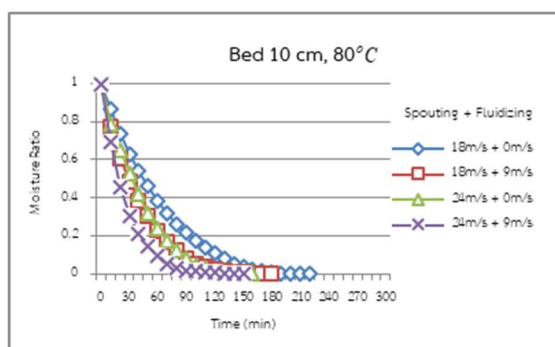
รูปที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของรูปแบบการอบแห้งที่ความสูงเบดแตกต่างกันคือ 10 cm และ 15 cm ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ (70 °C, 80 °C, 90 °C) โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันคือ ความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s และความเร็วมวลฟลูอิดไดซ์ 0 m/s จะสังเกตได้ว่าการเพิ่มความเร็วลมสเปาต์ ทำให้ระยะห่างของจุดบนกราฟในช่วง 60 นาทีแรกห่างกันมากขึ้นนั่นหมายความว่า การดึงความชื้นออกจากเมล็ดพริกไทยในช่วง 60 นาทีแรกนั้น

ทำได้ดีขึ้นเนื่องจากการที่เปิดความเร็วลมสเปาต์ที่สูงขึ้นทำให้การกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยเป็นไปอย่างอิสระมากขึ้น ความเร็วลมสเปาต์ที่สูงขึ้นจะสามารถเอาชนะภาระความชื้นหรือน้ำหนักเริ่มต้นของเมล็ดพริกไทยได้ดี

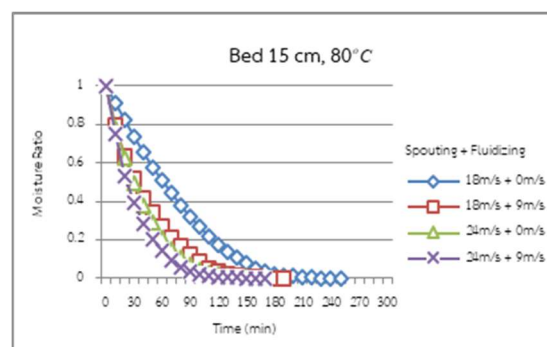
รูปที่ 8 และ 9 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของรูปแบบการอบแห้งที่ความสูงเบดแตกต่างกันคือ 10 cm และ 15 cm ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ (70 °C, 80 °C, 90 °C) โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันคือ ความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s และความเร็วมวลฟลูอิดไดซ์ 9 m/s จะสังเกตได้ว่าการเพิ่มความเร็วลมสเปาต์และเปิดความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ร่วมด้วยทำให้การลดความชื้นในช่วง 60 นาทีแรกของกราฟดียิ่งขึ้นเนื่องจากการใช้ความเร็วลมของสเปาต์ที่สูงทำให้ลมที่เข้าไปในหอบแห้งเอาชนะภาระความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพริกไทยทำให้การกระจายตัวเป็นไปอย่างอิสระได้ดียิ่งขึ้นและยังมีลมร้อนของฟลูอิดไดซ์คอยให้ความร้อนร่วมเพื่อดึงความชื้นออกมาจากเมล็ดพริกไทยเพิ่มความต่อเนื่องในการคายความชื้นของเมล็ดพริกไทย เมล็ดสัมผัสกับลมร้อนอย่างทั่วถึง ในการทำให้ค่าความชื้นคงที่ที่สถานะนี้ใช้เวลาน้อยลงเนื่องจากการให้ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ร่วมด้วยทำให้เมล็ดพริกไทยสัมผัสลมร้อนในลักษณะวงแหวนก่อนกลับไปลอยตัวในลำอากาศหรือลมร้อนของสเปาต์ทำให้เมล็ดพริกไทยมีความต่อเนื่องในการคายความชื้นออกจากเมล็ดพริกไทย



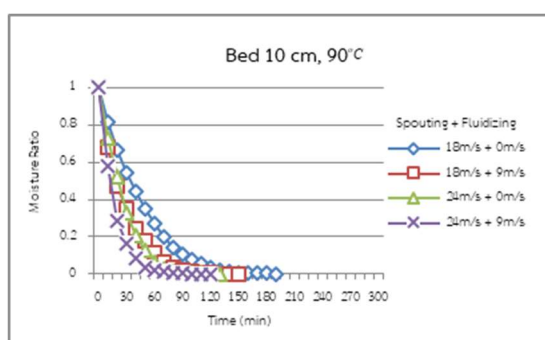
รูปที่ 10 ผลของการเปรียบเทียบความเร็วลมทุกสถานะที่เงื่อนไขความสูงเบด 10 cm อุณหภูมิ 70 °C



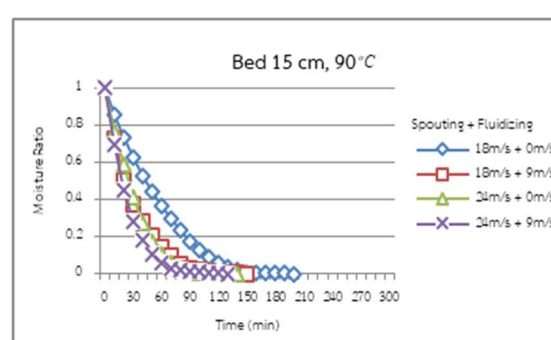
รูปที่ 11 ผลของการเปรียบเทียบความเร็วลมทุกสภาวะที่เงื่อนไขความสูงเบต 10 cm อุณหภูมิ 80 °C



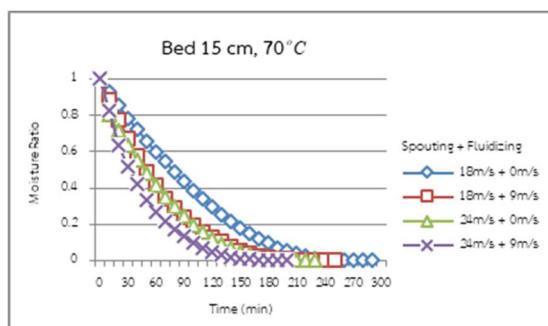
รูปที่ 14 ผลของการเปรียบเทียบความเร็วลมทุก สภาวะที่เงื่อนไขความสูงเบต 15 cm อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 12 ผลของการเปรียบเทียบความเร็วลมทุกสภาวะที่เงื่อนไขความสูงเบต 10 cm อุณหภูมิ 90 °C



รูปที่ 15 ผลของการเปรียบเทียบความเร็วลมทุก สภาวะที่เงื่อนไขความสูงเบต 15 cm อุณหภูมิ 90 °C



รูปที่ 13 ผลของการเปรียบเทียบความเร็วลมทุกสภาวะที่เงื่อนไขความสูงเบต 15 cm อุณหภูมิ 70 °C

รูปที่ 10 ถึง 15 ผลของการเปรียบเทียบการใช้แรงลม 4 ระดับ ที่การใช้ความเร็วลมสเปาต์ 18 m/s ร่วมกับความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 0 m/s ทำให้ค่าความชื้นคงที่ช้าที่สุด การใช้ความเร็วลมสเปาต์ 18 m/s ร่วมกับความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s จะใช้ ระยะเวลาที่ทำให้ค่าความชื้นของเมล็ดพริกไทยคงที่ได้รวดเร็วกว่าการใช้ความเร็วลมสเปาต์เพียงอย่างเดียว ความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s ร่วมกับความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 0 m/s เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่เปิดความเร็วลมสเปาต์เพียงอย่างเดียวพบว่าค่าของความเร็วลมสเปาต์มีผลต่อการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยที่มีความสูงเบตเพิ่มขึ้น สุดท้ายความเร็วลมสเปาต์ 24 m/s ร่วมกับความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s เป็นสภาวะความเร็วลมที่ทำให้ค่าความชื้นของเมล็ดพริกไทยคงที่ได้รวดเร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะความเร็วลมที่กล่าวมาทั้งหมด

ตารางที่ 1 แสดงผลที่ได้จากการทดลองแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

| สภาวะที่ | ความเร็วลม<br>สเปาต์<br>(m/s) | ความเร็ว<br>ลมฟลูอิด<br>ไดซ์<br>(m/s) | ความสูง<br>เบด<br>(cm) | อุณหภูมิ<br>(°C) | SEC<br>(kWh/kg<br>water) | การแตกหัก             | สี                     |                        |
|----------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|          |                               |                                       |                        |                  |                          |                       | $\frac{\Delta L}{L_0}$ | $\frac{\Delta a}{a_0}$ |
| 1        | 18                            | 0                                     | 10                     | 70               | 17.727 <sup>p</sup>      | 0.069 <sup>abc</sup>  | -0.173 <sup>abc</sup>  | -1.441 <sup>n</sup>    |
| 2        |                               |                                       |                        | 80               | 15.938 <sup>n</sup>      | 0.080 <sup>abc</sup>  | -0.192 <sup>abc</sup>  | -1.495 <sup>m</sup>    |
| 3        |                               |                                       |                        | 90               | 14.307 <sup>k</sup>      | 0.097 <sup>abc</sup>  | -0.235 <sup>abc</sup>  | -1.634 <sup>h</sup>    |
| 4        |                               |                                       | 15                     | 70               | 14.051 <sup>j</sup>      | 0.057 <sup>a</sup>    | -0.185 <sup>abc</sup>  | -1.493 <sup>m</sup>    |
| 5        |                               |                                       |                        | 80               | 12.533 <sup>g</sup>      | 0.056 <sup>a</sup>    | -0.217 <sup>abc</sup>  | -1.532 <sup>kl</sup>   |
| 6        |                               |                                       |                        | 90               | 10.824 <sup>e</sup>      | 0.054 <sup>a</sup>    | -0.238 <sup>abc</sup>  | -1.694 <sup>d</sup>    |
| 7        |                               | 9                                     | 10                     | 70               | 16.520 <sup>o</sup>      | 0.110 <sup>abc</sup>  | -0.185 <sup>abc</sup>  | -1.490 <sup>m</sup>    |
| 8        |                               |                                       |                        | 80               | 15.918 <sup>n</sup>      | 0.183 <sup>abcd</sup> | -0.198 <sup>ab</sup>   | -1.684 <sup>de</sup>   |
| 9        |                               |                                       |                        | 90               | 14.509 <sup>l</sup>      | 0.209 <sup>cde</sup>  | -0.203 <sup>abc</sup>  | -1.855 <sup>a</sup>    |
| 10       |                               |                                       | 15                     | 70               | 11.803 <sup>f</sup>      | 0.136 <sup>abcd</sup> | -0.144 <sup>bc</sup>   | -1.524 <sup>m</sup>    |
| 11       |                               |                                       |                        | 80               | 9.481 <sup>c</sup>       | 0.126 <sup>abcd</sup> | -0.147 <sup>bc</sup>   | -1.621 <sup>h</sup>    |
| 12       |                               |                                       |                        | 90               | 7.955 <sup>a</sup>       | 0.141 <sup>abcd</sup> | -0.201 <sup>abc</sup>  | -1.735 <sup>c</sup>    |
| 13       | 24                            | 0                                     | 10                     | 70               | 15.433 <sup>m</sup>      | 0.166 <sup>abcd</sup> | -0.203 <sup>abc</sup>  | -1.564 <sup>j</sup>    |
| 14       |                               |                                       |                        | 80               | 12.782 <sup>j</sup>      | 0.079 <sup>abc</sup>  | -0.243 <sup>abc</sup>  | -1.643 <sup>gh</sup>   |
| 15       |                               |                                       |                        | 90               | 14.016 <sup>h</sup>      | 0.255 <sup>de</sup>   | -0.308 <sup>ab</sup>   | -1.663 <sup>fg</sup>   |
| 16       |                               |                                       | 15                     | 70               | 12.480 <sup>g</sup>      | 0.252 <sup>de</sup>   | -0.148 <sup>bc</sup>   | -1.533 <sup>kl</sup>   |
| 17       |                               |                                       |                        | 80               | 9.782 <sup>c</sup>       | 0.066 <sup>ab</sup>   | -0.208 <sup>abc</sup>  | -1.586 <sup>i</sup>    |
| 18       |                               |                                       |                        | 90               | 9.249 <sup>b</sup>       | 0.104 <sup>abc</sup>  | -0.243 <sup>abc</sup>  | -1.676 <sup>de</sup>   |
| 19       |                               | 9                                     | 10                     | 70               | 14.188 <sup>m</sup>      | 0.211 <sup>cde</sup>  | -0.388 <sup>a</sup>    | -1.492 <sup>m</sup>    |
| 20       |                               |                                       |                        | 80               | 15.266 <sup>k</sup>      | 0.163 <sup>abcd</sup> | -0.199 <sup>abc</sup>  | -1.561 <sup>j</sup>    |
| 21       |                               |                                       |                        | 90               | 13.670 <sup>i</sup>      | 0.153 <sup>abcd</sup> | -0.074 <sup>bc</sup>   | -1.803 <sup>b</sup>    |
| 22       |                               |                                       | 15                     | 70               | 12.290 <sup>g</sup>      | 0.208 <sup>bcde</sup> | -0.034 <sup>c</sup>    | -1.554 <sup>jk</sup>   |
| 23       |                               |                                       |                        | 80               | 10.101 <sup>d</sup>      | 0.255 <sup>de</sup>   | -0.086 <sup>bc</sup>   | -1.579 <sup>ij</sup>   |
| 24       |                               |                                       |                        | 90               | 9.623 <sup>c</sup>       | 0.382 <sup>f</sup>    | -0.151 <sup>abc</sup>  | -1.647 <sup>gh</sup>   |

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันหมายความว่าค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

### 3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง (SEC) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง ประกอบด้วยพลังงาน

ไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูง พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องทำความร้อน และปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่ถูกนำออกมาจากพริกไทยที่นำมาอบแห้ง ดังที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิที่สูงจะทำให้ SEC มี

ค่าต่ำ ในขณะที่เดียวกันการอบแห้งโดยการใช้อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ SEC มีค่าสูง ซึ่งเป็นผลจากการอบแห้งด้วยเงื่อนไขดังกล่าวต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน ในแง่ของรูปแบบการอบแห้ง พบว่า SEC สำหรับกรณีอบแห้งแบบเปิดทั้งสเปาต์และฟลูอิดไดซ์พร้อมกันมีค่าพลังงานจำเพาะมากที่สุดที่ 16.576 kWh/kg water ซึ่งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับพลังงานจำเพาะที่มากที่สุดของกรณีการอบแห้งแบบเปิดสเปาต์อย่างเดียว ภาพรวมพลังงานจำเพาะที่ได้จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งแบบเปิดทั้งสเปาต์และฟลูอิดไดซ์พร้อมกันมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่าการอบแห้งแบบเปิดสเปาต์อย่างเดียว

### 3.3 คุณภาพของพริกไทยที่ได้จากการอบแห้ง

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของพริกไทยซึ่งแสดงในเทอมของ  $\Delta L / L_0$  และ  $\Delta a / a_0$  เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี DUNCAN' test โดยโปรแกรม SPSS ภายใต้วิธีการอบแห้งและเงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 ในงานวิจัยนี้ใช้พริกไทยสดที่มีสีความสว่างและค่าความเป็นสีแดงอยู่ในช่วง 29.81 ถึง 36.40 และ -3.67 ถึง -2.69 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า สีของพริกไทยที่ได้จากการอบแห้งในงานวิจัยนี้มีสีคล้ำและแดงน้อยกว่าพริกไทยสด ในกรณีของความสว่างพบว่าพริกไทยที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีสีคล้ำกว่ากรณีที่อบแห้ง ด้วยอุณหภูมิต่ำในทุกเงื่อนไขของการอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลถูกเร่งด้วยความเร็วลมสเปาต์ ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์และอุณหภูมิอบแห้งที่สูง ส่วนกรณีของความเป็นสีแดงแนวโน้มการเปลี่ยนสีพริกไทยที่พบมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของความสว่าง

ผลการวิเคราะห์การแตกหักของเมล็ดพริกไทยภายใต้การอบแห้งด้วยเงื่อนไขต่างๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 1 เช่นกัน จะเห็นว่าการแตกหักของเมล็ดพริกไทยที่ได้จากการอบแห้งในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 0.054 ถึง 0.382 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่สภาวะ 6 ที่มีความสูงของเบดที่ 15 cm มีความเร็วลมสเปาต์ที่ 18 m/s และปิด

ความเร็วลมของฟลูอิดไดซ์ ทำให้การแตกหักของเมล็ดพริกไทยมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการกระทบกันเพียงเล็กน้อยของเมล็ดพริกไทยระหว่างการอบแห้ง ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างที่เบดเกิดการกระเพื่อม (เป็นผลมาจากความเร็วลมของอากาศที่ถูกจ่ายเข้ามายังหอบแห้ง) เมื่อเทียบกับการอบแห้งที่สภาวะที่ 10, 11, 12 ที่มีความสูงของเบดที่ 15 cm มีความเร็วลมสเปาต์ที่ 18 m/s เหมือนกัน แต่เปิดความเร็วลมของฟลูอิดไดซ์ที่ความเร็วลม 9 m/s มาช่วย เพอร์เซ็นต์การแตกหักที่สภาวะที่ 10, 11, 12 มีค่ามากกว่า เนื่องจากมีแรงลมของฟลูอิดไดซ์เข้ามาช่วยทำให้การกระเพื่อมของเบดลอยสูงขึ้นทำให้เมล็ดพริกไทยระหว่างการอบแห้งนั้นกระทบกันมากขึ้นกว่าตอนที่ไม่ได้เปิดฟลูอิดไดซ์

ในการทดลองครั้งนี้ ค่าที่ได้จากการทดลองปรากฏดังข้อมูลข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการใช้ความเร็วลมสเปาต์ร่วมกับความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ ทำให้การอบแห้งเมล็ดพริกไทยใช้ระยะเวลาน้อยกว่าการใช้ความเร็วลมสเปาต์เพียงอย่างเดียวเพราะว่าความเร็วลมสเปาต์ลดปัญหาแรงดันตกคร่อมภายในเบดและการใช้ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์จะช่วยเพิ่มการหมุนเวียนของเมล็ดพริกไทยได้ดีขึ้นทำให้เมล็ดพริกไทยสัมผัสกับความร้อนอยู่ตลอดเวลาหลังกระจายตัวจากลำอากาศหรือความเร็วลมสเปาต์

เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง (SEC) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง ประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูง พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เครื่องทำความร้อน และปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่ถูกนำออกมาจากพริกไทยที่นำมาอบแห้ง ดังที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิที่สูงจะทำให้ SEC มีค่าต่ำ ในขณะที่เดียวกันการอบแห้งโดยการใช้อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ SEC มีค่าสูง

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของพริกไทยซึ่งแสดงในเทอมของ และ พบว่าสีของพริกไทยที่ได้จากการอบแห้งในงานวิจัยนี้มีสีคล้ำและแดงน้อยกว่าพริกไทยสด ในกรณีของความสว่างและสีแดงพบว่า พริกไทยที่ผ่าน

การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีสึกล้ำกว่ากรณีที่อบแห้ง ด้วย อุณหภูมิต่ำในทุกเงื่อนไขของการอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลถูกเร่งด้วยความเร็ว ลมสเปาต์ ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์และอุณหภูมิอบแห้งที่สูง

การแตกหักของเมล็ดพริกไทยภายใต้การอบแห้ง ด้วยเงื่อนไขต่างๆ สามารถดูได้ จากตารางที่ 1 เช่นกัน จะ เห็นว่าการแตกหักของเมล็ดพริกไทยที่ได้จากการอบแห้ง ในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 0.054 ถึง 0.382 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีแรงลมของสเปาต์และฟลูอิดไดซ์ เข้ามาช่วยทำให้เกิดการกระเป๋มของเบตทำให้เมล็ด พริกไทยระหว่างการอบนั้นกระทบกันส่งผลให้เกิดการ แตกหักของเมล็ดพริกไทย

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการลดความชื้นของพริกไทยด้วย เครื่องอบแห้งสเปาต์ฟลูอิดเบต และศึกษาผลของตัวแปร ต่างๆ โดยเมล็ดพริกไทยได้ถูกใช้เป็นตัวแทนของวัสดุทาง การเกษตรในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้จากการทดลองซึ่ง ประกอบไปด้วยจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความ สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง รวมไปถึง คุณภาพทางกายภาพบางอย่างของพริกไทยที่ผ่านการ อบแห้งจะนำไป เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี DUNCAN' test โดยโปรแกรม SPSS ภายใต้วิธีการ อบแห้งและเงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ ซึ่งสรุปผลการ ทดลองได้ดังนี้

ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ความเร็ว ลมสเปาต์ร่วมกับความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ ทำให้การอบแห้ง เมล็ดพริกไทยใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการใช้ความเร็วลมส เปาต์เพียงอย่างเดียวเพราะว่าความเร็วลมสเปาต์ลด ปัญหาแรงดันตกคร่อมภายในเบตและการใช้ความเร็วลม ฟลูอิดไดซ์จะช่วยเพิ่มการหมุนเวียนของเมล็ดพริกไทยได้ดี ขึ้นทำให้เมล็ดพริกไทยสัมผัสกับความร้อนอยู่ตลอดหลัง กระจายตัวจากลำอากาศหรือความเร็วลมสเปาต์

ในส่วนของการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ กระบวนการอบแห้ง (SEC) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง

พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง ประกอบด้วยพลังงาน ไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมแรงดันสูง พลังงานไฟฟ้าที่ป้อน ให้แก่เครื่องทำความร้อน และปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่ถูก นำออกมาจากพริกไทยที่นำมาอบแห้ง พบว่าสภาวะที่ดี ที่สุดสำหรับการอบแห้งคือ สภาวะที่ 12 ซึ่งใช้ความเร็ว ลมสเปาต์ 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 9 m/s ความ สูงเบต 15 cm อุณหภูมิอบแห้ง 90°C เวลาที่ใช้ในการ อบแห้ง 150 นาที มีค่า SEC = 7.936 kWh/kg water การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิที่สูงจะทำให้ SEC มีค่าต่ำ ใน ขณะเดียวกันการอบแห้งโดยการใช้อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ SEC มีค่าสูง ซึ่งเป็นผลจากการอบแห้งด้วยเงื่อนไข ดังกล่าวต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานการอบแห้งโดยใช้ อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้ SEC มีค่าสูง ซึ่งเป็นผลจากการ อบแห้งด้วยเงื่อนไขดังกล่าวต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน ในแง่ของรูปแบบการอบแห้ง พบว่า SEC สำหรับกรณี อบแห้งแบบเปิดทั้งสเปาต์และฟลูอิดไดซ์พร้อมกันมีค่า พลังงานจำเพาะมากที่สุดที่ 16.576 kWh/kg water ซึ่ง ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับพลังงานจำเพาะที่มากที่สุดของกรณี การอบแห้งแบบเปิดสเปาต์อย่างเดียว ภาพรวมพลังงาน จำเพาะที่ได้จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการอบแห้ง แบบเปิดทั้งสเปาต์และฟลูอิดไดซ์พร้อมกันมีประสิทธิภาพ การใช้พลังงานสูงกว่าการอบแห้งแบบเปิดสเปาต์อย่าง เดียว

สำหรับความสว่างของพริกไทยที่ผ่านการ อบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีสึกล้ำมากกว่ากรณีอบแห้งที่ อุณหภูมิต่ำ ในส่วนของความเป็นสีแดงนั้นมีแนวโน้ม เช่นเดียวกันกับความสว่าง ดังนั้นถือได้ว่าอุณหภูมิเป็น ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของพริกไทย

เมื่อพิจารณาถึงการแตกหักของเมล็ดพริกไทยจะ พบว่า การแตกหักของเมล็ดพริกไทยที่ได้ จากการอบแห้ง ในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 0.054 ถึง 0.382 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบการแตกหักของ เมล็ดพริกไทยจากการ อบแห้งเงื่อนไขต่างๆ พบว่าการอบแห้งที่สภาวะที่ 6 ที่ความสูง ของเบตที่ 15 cm ความเร็วลมสเปาต์ที่ 18 m/s และปิด ความเร็วลมของฟลูอิดไดซ์ มีค่าเปอร์เซ็นต์การแตกหัก

ของเมล็ดพริกไทยน้อยกว่าการอบแห้งแบบที่ใช้เทคนิคสเปาต์ฟลูอิดเบดที่ความสูงเบดเท่ากัน นั้นหมายความว่า การอบแห้งที่เป็ดเพียงลมสเปาต์เพียงอย่างเดียวมี ศักยภาพในการลดความเสียหายของพริกไทยมากกว่าการอบแห้งแบบเทคนิคสเปาต์ฟลูอิดเบด

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนวิจัยสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย ประจำปี 2561 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] E.K. Akpinar, Y. Bicer and C. Yildiz, “Thin layer drying of red pepper,” *Journal of Food Engineering*, Vol. 59, No.1, pp. 99-104, 2003.
- [2] V.S. Sutkar, N.G. Deen and J.A.M. Kuipers, “Spout fluidized beds: Recent advances in experimental and numerical studies,” *Chemical Engineering Science*, Vol. 86, pp.124-136, 2013.
- [3] E.R. Monazam, R.W. Breault and J. Weber, “Analysis of maximum pressure drop for a flat-base spouted fluid bed,” *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 12, no. 2, pp. 43-51, 2017.
- [4] W. Zhong, X. Chen and M. Zhang, “Hydrodynamic characteristics of spout-fluid bed: pressure drop and minimum spouting/spout-fluidizing Velocity.” *Chem. Eng. J.*, Vol. 118, pp. 37-46, 2006.
- [5] Y. Zhang, W. Zhong, and B. Jin, “New method for the investigation of particle mixing dynamic in a spout-fluid bed.” *Powder Technol.*, Vol. 208, pp. 702-712, 2011.
- [6] L. Marmol, “Low temperature drying of pomace in spout and spout-fluid beds.” *J. Food Eng.*, Vol. 79, pp. 1179-1190, 2007.
- [7] H.J. Ciro-Vela ´squez, R.L. Cunha and F.C. Menegalli, “Drying of Xanthan gum using a two-dimensional spouted fluidized bed (2DSFB) with inert particles : performance and rheological considerations.” *Drying Technol.*, Vol. 28, pp. 389-401, 2010.
- [8] M.Zielinska and M. Markowski, “Drying behavior of carrots dried in a spout-fluidized bed dryer,” *Drying Technol.*, Vol.25, pp. 261-270, 2007.
- [9] I. Biaobrzewski, M. Zielinska, A.S. Mujumdar and M. Markowski M, “Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles - simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized bed drier.” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 4704-4716, 2008.

## การแก้ปัญหการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์โดยใช้วิธีเมตาฮิวริสติก

### Solving Many-objective Cockpit Crew Pairing Problem of Low-cost Airline using Metaheuristic

นิชา กฤษณพันธุ์ ปารเมศ ชุตินา\*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Nicha Krisanaphan Parames Chutima\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

254 Phayathai Road, Wang Mai, Pathum Wan, Bangkok 10330

\*Corresponding author Email: parames.c@chula.ac.th

(Received: October 25, 2019; Accepted: February 27, 2020)

#### บทคัดย่อ

การแก้ปัญหการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ จัดเป็นปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimization Problems: MaOPs) และเป็นปัญหาประเภทเอ็นพี-ฮาร์ด (Non-deterministic Polynomial Hard: NP-Hard) งานวิจัยนี้เสนออัลกอริทึมที่พัฒนาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ได้แก่วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) และวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) โดยพิจารณาวัตถุประสงค์จำนวน 5 วัตถุประสงค์ พร้อมกันดังนี้ เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด ปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียมกัน เส้นทางการบินสั้นน้อยที่สุด ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด และจำนวนคัปบินน้อยที่สุด ผลการวิจัยพบว่า MOEA/D มีสมรรถนะด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของกลุ่มคำตอบ (IGD) ด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDs1) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (RNDs2) และด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time) ดีกว่า NSGA-III

**คำสำคัญ:** ปัญหการจับคู่เที่ยวบิน มากวัตถุประสงค์ วิธีเชิงพันธุกรรม

## ABSTRACT

Solving many-objective cockpit crew pairing problem of low-cost airline is classified as many-objective optimization problems (MaOPs) and non-deterministic polynomial hard (NP-Hard). The purpose of research is to compare the efficiency of two algorithms as follows multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition (MOEA/D) and non-dominated sorting genetic algorithm III (NSGA-III). The objectives considered in this research are minimizing idle time, balancing workload, minimizing repeat flight leg, minimizing the difference of nautical mile between each flight code, and minimizing number of pair of cockpit crews. The experiments show that MOEA/D outperforms NSGAIII in terms of GD, IGD, Spread, RND1, RND2, and CPU Time

**Keyword:** cockpit crew pairing problem, many-objective, genetic algorithm

### 1. บทนำ

อุตสาหกรรมการบินเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่และต้นทุนสูง การลดต้นทุนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นในการเพิ่มโอกาสในการแข่งขัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสายการบินราคาประหยัด (Low Cost Airline) มีการแข่งขันด้านราคาที่สูงขึ้น มีการตัดราคาจากสายการบินอื่น แม้รายได้จากค่าโดยสารและน้ำหนักส่วนเกินเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณการขนส่งที่เพิ่มขึ้นแต่ก็ประสบกับปัญหาขาดทุนอย่างต่อเนื่อง

ปัญหาการจัดตารางการดำเนินงานของนักบิน (Crew Scheduling) ประกอบด้วยปัญหา 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดคู่นักบิน (Crew Pairing) และส่วนที่สองเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการมอบหมายงานให้นักบิน (Crew Rostering) ซึ่งสายการบินราคาประหยัดกรณีศึกษาข้างต้นยังไม่มีเครื่องมือที่ช่วยในการจัดตารางการดำเนินงานของนักบิน

อย่างไรก็ตามตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา สายการบินกรณีศึกษามีจำนวนผู้โดยสารที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีการเพิ่มสูงจำนวนเครื่องบินเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้โดยสาร ส่งผลให้มีจำนวนเที่ยวบินที่เพิ่มสูงขึ้น และเนื่องจากปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้พนักงานวางแผนจัดตารางการดำเนินงานได้ตามเที่ยวบินที่มีอยู่เท่านั้น แต่ไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ภาระงานที่เพิ่มขึ้นอย่าง

ไม่เท่าเทียม ทำให้ต้องจ้างนักบินเพิ่มจากสายการบินอื่น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านการจัดตารางเพิ่มสูงขึ้นมาก สำหรับปัญหาการจัดตารางการปฏิบัติงาน หากสามารถจัดการให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยลดค่าใช้จ่าย ทั้งนี้จะต้องไม่ขัดกับข้อบังคับ ระเบียบทางการบินของรัฐ สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) และกฎของสายการบิน

ปัญหาการจัดคู่นักบินของสายการบินแบบมากวัตถุประสงค์ถูกจัดเป็นปัญหาประเภทเอ็นพี-ฮาร์ด (Non-deterministic Polynomial Hard: NP-Hard) เนื่องจากมีความยุ่งยาก ซับซ้อน และมีขนาดใหญ่ หากใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์มาแก้ปัญหาจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนาน และมีจำนวนคำตอบที่มาก ดังนั้นจึงมีการนำวิธีทางเมตาฮิวริสติกเข้ามาช่วยแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problems: MOPs) เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับได้ในเวลาที่สั้นลง ตัวอย่างเช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms: GA) เป็นวิธีการเมตาฮิวริสติกที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต เพราะเป็นวิธีการที่ให้คำตอบใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่ไม่มาก

ปัจจุบันปัญหาที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมการบินรวมถึงปัญหาการจัดคู่นักบินมีจำนวนวัตถุประสงค์มากกว่า 3

วัตถุประสงค์ ซึ่งอาจจะขัดแย้งกันแต่ต้องพิจารณาพร้อมกัน เรียกปัญหานี้ว่าปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimization Problems: MaOPs) เนื่องจากเป็นปัญหาที่มีมิติของแกนเวกเตอร์มาก หรือมีจำนวนวัตถุประสงค์ที่มาก ทำให้ประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Evolutionary Algorithms: MOEAs) ลดลง และแก้ปัญหา MaOPs ได้ไม่ดีเท่าที่ควร [1]

วิธีการ MOEAs ส่วนใหญ่ จะใช้การพิจารณาคำตอบโดยรวม ด้วยการจัดอันดับของคำตอบที่ไม่ถูกรับรองหรือเรียกว่าวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) วิธีการนี้มีความซับซ้อน ใช้เวลามาก และยากที่จะเกิดสมดุลของความหลากหลายรวมถึงการลู่เข้าของคำตอบ [2] เนื่องจากการมีวัตถุประสงค์ที่มาก ทำให้เกิดการกระจุกตัวของคำตอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (1<sup>st</sup> frontier) ส่งผลให้ทิศทางของการพัฒนาคำตอบติดอยู่ในคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่ม (Local Optima)

การแก้ปัญหา MaOPs อาจทำได้โดยการลดจำนวนวัตถุประสงค์ลง ด้วยการรวมวัตถุประสงค์ที่ไม่ขัดแย้งกันไว้เป็นวัตถุประสงค์เดียว [3] อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สามารถใช้ได้กับหลายปัญหาในทางปฏิบัติ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตถุประสงค์ (A Many-Objective Evolutionary Algorithms: MaOEAs) จึงถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งหนึ่งในอัลกอริทึมที่โดดเด่นของ MaOEAs คือ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) ถูกพัฒนาโดย Qingfu and Hui [2] วิธีการดำเนินงานของ MOEA/D คือ การที่จะทำการจำแนกปัญหา MaOPs ออกเป็นปัญหาย่อย และทำการแก้ปัญหาย่อยไปพร้อมกัน ซึ่งแต่ละปัญหาย่อยนั้นจะได้คำตอบที่ดีที่สุด

เนื่องจากการแก้ปัญหา MaOPs นอกจากจะให้คำตอบที่มีจำนวนมากและไม่รู้ขอบเขตที่ชัดเจน อีกทั้งยัง

ต้องใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ วิธีการแก้ปัญหาเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูงของ MaOEAs จึงเป็นอัลกอริทึมทางเลือก เพราะอัลกอริทึมนี้สามารถค้นหากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto optimal solutions) ได้ในเจเนอเรชันเดียว และไม่เกิดการกระจุกตัวของคำตอบ เนื่องจากการค้นหาคำตอบแต่ละปัญหาย่อย ทำให้มีการกำหนดทิศทางและขอบเขตของคำตอบในแต่ละปัญหาย่อยที่ชัดเจน อีกทั้งมีความซับซ้อนและใช้เวลาน้อยกว่าอัลกอริทึมอื่น เช่น วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรับรอง (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA II) และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) รวมถึงยังให้คำตอบที่หลากหลาย ซึ่งอัลกอริทึมนี้จะให้คำตอบที่ดีและแตกต่างกับอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจน เมื่อมีวัตถุประสงค์ตั้งแต่ 4 ถึง 15 วัตถุประสงค์ [2]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) และวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรับรอง III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) โดยมีวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดจำนวน 5 วัตถุประสงค์ ดังนี้ 1) เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด (Minimizing idle time) 2) ปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียมกัน (Balance workload) 3) เส้นทางการบินสั้นน้อยที่สุด (Minimizing repeat flight leg) 4) ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด (Minimizing the difference of nautical mile between each flight code) 5) จำนวนคู่นักบินน้อยที่สุด (Minimizing number of pair of cockpit crews)

## 2. ลักษณะทั่วไปของสายการบิน

สายการบินกรณีศึกษา อยู่ภายใต้การดูแลสังกัดกระทรวงคมนาคมเป็นบริษัทให้บริการขนส่งทางอากาศภายในประเทศ และต่างประเทศ จัดเป็นสายการบินราคาประหยัด ในลักษณะการดำเนินการจุดต่อจุดโดยไม่มีบริการเชื่อมต่อ (Point-to-Point) บริษัทเป็นผู้ให้บริการเที่ยวบินที่ครอบคลุมทุกภูมิภาคภาคในประเทศไทย โดยในปัจจุบันได้ให้บริการจากฐานปฏิบัติการหลักที่ท่าอากาศยานนานาชาติดอนเมือง โดยมุ่งเน้นให้บริการเที่ยวบินทั้งในเส้นทางที่มีความต้องการทางการบินหนาแน่นอย่างสายการบินหลัก และเส้นทางการบินที่มีความต้องการการบินไม่มากนักอย่างเส้นทางสายการบินรอง เพื่อให้สอดคล้องกับกลยุทธ์การแข่งขันของบริษัทว่าด้วยการให้บริการเส้นทางการบินที่ครอบคลุมมากที่สุดในประเทศไทย อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 เป็นต้นมา สายการบินได้เผชิญวิกฤติขาดทุนสะสม มีการยกเลิกเที่ยวบิน การดำเนินการเที่ยวบินที่ล่าช้า เนื่องจากบริษัทมีต้นทุนค่าการบริหารสูงจากค่าใช้จ่ายด้านพนักงาน การบริหารงานการปฏิบัติหน้าที่ของนักบิน ทั้งนี้การดำเนินงานของบริษัทได้แบ่งออกเป็นหลายส่วนงาน

## 3. ปัญหาการจับคู่เที่ยวบิน

งานวิจัยฉบับนี้ พิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 5 วัตถุประสงค์ โดยให้ค่าน้ำหนักความสำคัญเท่ากันหมด ดังนี้

### 3.1 เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด

ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน (Flight Duty Period ; FDP) มีผลอย่างมากต่อเวลาและต้นทุนในการจับคู่เที่ยวบิน เพราะถ้าหากเวลาว่างระหว่างเที่ยวบินนาน ก็จะทำให้เกิดความล่าช้าในเที่ยวบินถัดไป นอกจากนั้นส่งผลให้ต้องเสียค่าเช่าหุลุมจอดเครื่องบินสูงขึ้นและทางสายการบินเองอาจจะต้องชดเชยในกรณีที่เที่ยวบินล่าช้า [4] แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 1

$$f_1(x) = \sum_{r=1}^R \sum_{q=1}^Q DS_{qr} X_{qr} - \sum_{r=1}^R \sum_{q=1}^Q DE_{qr} X_{qr} \quad (1)$$

เมื่อ  $f_1(x)$  คือ เวลาว่างระหว่างเที่ยวบิน

$DS_{qr}$  คือ เวลาเริ่มต้นการปฏิบัติหน้าที่การบินวันที่  $r$  เที่ยวบินที่  $q$

$DE_{qr}$  คือ เวลาสิ้นสุดการปฏิบัติหน้าที่การบินวันที่  $r$  เที่ยวบินที่  $q$

$$X_{qr} = \begin{cases} 1, & \text{day } r \text{ leg } q \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} ; X \in \{0,1\}$$

### 3.2 ปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียมกัน

การจับคู่เที่ยวบินอย่างเท่าเทียมกัน คิดจากค่าเฉลี่ยผลรวมของค่าผลต่างค่าเฉลี่ยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินแต่ละรหัสเที่ยวบินกับค่าเฉลี่ยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินที่คาดหวัง แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2 และสมการที่ 3 [5]

$$f_2(x) = \frac{1}{P} \sum_{r=1}^R T_r \quad (2)$$

$$T_r = \left(1 - \frac{1}{\sum_{q=1}^Q FDP_{qr} X_{qr}}\right) ; \forall r \in R \quad (3)$$

เมื่อ  $T_r$  คือ ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินของแต่ละวัน

$P$  คือ จำนวนรหัสเที่ยวบินที่ได้จากการจับคู่ทั้งหมดที่เป็นไปได้

$FDP_{qr}$  คือ ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินวันที่  $r$  เที่ยวบินที่  $q$

### 3.3 เส้นทางการบินสั้นน้อยที่สุด

เส้นทางการบินสั้นน้อยที่สุดเป็นการพิจารณาถึงการกระจายรูปแบบเที่ยวบิน (Distribution of flight pattern) โดยจัดสรรรูปแบบเที่ยวบินให้แต่ละคนมีจำนวนใกล้เคียงกันให้มากที่สุด เนื่องจากการสำรวจการปฏิบัติงานของนักบินพบว่าบางคนต้องการบินเส้นทางที่แตกต่างกันตามที่ต้องการบ้าง การที่นี้วางแผนจะจัดตารางให้รองรับความต้องการของนักบินทุกคนนั้นเป็นไปได้ยาก จึงทำการเสนอให้จัดรูปแบบเที่ยวบินแก่นักบินมีจำนวนซ้ำในแต่ละสัปดาห์ให้น้อยที่สุด ไม่ให้เกิดการบินรูปแบบเที่ยวบินซ้ำมากเกินไป ทั้งนี้ ทางสายการบินมอง

ถึงว่าการบินในเส้นทางแต่ละภูมิภาคของทุกคนเท่าเทียมกันก่อให้เกิดการทำงานที่มีทักษะได้หลากหลาย แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 4 [5]

$$f_3(x) = \sum_{q=1}^Q \sum_{z=1}^Z \sum_{y=1}^Y V_{yz} X_{qr} ; \forall r \in R \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } V_{yz} = \begin{cases} 1, \text{flight } z \text{ destination } y \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} ; V \in \{0,1\}$$

### 3.4 ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด

การจับคู่เที่ยวบินอย่างเท่าเทียมกัน คิดจากค่าเฉลี่ยผลรวมของผลต่างค่าเฉลี่ยระยะทางการบินแต่ละรหัสกับค่าเฉลี่ยระยะทางการบินที่คาดหวัง แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 5 และสมการที่ 6

$$f_4(x) = \frac{1}{P} \sum_{r=1}^R S_r \quad (5)$$

$$S_r = (1 - \frac{1}{\sum_{q=1}^Q U_{qr} X_{qr}}) ; \forall r \in R \quad (6)$$

เมื่อ  $S_r$  คือ ค่าเฉลี่ยระยะทางการบินของแต่ละวัน

$P$  คือ จำนวนรหัสเที่ยวบินที่ได้จากการจับคู่ทั้งหมดที่เป็นไปได้

$U_{qr}$  คือ ระยะทางการปฏิบัติหน้าที่การบินวันที่  $r$  ที่เที่ยวที่  $q$

### 3.5 จำนวนคู่บินน้อยที่สุด

จำนวนคู่บินน้อยที่สุดเป็นการพิจารณาหลังจากการจับคู่เที่ยวบินครบสัปดาห์ เพื่อที่จะได้วางแผนจัดสรรคู่นักบินได้เหมาะสม แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 7 และสมการที่ 8

$$f_5(x) = Nw \quad (7)$$

$$Nw = \text{roundup} \left( \frac{Nr}{7}, 0 \right) \quad (8)$$

เมื่อ  $Nw$  คือ จำนวนคู่นักบินที่ทำการบิน

$Nr$  คือ จำนวนวันที่ทำการบิน

## 4. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) และวิธีเทบปีเชฟฟ์ ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบด้วยวิธีการให้น้ำหนักของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นทางเลือก โดยคำตอบที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้จะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และจะไม่ถูกรอบงำจากคำตอบอื่น (Non-Dominated Solution) แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าคำตอบใดดีกว่ากัน [6] ซึ่งกลุ่มคำตอบที่ดีมีดังนี้

### 1. วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-Based Approach)

ดังสมการที่ 9

$$\text{minimize} : \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x})\} \quad (9)$$

เมื่อ  $\bar{x}$  คือ เวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ (สตริงคำตอบ)

$f_k(x)$  คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่  $k$

ของเวกเตอร์  $\bar{x}$

กรณีหาคำตอบที่น้อยที่สุด เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ  $\bar{x}$  จะหาคำตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ  $y$  ก็ต่อเมื่อ  $f_k(x) \leq f_k(y)$  ทุกค่า และ  $f_i(x) < f_i(y)$  อย่างน้อย 1 ค่า โดยที่  $k = 1, 2, \dots, \text{Objective}$

### 2. วิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach)

ดังสมการที่ 10

$$\text{minimize } g^{te}(\bar{x}_j | \bar{\lambda}_j, z^*) = \max_{1 \leq k \leq \text{obj}} \{ \lambda_{jk} | f_k(\bar{x}_j) - z_k^* | \} \quad (10)$$

เมื่อ  $g^{te}(\bar{x}_j)$  คือ ผลต่างมากที่สุดระหว่างค่า

วัตถุประสงค์ของสตริง  $j$  กับค่า

เป้าหมายของเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก  $\bar{\lambda}_j$

ของปัญหาย่อยที่  $j$

$z_k^*$  คือ ค่าเวกเตอร์เป้าหมาย โดยที่  $z_k^* = \{z_1^*, z_2^*, \dots, z_{obj}^*\}$  กรณีหาค่าของคำตอบที่น้อยที่สุด  $z_k^* = \min\{f_k(\bar{x})\}$  กรณีหาค่าของคำตอบที่มากที่สุด  $z_k^* = \max\{f_k(\bar{x})\}$   
 $\bar{\lambda}_j$  คือ เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อยที่  $j$  โดยที่  $\bar{\lambda}_j = \{\lambda_{j1}, \lambda_{j2}, \dots, \lambda_{jobjective}\}$

## 5. อัลกอริทึม MOEA/D

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) มีหลักการในการเพิ่มจำนวนคำตอบที่ดีที่อยู่บนเส้นพารेटอ (Pareto front) ซึ่งจะนำไปสู่การหาคำตอบที่ดีสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ได้ในเวลาอันสั้น ทั้งนี้มีแนวคิดที่จะแก้ปัญหาด้วยการวิวัฒนาการคำตอบที่มีไปพร้อมกันในทุกวัตถุประสงค์ โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ของสตริงข้างเคียง (Neighborhood) ซึ่งใช้ระยะห่างระหว่างผลรวมค่าสัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์  $\bar{\lambda}_j$  ด้วยวิธีระยะห่างยูคลิดีเนียน (Euclidian) ในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นตัวเลือกสตริงคำตอบที่จะนำมาสุ่มเพื่อพัฒนาคำตอบ การพัฒนาคำตอบในประชากร (Population) แต่ละตัวใช้การครอสโอเวอร์ (Crossover) ของวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อพัฒนาคำตอบ (Population) โดยจะให้คำตอบรุ่นลูก (Offspring) ที่มีความคล้ายคลึงกับคำตอบรุ่นเดิม (Parent) ที่เป็นค่าที่ดี ทำให้เกิดการพัฒนาทุกๆ สตริงคำตอบ [2] และทำการประเมินคำตอบที่ดีด้วยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) แล้วคำนวณค่าเทบชีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) เพื่อเลือกคำตอบที่ดีมาแทนที่ในแต่ละจุดตั้งต้น จากนั้นจะนำสตริงรุ่นลูกที่ดีที่สุดหลังจากการเทียบค่าเทบชีเชฟฟ์แล้วทำการจัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ในแต่ละเจเนอเรชันด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominated Sorting) ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D ในการหาคำตอบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ มีดังต่อไปนี้

### 5.1 สร้าง $\lambda_{jk}$ และคำนวณ Euclidean Distances

สร้างค่าน้ำหนัก  $\lambda_{jk}$  โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) เป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (N) x จำนวนวัตถุประสงค์ (Obj) โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมมินิแทบ 17 (Minitab17) ดังตารางที่ 1

คำนวณระยะห่างระหว่างจุดพิคัดของเวกเตอร์น้ำหนัก  $\lambda_{jk}$  ทั้งหมด (Euclidean distances) ดังสมการที่ 11 และจัดเก็บสตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อยที่  $i$  ลงในเซต  $B(i)$

$$d_{jl} = \sqrt{\sum_{k=1}^{obj} (\lambda_{jk} - \lambda_{lk})^2}; \forall j \in N, \forall l \in N \quad (11)$$

เมื่อ  $d_{jl}$  คือระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของค่าน้ำหนักสตริงที่  $j$  กับสตริงที่  $l$  โดยที่  $j = 1, 2, \dots, N$  และ  $l = 1, 2, \dots, N$

เมื่อได้ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักแล้ว ให้ทำการกำหนดสตริงข้างเคียง โดยเรียงค่าระยะห่างของค่าน้ำหนักจากน้อยไปมากและตัดให้เหลือเท่ากับจำนวนสตริงข้างเคียงที่กำหนดไว้ข้างต้น จะได้สตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์

| ปัญหาย่อย $j$ | ค่าน้ำหนัก $\lambda_{jk}$ ของแต่ละวัตถุประสงค์ |     |     |     |     |
|---------------|------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|               | 1                                              | 2   | 3   | 4   | 5   |
| 1             | 0                                              | 0   | 0   | 0.5 | 0.5 |
| 2             | 0                                              | 1   | 0   | 0   | 0   |
| 3             | 0.5                                            | 0.5 | 0   | 0   | 0   |
| 4             | 1                                              | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 5             | 0                                              | 0   | 1   | 0   | 0   |
| 6             | 0                                              | 0.5 | 0.5 | 0   | 0   |
| 7             | 0                                              | 0   | 0   | 0   | 1   |
| 8             | 0                                              | 0.5 | 0   | 0   | 0.5 |
| 9             | 0.5                                            | 0   | 0   | 0   | 0.5 |
| 10            | 0                                              | 0.5 | 0   | 0.5 | 0   |

ตารางที่ 1 ซิมเพล็กซ์แลตทิซซี (ต่อ)

| ปัญหา<br>ย่อย j | ค่าน้ำหนัก $\lambda_{jk}$ ของแต่ละวัตถุประสงค์ |   |     |     |     |
|-----------------|------------------------------------------------|---|-----|-----|-----|
|                 | 1                                              | 2 | 3   | 4   | 5   |
| 11              | 0                                              | 0 | 0.5 | 0.5 | 0   |
| 12              | 0                                              | 0 | 0.5 | 0   | 0.5 |
| 13              | 0.5                                            | 0 | 0   | 0.5 | 0   |
| 14              | 0                                              | 0 | 0   | 1   | 0   |
| 15              | 0.5                                            | 0 | 0.5 | 0   | 0   |

### 5.2 สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจะใช้วิธีสุ่มเลือกแบบอิสระ โดยสุ่มเท่ากับจำนวนประชากรที่ความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเที่ยวบินผลิตภัณฑ์ทั้งหมด แสดงตัวอย่างสตริงจากการสุ่มดังตารางที่ 3

### 5.3 ประเมินค่าวัตถุประสงค์สตริงคำตอบเริ่มต้น

การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงในตัวอย่างนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในหัวข้อที่ 3 แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงในตัวอย่างดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 เซตสตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อย

| ปัญหา<br>ย่อย | สตริงข้างเคียง |   |    |    |
|---------------|----------------|---|----|----|
| 1             | 1              | 7 | 8  | 9  |
| 2             | 2              | 3 | 6  | 8  |
| 3             | 3              | 2 | 4  | 6  |
| 4             | 4              | 3 | 9  | 13 |
| 5             | 5              | 6 | 11 | 12 |
| 6             | 6              | 2 | 3  | 5  |
| 7             | 7              | 1 | 8  | 9  |
| 8             | 8              | 1 | 2  | 3  |

ตารางที่ 2 เซตสตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อย (ต่อ)

| ปัญหา<br>ย่อย | สตริงข้างเคียง |   |    |    |
|---------------|----------------|---|----|----|
| 9             | 9              | 1 | 3  | 4  |
| 10            | 10             | 1 | 2  | 3  |
| 11            | 11             | 1 | 5  | 6  |
| 12            | 12             | 1 | 5  | 6  |
| 13            | 13             | 1 | 3  | 4  |
| 14            | 14             | 1 | 10 | 11 |
| 15            | 15             | 3 | 4  | 5  |

### 5.4 การพัฒนาคำตอบ

พัฒนาคำตอบและปรับปรุงสตริงคำตอบด้วยวิธีครอสโอเวอร์ คือ การนำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่มาแลกเปลี่ยนบางส่วนของสตริงซึ่งกันและกัน เพื่อให้เกิดสตริงรุ่นใหม่หรือสตริงคำตอบรุ่นลูก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบพาเซิลแมพครอสโอเวอร์ 1 ตำแหน่ง (One-Point Partially-mapped crossover: PMX) แสดงสตริงคำตอบรุ่นลูกดังตารางที่ 5

### 5.5 ประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์สตริงคำตอบรุ่นลูก

ประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกดังตารางที่ 6

### 5.6 รวบรวมค่าวัตถุประสงค์สูงสุด และต่ำสุด

รวบรวมค่าวัตถุประสงค์สูงสุด ( $ff_k^{max}$ ) และต่ำสุด ( $ff_k^{min}$ ) หลังจากที่ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้งสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูกแล้ว โดยงานวิจัยนี้ได้มีการป้องกันส่วนหารเท่ากับ 0 ซึ่งจะให้คำตอบที่เป็นไปไม่ได้ โดยการบวกค่าคงที่ 0.0005 ให้กับค่า  $ff_k^{max}$  ดังตารางที่ 7

### 5.7 เปรียบเทียบค่าเป้าหมาย ( $z_k^*$ )

เมื่อได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยกำหนดให้  $z_k^* = \min(f_k(x))$  ดังตารางที่ 8

### 5.8 นอร์มัลไลซ์ (Normalization)

นอร์มัลไลซ์ (Normalization) คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงในปัญหาย่อย สตริงคำตอบรุ่นลูก และค่าเป้าหมาย ดังตารางที่ 9

### 5.9 เปรียบเทียบสตริงคำตอบรุ่นลูกด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์

เปรียบเทียบสตริงคำตอบรุ่นลูกด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์ ซึ่งจะใช้ค่าน้ำหนัก  $\lambda_{jk}$  ของแต่ละปัญหาย่อย โดยตัวอย่างนี้จะแสดงเพียงปัญหาย่อยที่ 1 โดยสตริงคำตอบที่ให้ค่า  $g(y|\lambda_1, z^N)$  ที่ต่ำที่สุดในสตริงคำตอบรุ่นลูกแรก จะถูกเลือกมาทำขั้นตอนต่อไป ดังตารางที่ 10

### 5.10 การหาค่าที่ดีที่สุด

ขั้นตอนนี้จะใช้วิธีการเทบปีเซฟฟ์ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละค่าน้ำหนัก โดยจะมีการประเมินทีละสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยเท่านั้น โดยมีลำดับการประเมินดังนี้

1. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนการแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกในปัญหาย่อยว่ามีค่าน้อยกว่าจำนวนการแทนที่

สูงสุดหรือไม่ ( $n_r < NR$ ) ถ้าจำนวนการแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกในปัญหาย่อยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจำนวนการแทนที่สูงสุด ( $n_r \geq NR$ ) ให้หยุดการประเมิน

2. คำนวณค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิม  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N)$  และสตริงรุ่นลูก  $g(y|\lambda_1, z^N)$  ที่ค่าน้ำหนักเดียวกัน

3. เปรียบเทียบค่าเทบปีเซฟฟ์ที่มากที่สุดของสตริงเดิม  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N)$  กับสตริงรุ่นลูก  $g(y|\lambda_1, z^N)$  โดยถ้าค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิมน้อยกว่าค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงรุ่นลูก  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N) < g(y|\lambda_1, z^N)$  จะแทนที่ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิมเท่ากับค่าสตริงรุ่นลูก แต่ถ้าค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิมมากกว่าหรือเท่ากับค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงรุ่นลูก

$g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N) \geq g(y|\lambda_1, z^N)$  จะเปรียบเทียบค่าต่อมา ดังตารางที่ 11

### 5.11 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาคำตอบ เมื่อครบจำนวนเจเนอเรชันตามที่กำหนด

ตารางที่ 3 สตริงคำตอบเริ่มต้น

| ปัญหาย่อย | สตริงคำตอบ | ลำดับสตริง |    |    |   |   |   |   |    |   |   |
|-----------|------------|------------|----|----|---|---|---|---|----|---|---|
| 1         | 1          | 6          | 10 | 8  | 1 | 3 | 2 | 9 | 4  | 5 | 7 |
| 2         | 2          | 2          | 8  | 10 | 9 | 1 | 5 | 4 | 6  | 3 | 7 |
| 3         | 3          | 2          | 8  | 10 | 9 | 1 | 5 | 4 | 6  | 3 | 7 |
| 4         | 4          | 5          | 4  | 10 | 1 | 3 | 2 | 9 | 8  | 7 | 6 |
| 5         | 5          | 3          | 8  | 10 | 2 | 1 | 5 | 4 | 6  | 9 | 7 |
| 6         | 6          | 2          | 10 | 8  | 1 | 3 | 5 | 4 | 6  | 9 | 7 |
| 7         | 7          | 2          | 10 | 8  | 1 | 3 | 5 | 4 | 6  | 9 | 7 |
| 8         | 8          | 2          | 10 | 8  | 1 | 3 | 5 | 4 | 6  | 9 | 7 |
| 9         | 9          | 2          | 10 | 8  | 1 | 3 | 5 | 4 | 6  | 9 | 7 |
| 10        | 10         | 5          | 10 | 4  | 1 | 6 | 8 | 9 | 3  | 2 | 7 |
| 11        | 11         | 5          | 10 | 4  | 1 | 2 | 8 | 3 | 6  | 9 | 7 |
| 12        | 12         | 3          | 5  | 10 | 1 | 2 | 8 | 4 | 6  | 9 | 7 |
| 13        | 13         | 5          | 6  | 7  | 1 | 2 | 8 | 9 | 10 | 3 | 4 |
| 14        | 14         | 5          | 2  | 7  | 1 | 6 | 8 | 9 | 10 | 3 | 4 |
| 15        | 15         | 5          | 10 | 3  | 1 | 2 | 8 | 4 | 6  | 9 | 7 |

ตารางที่ 4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

| ปัญหาย่อย | สตริงคำตอบ | ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ |        |        |   |   |
|-----------|------------|----------------------|--------|--------|---|---|
|           |            | 1                    | 2      | 3      | 4 | 5 |
| 1         | 1          | 0.8633               | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 2         | 2          | 3.4433               | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 3         | 3          | 3.4433               | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 4         | 4          | 0.8633               | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 5         | 5          | 3.4433               | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 6         | 6          | 1.7867               | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 7         | 7          | 1.7867               | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 8         | 8          | 1.7867               | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 9         | 9          | 1.7867               | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 10        | 10         | 1.5233               | 0.0444 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 11        | 11         | 3.8533               | 0.0232 | 0.0238 | 1 | 1 |
| 12        | 12         | 1.7867               | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 13        | 13         | 0.8633               | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 14        | 14         | 0.8633               | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 15        | 15         | 1.2033               | 0.0443 | 0.0476 | 1 | 2 |

ตารางที่ 5 สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

| สตริงรุ่นลูก | ปัญหาย่อย | ลำดับสตริง |    |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--------------|-----------|------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1            | 1         | 6          | 10 | 8 | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | 9 | 7 |
| 2            | 2         | 2          | 10 | 8 | 1 | 3 | 5 | 9 | 4 | 6 | 7 |

ตารางที่ 6 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก

| สตริงรุ่นลูก | 1      | 2      | 3      | 4 | 5 |
|--------------|--------|--------|--------|---|---|
| 1            | 0.8633 | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 2            | 1.2033 | 0.0443 | 0.0476 | 1 | 2 |

ตารางที่ 7 ค่าสูงสุดต่ำสุดของสตริงคำตอบทั้งหมด

| ค่าสูงสุด/ต่ำสุด | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $ff_k^{max}$     | 3.8538 | 0.0456 | 0.0481 | 2.0005 | 2.0005 |
| $ff_k^{min}$     | 0.8638 | 0.0237 | 0.0243 | 0.0005 | 1.0005 |

ตารางที่ 8 ค่าเป้าหมายของสตริงคำตอบรุ่นลูก

| ค่าเป้าหมาย | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $z_k^*$     | 0.8638 | 0.0237 | 0.0243 | 0.0005 | 1.0005 |

ตารางที่ 9 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลังทำการนอร์มัลไลซ์

| สตริงคำตอบ    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1             | 0      | 0.9937 | 0.9958 | 0      | 0.9999 |
| 7             | 0.8628 | 0.0013 | 0      | 0.9999 | 0      |
| 8             | 0.8628 | 0.0013 | 0      | 0.9999 | 0      |
| 9             | 0.8628 | 0.0013 | 0      | 0.9999 | 0      |
| สตริงรุ่นลูก1 | 0      | 0.9937 | 0.9958 | 0      | 0.9999 |
| สตริงรุ่นลูก2 | 0.1137 | 0.9601 | 0.9956 | 0.4999 | 0.9999 |

ตารางที่ 10 ค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก

| สตริงคำตอบรุ่นลูก | 1 | 2 | 3 | 4 | 5      | $g(y \lambda_1, z^N)$ |
|-------------------|---|---|---|---|--------|-----------------------|
| 1                 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.4999 | 0.4999                |
| 2                 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.9999 | 0.9999                |

ตารางที่ 11 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลังจบเจเนอเรชันที่ 1

| ปัญหาย่อย | สตริง | 1      | 2      | 3      | 4 | 5 |
|-----------|-------|--------|--------|--------|---|---|
| 1         | 1     | 0.8633 | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 2         | 2     | 3.4433 | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 3         | 1.3   | 0.8633 | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 4         | 4     | 0.8633 | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 5         | 5     | 3.4433 | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 6         | 6     | 1.7867 | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 7         | 1.5   | 3.8533 | 0.0232 | 0.0238 | 1 | 1 |
| 8         | 8     | 1.7867 | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 9         | 1.7   | 0.8633 | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 10        | 10    | 1.5233 | 0.0444 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 11        | 1.8   | 1.7867 | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 12        | 1.9   | 1.5233 | 0.0444 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 13        | 13    | 0.8633 | 0.0451 | 0.0476 | 0 | 2 |
| 14        | 1.1   | 1.7867 | 0.0232 | 0.0238 | 2 | 1 |
| 15        | 1.11  | 1.2033 | 0.0443 | 0.0476 | 1 | 2 |

## 6. การทดลอง

### 6.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งปัญหาการทดลอง ออกเป็นปัญหาขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ รวมทั้งสิ้น 10 ปัญหา ซึ่งมีความแตกต่างกันของจำนวนคู่เที่ยวบิน ดังตารางที่ 12

### 6.2 การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากปัญหางานวิจัยมีข้อจำกัดที่หลากหลายแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมให้เหมาะสมในแต่ละปัญหา เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด โดยจะทดสอบพารามิเตอร์ของแต่ละปัญหาและแต่ละอัลกอริทึมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบ 2 พารามิเตอร์ พารามิเตอร์ละ 3 ระดับ และทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยที่พารามิเตอร์ของ MOEA/D ได้แก่ จำนวนสตริงข้างเคียง (Nb) และ จำนวนการแทนที่คำตอบ (Nr) ส่วนพารามิเตอร์ของ NSGAIII ได้แก่ อัตราการรอสโเวอร์ (Pc) และอัตราการมิวเทชัน (Pm) ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 12 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

| ปัญหาการทดลอง |       |     | ความยาวสตริง(คู่เที่ยวบิน) |
|---------------|-------|-----|----------------------------|
| เล็ก          | Set1  | S1  | 10                         |
|               | Set2  | S2  | 20                         |
|               | Set3  | S3  | 30                         |
|               | Set4  | S4  | 40                         |
| กลาง          | Set5  | S5  | 50                         |
|               | Set6  | S6  | 60                         |
|               | Set7  | S7  | 70                         |
|               | Set8  | S8  | 76                         |
| ใหญ่          | Set9  | S9  | 100                        |
|               | Set10 | S10 | 141                        |

ตารางที่ 13 การออกแบบการทดลอง

| อัลกอริทึม | พารามิเตอร์ | ระดับปัจจัย |     |
|------------|-------------|-------------|-----|
| MOEA/D     | Nb          | 2           | 5   |
|            | Nr          | 10          | 20  |
| NSGAIII    | Pc          | 0.1         | 0.4 |
|            | Pm          | 0.6         | 0.9 |

### 6.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม

ตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 6 ตัวชี้วัด คือ

1. การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (GD)
2. การลู่เข้าและความหลากหลายของกลุ่มคำตอบ (IGD)
3. การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread)
4. อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDs1)
5. อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (RNDs2)
6. เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

## 7. ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบอัลกอริทึม 2 ตัว ได้แก่ MOEA/D และ NSGAIII ด้วยวิธีการ 2-Sample t ในการทดสอบทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบคำตอบสุดท้ายที่หาได้จากแต่ละอัลกอริทึม ดังตารางที่ 14 ซึ่งจะพบว่า MOEA/D โดยรวมมีสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของกลุ่มคำตอบ (IGD) ด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDs1) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (RNDs2) และด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time) ดีกว่า NSGAIII ในปัญหาขนาดเล็กถึงกลาง ส่วนใน

ปัญหาขนาดใหญ่ยังไม่สรุปได้ว่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDs1) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (RNDs2) แต่

โดยรวมถือว่า MOEA/D มีสมรรถนะที่ดีกว่า NSGAIII ดังตารางที่ 17

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า MOEA/D มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาดีกว่า NSGAIII ในทุกด้านตั้งแต่ปัญหาขนาดเล็กถึงใหญ่

ตารางที่ 14 ผลการทดลอง

| Algorithm                                   | Parameter Set |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|---------------------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                             | S1            | S2           | S3           | S4           | M1           | M2           | M3           | M4           | L1           | L2           |
| <b>Generational Distance (GD)</b>           |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| MOEA/D                                      | 0.62          | <b>0.069</b> | <b>0.101</b> | <b>0.193</b> | <b>0.352</b> | <b>0.568</b> | <b>0.206</b> | <b>0.384</b> | <b>0.291</b> | <b>0.362</b> |
| NSGAIII                                     | <b>0.501</b>  | 0.111        | 0.432        | 0.855        | 1.005        | 0.635        | 1.307        | 1.074        | 0.963        | 0.43         |
| <b>Inverted Generational Distance (IGD)</b> |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| MOEA/D                                      | <b>0.257</b>  | <b>0.131</b> | <b>0.169</b> | <b>0.227</b> | <b>0.23</b>  | <b>0.553</b> | <b>0.185</b> | <b>0.289</b> | <b>0.219</b> | <b>0.249</b> |
| NSGAIII                                     | 0.759         | 0.177        | 1.46         | 1.332        | 0.805        | 1.103        | 0.935        | 0.851        | 0.761        | 0.515        |
| <b>Spread</b>                               |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| MOEA/D                                      | <b>0.032</b>  | <b>0.06</b>  | <b>0.01</b>  | <b>0.015</b> | <b>0.018</b> | <b>0.018</b> | <b>0.066</b> | <b>0.104</b> | <b>0.03</b>  | 0.073        |
| NSGAIII                                     | 0.043         | 0.071        | 0.068        | 0.054        | 0.122        | 0.078        | 0.106        | 0.134        | 0.143        | <b>0.024</b> |
| <b>RNDs1</b>                                |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| MOEA/D                                      | <b>0.332</b>  | <b>0.348</b> | <b>0.271</b> | <b>0.261</b> | <b>0.263</b> | <b>0.24</b>  | <b>0.229</b> | <b>0.098</b> | <b>0.145</b> | 0.049        |
| NSGAIII                                     | 0             | 0.055        | 0            | 0            | 0            | 0.099        | 0.057        | 0.057        | 0.068        | <b>0.126</b> |
| <b>RNDs2</b>                                |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| MOEA/D                                      | <b>0.277</b>  | <b>0.163</b> | <b>0.115</b> | <b>0.175</b> | <b>0.181</b> | <b>0.177</b> | <b>0.124</b> | <b>0.09</b>  | <b>0.095</b> | 0.043        |
| NSGAIII                                     | 0             | 0.011        | 0            | 0            | 0            | 0.006        | 0.017        | 0.004        | 0.016        | <b>0.064</b> |
| <b>CPU Time</b>                             |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| MOEA/D                                      | <b>877</b>    | <b>1490</b>  | <b>3950</b>  | <b>3115</b>  | <b>4018</b>  | <b>4148</b>  | <b>6145</b>  | <b>5355</b>  | <b>9112</b>  | <b>10873</b> |
| NSGAIII                                     | 894           | 1524         | 4705         | 3146         | 4033         | 4150         | 6164         | 5522         | 9205         | 10990        |

## 8. สรุป

งานวิจัยนี้เสนอการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ จัดเป็นปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ ซึ่งมีจำนวน 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่ เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด ปรับลดภาระงานให้เท่าเทียมกัน เส้นทางการบินสั้นน้อยที่สุด ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด และจำนวนค่านักบินน้อยที่สุด โดยเสนอวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) และวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (NSGA-III) ผลการวิจัยพบว่า MOEA/D มีสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของกลุ่มคำตอบ ด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ ดีกว่า NSGAIII

แนวทางการศึกษาในอนาคตอาจปรับเปลี่ยนวิธีการพัฒนาคำตอบของ MOEA/D เพื่อลดเวลาค้นหาคำตอบและมีคำตอบที่ดีขึ้น และเพื่อที่จะสามารถประยุกต์ใช้ได้ใกล้เคียงกับปัญหาจริงมากที่สุดอาจจะนำปัญหาด้านนโยบายของสายการบินมาร่วมพิจารณาด้วย

## 9. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. He and G. G. Yen, "Many-Objective Evolutionary Algorithm: Objective Space Reduction and Diversity Improvement," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 20, no.1 pp. 145-160, 2016.
- [2] Q. Zhang and H. Li MOEA/D: "A Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 11, no.6, pp. 712-731, 2007.
- [3] D. Brockhoff and E Zitzler, "Objective reduction in evolutionary multi- objective optimization: Theory and applications," *Evolutionary computation*, vol. 17, no.2, pp. 135-166, 2009.
- [4] M. Deveci and N. C. Demirel, "Evolutionary algorithms for solving the airline crew pairing problem. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 115, pp. 389-406, 2018.
- [5] K. Arayikanon and P. Chutima, "Solving cockpit crew scheduling problem of a low-cost airline using metaheuristics," *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2044, no.1.
- [6] Wattanapornprom, W., Olanvithchai, P., Chutima, P., & Chongstitvatana, P. (2009, May). Multi- objective combinatorial optimisation with coincidence algorithm. In *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation* (pp. 1675-1682). IEEE.

## สมการออกแบบสำหรับค่าเกนของตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์ไม่อุดมคติ ที่ใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเฟสเดียว

### The Design Equation for Gains of Non-ideal Proportional-Resonant Controller used in Control of Single-Phase Grid-Connected Inverter

เจษฎา พันธุ์ออน วิโรจน์ แสงธงทอง\*

นักศึกษาปริญญาโทและอาจารย์ กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC)

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Jessada Pan-on Wirote Sangtungthong\*

Master student, Lecturer, Power electronics Energy Machines and Control research group,  
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000

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

(Received: October 21, 2019; Accepted: March 9, 2020)

#### บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงสมการออกแบบที่คำนวณค่าเกนของตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์ไม่อุดมคติหรือตัวควบคุมพีอาร์ไม่อุดมคติ ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเฟสเดียวมีตัวควบคุมพีอาร์ไม่อุดมคติที่ควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด ระบบควบคุมวงปิดดังกล่าวมีสมการคุณลักษณะที่นำมาใช้สร้างสมการออกแบบ การคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีอาร์จะต้องการโพลวงปิดที่เป็นจำนวนจริงลบสองค่าที่แตกต่างกันหรือเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ การพิจารณาทางเดินรากจะใช้ในการเลือกโพลวงปิดที่เป็นจำนวนจริงลบ และข้อมูลจำเพาะของผลตอบสนองในสถานะชั่วครู่จะกำหนดโพลวงปิดที่เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อน ตัวควบคุมพีอาร์จะต้องมีค่าเกนที่ทำให้ระบบควบคุมวงปิดมีเสถียรภาพ ผลการจำลองสถานการณ์จะเปรียบเทียบผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริดในสถานะชั่วครู่ที่เกิดจากการใช้สมการออกแบบคำนวณค่าเกนของตัวควบคุม และการทดลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวจะให้ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริดที่ติดตามกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นสมการออกแบบที่นำเสนอคือทางเลือกหนึ่งที่ใช้ปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมพีอาร์ในทางปฏิบัติ

**คำสำคัญ:** อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเฟสเดียว ตัวควบคุมพีอาร์ไม่อุดมคติ สมการออกแบบ

#### ABSTRACT

This paper provides the design equation evaluating the gains of non-ideal proportional plus resonant controller also known as non-ideal PR controller. The control system of single-phase grid-tied inverter typically embraces such a PR controller governing grid-current. The design equation is originated and developed from the characteristic equation of the closed-loop control system. Either two distinct negative real closed-loop poles or one complex-conjugate pair of closed-loop poles with negative real part are required for the PR gain computations of the design equation. Root-locus consideration will

place the two distinct negative real poles whilst specification of transient response will assign the one complex-conjugate pair of poles. The PR controller has to carry its gains so that the closed-loop system becomes stable. Simulation results compare transient responses of grid current derived from entering two different couples of closed-loop poles into the design equation and then allowing it to run. Grid-current response tracking its reference and synchronization between grid current and grid voltage in steady state are accomplished under experiments on the control system. Thus, the proposed design equation is an alternative way for tuning the gains of the PR controller in practice.

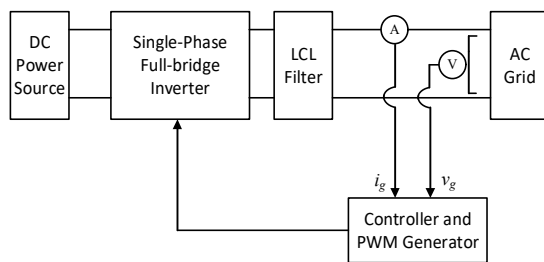
**Keyword:** Single-phase grid-connected inverter, non-ideal PR controller, design equation.

## 1. บทนำ

แหล่งผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยประกอบด้วย โรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ และเขื่อนพลังน้ำขนาดใหญ่ โรงไฟฟ้าที่นำพลังงานทดแทน พลังงานสะอาด และพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) มาผลิตไฟฟ้า แหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่กระจายในพื้นที่ต่าง ๆ (distributed generation) และแหล่งกักเก็บพลังงาน (energy storage) เริ่มมีบทบาทมากขึ้น แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนรูปมาจากพลังงานทดแทน พลังงานสะอาด และพลังงานหมุนเวียน จะแบ่งออกเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (แหล่งจ่ายเอซี) และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (แหล่งจ่ายดีซี) เมื่อแหล่งจ่ายดีซีป้อนกระแสไฟฟ้าเข้ากริดเอซี ระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างแหล่งจ่ายดีซีและกริดไฟฟ้าเอซีจะแปลงกระแสไฟฟ้าดีซีไปเป็นกระแสไฟฟ้าเอซี อินเวอร์เตอร์บังคับให้กริดเอซีดูดกลืนกำลังงานไฟฟ้า กล่าวคืออินเวอร์เตอร์บังคับให้กระแสไฟฟ้าเอซีที่ไหลเข้ากริดมีมุมเฟสตรงกับ (in-phase) มุมเฟสของแรงดันกริดเอซี หรือกระแสไฟฟ้ากริดซิงโครไนซ์ (synchronize) กับแรงดันกริด กำลังงานไฟฟ้าขณะหนึ่ง (instantaneous power) ที่เกิดขึ้นกับกริดจะมีค่าบวกตลอดเวลา และกริดมีตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง (unity power factor) กริดจึงได้รับกำลังงานจากแหล่งจ่ายดีซีตลอดเวลา ระบบควบคุมวงปิดของ

อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเฟสเดียวมีการวัดแรงดันกริด และการวัดกระแสไฟฟ้ากริด เช่น เซอร์วูดแรงดันกริดให้สัญญาณที่ใช้สร้างสัญญาณไซน์ ( $\sin(\omega_g t)$ ) ที่ซิงโครไนซ์กับแรงดันกริด เช่น เซอร์วูดกระแสไฟฟ้ากริดให้สัญญาณป้อนกลับ ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวประกอบด้วย [1] แหล่งจ่ายดีซี อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว (single-phase full-bridge inverter) หรือเฮชบริดจ์ (H-bridge) วงจรกรองแอลซีแอล (LCL filter) [2],[3] กริดไฟฟ้าเอซี (AC grid) และลูบควบคุมกระแสไฟฟ้าเอซีที่ไหลเข้ากริดหรือลูบควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่มีเฟสล็อกลูบ (PLL) ที่ประมาณค่าตำแหน่งเชิงมุม ( $\omega_g t$ ) ของแรงดันกริด [4] ลูบควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดมีตัวควบคุมพีอาร์ (PR controller) ถ้าแรงดันกริดมีความถี่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของตัวควบคุมพีอาร์และระบบควบคุมวงปิดมีเสถียรภาพ ตัวควบคุมพีอาร์จะชดเชยพลวัตของพลาเน็ตและหักล้างการรบกวนของแรงดันกริดเอซีได้อย่างสมบูรณ์ [4] ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ตัวควบคุมพีอาร์ที่มีค่าเกนแตกต่างกันจะให้ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริดที่มีสมรรถนะติดตามกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงได้แตกต่างกัน แต่การหักล้างแรงดันกริดแทบไม่เปลี่ยนแปลงในสถานะอยู่ตัว

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [5] ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มีตัวควบคุมพีอาร์จะให้ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากอินเวอร์เตอร์ที่ติดตามกระแสไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์

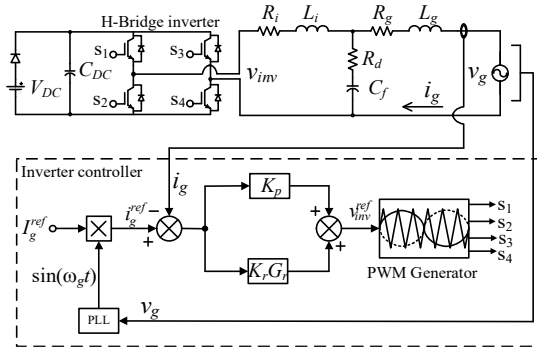
อ้างอิง ได้ดีกว่าการใช้งานตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีอาร์ ที่ใช้งานแบ่งออกเป็นตัวควบคุมพีอาร์อุดมคติและตัวควบคุมพีอาร์ไม่อุดมคติที่ควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด [6] เมื่อแรงดันกริดมีความถี่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของตัวควบคุมพีอาร์ ตัวควบคุมพีอาร์อุดมคติจะมีขนาด (peak) มากมายไม่จำกัด (infinity) และชดเชยพลวัตของพลาเน็ตและหักล้างการรบกวนได้มากที่สุด แต่ตัวควบคุมพีอาร์ไม่อุดมคติจะมีขนาดมากที่จำกัดค่าหนึ่ง (finite) และชดเชยพลวัตของพลาเน็ตและหักล้างการรบกวนได้ดี และเมื่อแรงดันกริดมีความถี่แตกต่างจากความถี่เรโซแนนซ์ ตัวควบคุมพีอาร์อุดมคติจะไม่มีขนาดและไม่สามารถชดเชยพลวัตของพลาเน็ตและหักล้างการรบกวน [7] แต่ตัวควบคุมพีอาร์ไม่อุดมคติจะยังคงมีขนาดมากและชดเชยพลวัตของพลาเน็ตและหักล้างการรบกวนได้ดีกว่า ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่มีตัวควบคุมพีอาร์ไม่อุดมคติและวงจรกรองแอลซีแอลที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างอินเวอร์เตอร์และกริดเอซี คือระบบอันดับสูงที่มีโพล 6 ตัว การปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมที่ทำให้ระบบควบคุมวงปิดมีเสถียรภาพจึงไม่สามารถดำเนินการได้อย่างลงมือลองถูก การใช้สูตรหรือสมการคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมและการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบควบคุมวงปิดอาจจะเป็นงานที่มีความสะดวกมากกว่า

## 2. ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกกริด

ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์มี 5 ส่วนที่สำคัญที่แสดงในรูปที่ 1 แต่ละส่วนคือแหล่งจ่ายดีซี อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียว วงจรกรองแอลซีแอล กริดไฟฟ้าเอซี และลูบควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่

เชื่อมต่อกกริดที่แสดงในรูปที่ 2 มีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันดีซีหรือแหล่งจ่ายดีซี วงจรกรองแอลซีแอลเชื่อมต่อกันกลางระหว่างกริดเอซีและด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ เมื่ออินเวอร์เตอร์มีแรงดันดีซีอินพุต ( $V_{DC}$ ) ที่มากกว่าค่ายอด (peak) ของแรงดันกริด ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์วงปิดจะสามารถบังคับให้กำลังงานไหลจากแหล่งจ่ายดีซีไปถึงกริดเอซีได้ และบังคับให้กระแสไฟฟ้ากริด ( $i_g$ ) มีมุมเฟสที่ตรงกับหรือใกล้เคียงกับมุมเฟสของแรงดันกริด ( $v_g$ ) ได้ ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกกริดที่พิจารณามีลูบควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดรูปเดียวที่มีตัวควบคุมพีอาร์อุดมคติหรือตัวควบคุมพีอาร์ไม่อุดมคติ ระบบควบคุมดังกล่าวให้ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริดที่ติดตามกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง

ในแผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่แสดงในรูปที่ 2 ตัวควบคุมพีอาร์จะนำมาใช้งานแทนที่ตัวควบคุมพีไอ เพราะตัวควบคุมพีไอที่ควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดต้องการการป้อนไปหน้าของแรงดันกริด ผลบวกระหว่างเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอและแรงดันกริดคือแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ แต่ตัวควบคุมพีอาร์มีเอาต์พุตคือแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ การวัดแรงดันกริดจะให้สัญญาณวัดที่นำมาใช้สร้างกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ( $i_g^{ref}$ ) ที่มีมุมเฟสตรงกับมุมเฟสของ  $v_g$  นั่นคือ  $i_g^{ref}$  ซิงโครไนซ์กับ  $v_g$  เฟสล็อกถูปรับได้รับสัญญาณวัดของแรงดันกริดและประมาณค่าตำแหน่งเชิงมุม ( $\omega_g t$ ) ของ  $v_g$  ต่อมาเฟสล็อกถูปรับสร้างสัญญาณไซน์ของตำแหน่งเชิงมุม ( $\omega_g t$ ) ของ  $v_g$  ( $\sin(\omega_g t)$ ) สัญญาณไซน์นี้มีค่ายอดหนึ่งหน่วยและมีมุมเฟสที่ตรงกับมุมเฟสของ  $v_g$  ผลคูณระหว่างค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ( $I_g^{ref}$ ) และ  $\sin(\omega_g t)$  คือ  $i_g^{ref}$  ( $i_g^{ref} = I_g^{ref} \sin(\omega_g t)$ ) ถ้าเฟสล็อกถูปรับได้รับ  $v_g$  ที่มีความเพี้ยน (distortion) เล็กน้อย เฟสล็อกถูปรับจะสร้าง  $\sin(\omega_g t)$  ที่ไม่มีความเพี้ยน ตัวควบคุมพีอาร์ไม่อุดมคติจะนำความผิดพลาดระหว่าง  $i_g^{ref}$  และ  $i_g$  ที่ได้จากการวัดมาสร้างแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $v_{inv}^{ref}$ ) ของการสวิตช์ของไอจีบีที 4 ตัว จะสร้างแรงดันเอซีที่ดับเบิ้ลยู



รูปที่ 2 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริด

เอม ( $v_{inv}$ ) เมื่อระบบควบคุมวงปิดมีเสถียรภาพ อินเวอร์เตอร์จะจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ทำให้  $i_g$  ซึ่งโครโนซ์กับ  $v_g$  กริดเอชจึงมีตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งและประพุดตัวเป็นโหลดตัวต้านทาน และกริดดูดกลืนกำลังงาน อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความเพี้ยนสูง วงจรกรองแอลซีแอลจะปรับสภาพกระแสไฟฟ้ากริดให้มีความเพี้ยนลดลงหรือมีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับไซน์ซวยด์

### 3. ตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์

ระบบควบคุมวงจรแปลงผันดีซีไปเป็นดีซี (DC-to-DC converter) มีตัวควบคุมพีโอที่อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (stationary frame) ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันดีซีและกระแสไฟฟ้าดีซี [6] แต่ระบบควบคุมวงปิดอื่นที่มีตัวควบคุมพีโอที่ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณเอช จะให้ผลตอบสนองที่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว การใช้ งานตัวควบคุมพ็อาร์แทนที่ตัวควบคุมพีโอ จะให้ผลตอบสนองที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าในสถานะอยู่ตัว ตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์หรือตัวควบคุมพ็อาร์ คือตัวควบคุมพีโอที่อยู่ในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronous frame) ที่หมุนด้วยความถี่เชิงมุม  $\omega_g$  การแปลงกรอบอ้างอิงซิงโครนัสมาเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ตัวควบคุมพีโอจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นตัวควบคุมพ็อาร์ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G_{pr}(s) = K_p + K_r G_r(s) \quad (1)$$

โดยที่  $K_p$  คือค่าเกนสัดส่วน และ  $K_r$  คือค่าเกนเรโซแนนซ์

ตัวควบคุมพ็อาร์อุดมคติมี  $G_r(s)$  ดังนี้

$$G_r(s) = \frac{2s}{s^2 + \omega_g^2} \quad (2)$$

โดยที่  $\omega_g$  คือความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อ  $s = j\omega_g$  ตัวควบคุมพ็อาร์อุดมคติจะมีขนาดมากมายไม่จำกัด

( $|G_{pr}(j\omega_g)| = +\infty$ ) ที่เป็นสาเหตุของการไม่มีเสถียรภาพ [6] การปรับปรุงตัวควบคุมพ็อาร์อุดมคติจะได้รับตัวควบคุมพ็อาร์ไม่อุดมคติที่มี  $G_r(s)$  ดังนี้

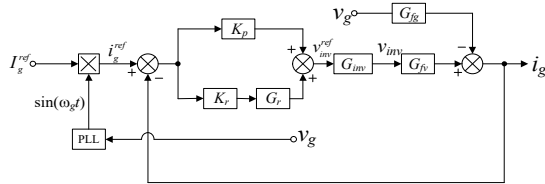
$$G_r(s) = \frac{2(\omega_c s + \omega_c^2)}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2 + \omega_g^2} \quad (3)$$

โดยที่  $\omega_c$  คือความถี่ตัด เมื่อ  $\omega_c \ll \omega_g$  จะได้ว่า [8]

$$G_r(s) = \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_g^2} \quad (4)$$

เมื่อ  $s = j\omega_g$  ตัวควบคุมพ็อาร์ไม่อุดมคติจะมีขนาดมากจำกัดค่าหนึ่ง ( $|G_{pr}(j\omega_g)| = K_p + K_r$ ) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมพีโอและตัวควบคุมพ็อาร์ ถ้า  $s = 0$  ตัวควบคุมพีโอจะมีขนาดมากมายไม่จำกัด เพราะตัวควบคุมพีโอมีโพลหนึ่งตัวอยู่บนจุดกำเนิดของระนาบเอช ตัวควบคุมพ็โอที่ควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด จึงต้องการการป้อนไปหน้าของแรงดันกริด แต่ตัวควบคุมพ็อาร์ไม่ต้องการการป้อนไปหน้าของแรงดันกริด เพราะตัวควบคุมพ็อาร์มีโพลคู่สังยุคเชิงซ้อนที่อยู่บนแกนจินตภาพหรืออยู่ใกล้กับแกนจินตภาพทางด้านซ้ายมือของระนาบเอช ถ้าแรงดันกริดมีความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์  $\omega_g$  ตัวควบคุมพ็อาร์มีค่าเกน  $K_r$  มากเพียงพอ และระบบควบคุมวงปิดมีเสถียรภาพ ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริดเอชจะไม่มีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ตัวควบคุมพ็อาร์อุดมคติมีความกว้างแถบ (bandwidth) แคบมาก และเมื่อความถี่ตัด  $\omega_c$  มีค่าเพิ่มขึ้น ตัวควบคุมพ็อาร์ไม่อุดมคติจะมีความกว้างแถบเพิ่มขึ้น

#### 4. สมการออกแบบที่คำนวณค่าเกนของตัวควบคุม สัดส่วนเรโซแนนซ์



รูปที่ 3 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์

พลาเน็ตประกอบด้วยวงจรกรองแอลซีแอลและอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม แรงดันกริดคือการรบกวน (disturbance) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอชหรือกระแสไฟฟ้ากริดคือเอาต์พุตของพลาเน็ต ตัวควบคุมพ็อดไม่อุดมคติต้องมีค่าเกนที่ทำให้ระบบควบคุมวงปิดมีโพลทุกตัวอยู่ในตำแหน่งทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส พลาเน็ตมีค่าพารามิเตอร์ทุกค่าที่ทราบตัวเลข แต่ตัวควบคุมพ็อดไม่อุดมคติมีค่าเกน  $K_p$  และ  $K_r$  ที่ไม่ทราบค่า ถ้าค่าเกนของตัวควบคุมคือคำตอบของระบบสมการที่มีสมการ 2 สมการและมีตัวแปร 2 ตัวแปร การคำนวณค่าเกน 2 ค่าพร้อมกันจะได้รับจากการหาคำตอบนี้ ระบบควบคุมวงปิดที่แสดงในรูปที่ 3 มีฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการคุณลักษณะที่ใช้สร้างระบบสมการดังกล่าว ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาเน็ตและฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมจะให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด อินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มมีฟังก์ชันถ่ายโอนที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่าง  $v_{inv}(s)$  และ  $v_{inv}^{ref}(s)$  [6] ดังนี้

$$G_{inv}(s) = \frac{1}{1.5Ts + 1} \quad (5)$$

โดยที่  $T$  คือคาบระยะเวลาการสุ่มของเฟสล็อกกลูปและตัวควบคุมพ็อด ( $T = 50 \mu s$ ) วงจรกรองแอลซีแอลมีฟังก์ชันถ่ายโอน 2 ฟังก์ชันดังนี้

$$G_{fv}(s) = \frac{b_0s + 1}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (6)$$

$$G_{fg}(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + 1}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (7)$$

โดยที่  $b_0 = C_f R_d$ ,  $b_1 = C_f(R_i + R_d)$ ,  $b_2 = C_f L_i$ ,  $a_0 = R_i + R_g$ ,  $a_3 = C_f L_i L_g$ ,  $a_1 = L_i + L_g + C_f R_i R_g + C_f R_i R_d + C_f R_d R_g$ , และ  $a_2 = C_f(R_i L_g + R_d L_g + R_g L_i + R_d L_i)$  ( $C_f = 1 \mu F$ ,  $R_d = 0.015 \Omega$ ,  $R_i = 0.2 \Omega$ ,  $L_i = 3 mH$ ,  $R_g = 0.1 \Omega$  และ  $L_g = 0.94 mH$ ) [9]  $G_{fv}(s)$  คือฟังก์ชันถ่ายโอนที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่าง  $i_g(s)$  และ  $v_{inv}(s)$  และ  $G_{fg}(s)$  คือฟังก์ชันถ่ายโอนที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่าง  $i_g(s)$  และ  $v_g(s)$  และตัวควบคุมพ็อดไม่อุดมคติที่ใช้กันมีฟังก์ชันถ่ายโอน

$$G_{pr}(s) = K_p + \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} \quad (8)$$

ตัวควบคุมมีความถี่ตัด  $\omega_c = 0.1 \text{ rad/s}$  ระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับเฟสเดียวคือระบบป้อนกลับหนึ่งหน่วย (unity feedback system) เมื่อพิจารณาแรงดันกริดเท่ากับศูนย์ ระบบควบคุมวงปิดดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่าง  $i_g(s)$  และ  $i_g^{ref}(s)$  ดังนี้

$$\frac{i_g(s)}{i_g^{ref}(s)} = \frac{(K_p + K_r G_r(s))G_{inv}(s)G_{fv}(s)}{1 + (K_p + K_r G_r(s))G_{inv}(s)G_{fv}(s)} \quad (9)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดมีสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิดหรือสมการคุณลักษณะวงปิด

$$1 + (K_p + K_r G_r(s))G_{inv}(s)G_{fv}(s) = 0 \quad (10)$$

$$K_p G_{inv}(s)G_{fv}(s) + K_r G_r(s)G_{inv}(s)G_{fv}(s) = -1 \quad (11)$$

ค่า  $s$  ที่ทำให้สมการคุณลักษณะวงปิดเป็นจริง คือโพลของระบบควบคุมวงปิดหรือโพลวงปิด กำหนดให้  $p_1$  และ  $p_2$  คือโพลวงปิดที่มีค่าแตกต่างกัน ( $p_1 \neq p_2$ ) และมี

ตำแหน่งอยู่ในด้านซ้ายมือของระนาบเอส ( $p_1 < 0$  และ  $p_2 < 0$ ) การแทนค่า  $s = p_1$  และ  $s = p_2$  ลงในสมการคุณลักษณะวงปิด จะได้รับสมการที่แตกต่างกัน 2 สมการที่มีตัวแปร  $K_p$  และ  $K_r$  ที่ไม่ทราบค่า 2 ตัวแปร

$$K_p G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) + K_r G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) = -1 \quad (12)$$

$$K_p G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) + K_r G_r(p_2)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) = -1 \quad (13)$$

สมการ 2 สมการนี้คือระบบสมการเชิงเส้นที่มีรูปแบบของสมการเวกเตอร์-เมทริกซ์หนึ่งสมการ

$$\begin{bmatrix} G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) & G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) \\ G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) & G_r(p_2)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_p \\ K_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

เมื่อพิจารณาจากกฎของคราเมอร์ (Cramer's rule) ตัวควบคุมพีดาร์ไม่อุดมคติมีค่าเกนที่เป็นคำตอบของระบบสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$K_p = \frac{G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) - G_r(p_2)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2)}{G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2)(G_r(p_2) - G_r(p_1))} \quad (15)$$

$$K_r = \frac{G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) - G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)}{G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2)(G_r(p_2) - G_r(p_1))} \quad (16)$$

สมการที่ใช้คำนวณคำตอบของระบบสมการเชิงเส้นดังกล่าวคือสมการออกแบบที่ใช้คำนวณค่าเกน  $K_p$  และ  $K_r$  ตัวควบคุมพีดาร์ไม่อุดมคติต้องมีค่าเกน  $K_p$  และ  $K_r$  ที่เป็นค่าบวก ถ้าโพลวงปิด  $p_1$  และ  $p_2$  คือจำนวนจริงลบที่มีค่าแตกต่างกัน  $G_r(p_1)$ ,  $G_{inv}(p_1)$ ,  $G_{fv}(p_1)$ ,  $G_r(p_2)$ ,  $G_{inv}(p_2)$  และ  $G_{fv}(p_2)$  จะเป็นจำนวนจริง

เมื่อ  $G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) > G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)$  เงื่อนไขที่ต้องการคือ

$$G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) > G_r(p_2)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) \quad \text{และ} \quad G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2)(G_r(p_2) - G_r(p_1)) > 0$$

และเมื่อ  $G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) < G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)$  เงื่อนไขที่ต้องการคือ

$$G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) < G_r(p_2)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) \quad \text{และ} \quad G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2)(G_r(p_2) - G_r(p_1)) < 0$$

ถ้าโพลวงปิด  $p_1$  และ  $p_2$  คือจำนวนเชิงซ้อนคู่สังยุค หรือโพลวงปิด  $p_1$  และ  $p_2$  คือคู่สังยุคเชิงซ้อน

( $p_2 = \bar{p}_1$ ) ที่มีส่วนจริงลบ ตัวควบคุมพีดาร์ไม่อุดมคติมีค่าเกนที่คำนวณได้ดังนี้

$$K_p = -\frac{\text{Im}(G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1))}{|G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)|^2 \text{Im}(G_r(p_1))} \quad (17)$$

$$K_r = \frac{\text{Im}(G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1))}{|G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)|^2 \text{Im}(G_r(p_1))} \quad (18)$$

สมการสองสมการนี้คือสมการออกแบบที่ใช้คำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีดาร์เช่นเดียวกัน ค่าเกน  $K_p$  และ  $K_r$  ต้องเป็นค่าบวก เมื่อ

$\text{Im}(G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)) > 0$  เงื่อนไขที่ต้องการคือ  $\text{Im}(G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)) < 0$  และ  $\text{Im}(G_r(p_1)) < 0$

และเมื่อ  $\text{Im}(G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)) < 0$  เงื่อนไขที่ต้องการคือ  $\text{Im}(G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)) > 0$  และ  $\text{Im}(G_r(p_1)) > 0$  การพิจารณาเงื่อนไขนี้ที่ทำให้ค่าเกน  $K_p$  และ  $K_r$  มีค่าบวก จะได้รับเงื่อนไขสองเงื่อนไขที่สมมูลกับเงื่อนไขดังกล่าวดังนี้

$$\frac{\text{Im}(G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1))}{\text{Im}(G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1))} < 0 \quad (19)$$

นั่นคือ

$$\frac{\text{Im}(G_r(p_1))}{\tan(\angle(G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)))} + \text{Re}(G_r(p_1)) < 0 \quad (20)$$

และ

$$\frac{\text{Im}(G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1))}{\text{Im}(G_r(p_1))} < 0 \quad (21)$$

นั่นคือ

$$\frac{\text{Im}(G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1))}{\tan(\angle G_r(p_1))} + \text{Re}(G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)) < 0 \quad (22)$$

## 5. การกำหนดโพลวงปิดที่นำมาคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์

ตัวควบคุมพีดาร์มีค่าเกนที่สัมพันธ์กับโพลวงปิด  $p_1$  และ  $p_2$  นั่นคือการสุ่มเลือกโพลวงปิดและการใช้สมการออกแบบอาจจะให้ค่าเกน  $K_p$  และ  $K_r$  ที่มีค่าบวกทั้งคู่หรือมีค่าลบทั้งคู่หรือมีค่าใดค่าหนึ่งเป็นค่าบวกและมีอีกค่าหนึ่งเป็นค่าลบ ถ้าโพล  $p_1$  และ  $p_2$  คือจำนวนจริงลบที่มีค่าแตกต่างกัน การพิจารณาทางเดินราก (root locus) ของโพลวงปิดจะนำมาใช้เป็นแนวทางในการเลือกโพล  $p_1$  และ  $p_2$  เพราะการเปลี่ยนแปลงค่าเกนของตัวควบคุมจะสร้างทางเดินรากของโพลวงปิด เนื่องจากตัวควบคุมพีดาร์ไม่อุดมคติมีค่าเกน 2 ค่าและค่าเกน  $K_r$  ต้องมีค่ามากเพียงพอการกำหนดให้  $K_p$  มีค่าคงที่และ  $K_r$  มีค่าเปลี่ยนแปลง จะได้รับสมการคุณลักษณะวงปิดที่ใช้สร้างทางเดินรากในระนาบเอสที่แสดงในรูปที่ 4 ดังนี้

$$1 + K_r \frac{s(d_2s + d_1)}{c_6s^6 + c_5s^5 + c_4s^4 + c_3s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0} = 0 \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } c_6 &= 1.5a_3T, \\ c_5 &= a_3(3T\omega_c + 1) + 1.5a_2T, \\ c_4 &= a_3(1.5T\omega_g^2 + 2\omega_c) + a_2(3T\omega_c + 1) + 1.5a_1T, \\ c_3 &= a_3\omega_g^2 + a_2(1.5T\omega_g^2 + 2\omega_c) \\ &\quad + a_1(3T\omega_c + 1) + 1.5a_0T + K_p b_0, \\ c_2 &= a_2\omega_g^2 + a_1(1.5T\omega_g^2 + 2\omega_c) \\ &\quad + a_0(3T\omega_c + 1) + K_p(2\omega_c b_0 + 1), \\ c_1 &= a_1\omega_g^2 + a_0(1.5T\omega_g^2 + 2\omega_c) \\ &\quad + K_p(b_0\omega_g^2 + 2\omega_c), \\ c_0 &= \omega_g^2(a_0 + K_p), \\ d_2 &= 2\omega_c b_0 \text{ และ } d_1 = 2\omega_c \end{aligned}$$

ทางเดินรากมีจุดสิ้นสุดสองจุดที่แตกต่างกันอยู่บนแกนจริงในระนาบเอส จุดสิ้นสุดจุดหนึ่งอยู่ที่  $s = 0$  และจุดสิ้นสุดอีกจุดหนึ่งอยู่ในตำแหน่ง

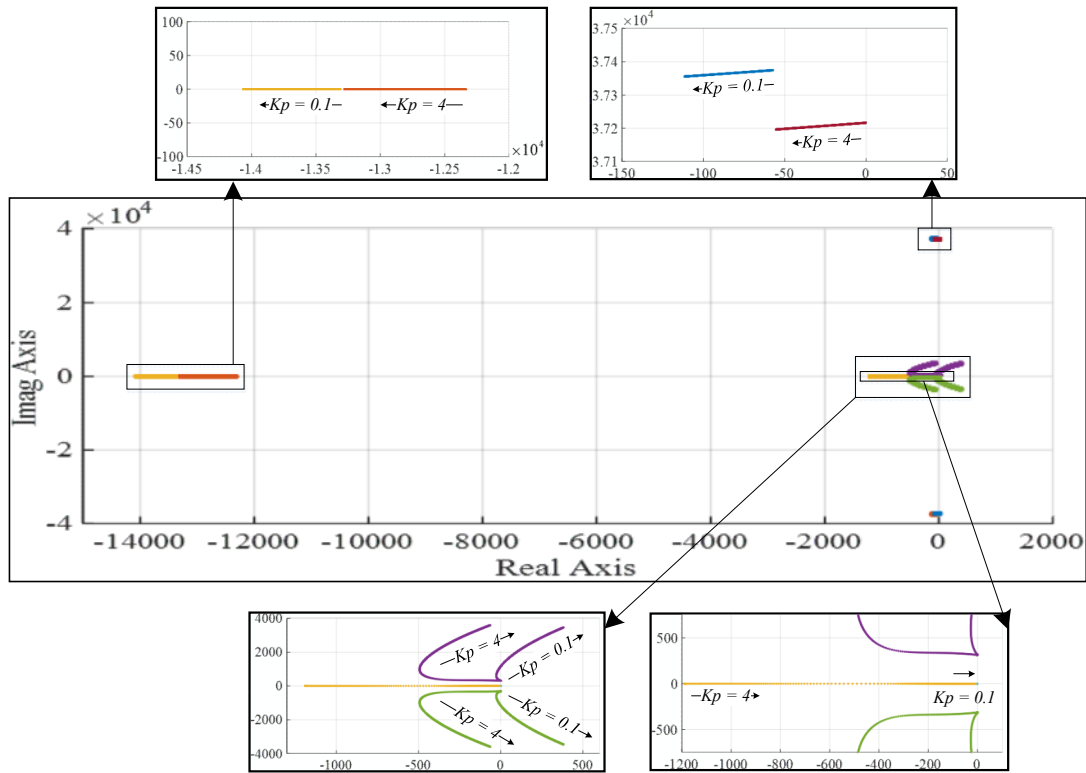
$$s = -\frac{d_1}{d_2} = -\frac{1}{b_0} = -\frac{1}{C_r R_d} = -6.67 \times 10^7 \text{ ทางด้าน}$$

ซ้ายมือของระนาบเอส เมื่อ  $K_p$  มีค่าบวกคงที่และ  $K_r$  มีค่าเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ถึงค่าบวกที่มากเพียงพอค่าหนึ่ง ถ้าทางเดินรากมีจุดเริ่มต้นทุกจุดอยู่ในตำแหน่งทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส และแกนจริงในระนาบเอสมีจุดเริ่มต้นสองจุดหรือสี่จุดหรือหกจุด และมีจุดเริ่มต้นอย่างน้อยสองจุดที่แตกต่างกัน และทางเดินรากมีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดที่แตกต่างกัน โพล  $p_1$  และ  $p_2$  จะเป็นส่วนหนึ่งของทางเดินรากที่อยู่บนแกนจริง ถ้า

$K_p = 0.1$  และ  $K_p = 4$  ทางเดินรากจะมีจุดเริ่มต้นทุกจุดอยู่ในตำแหน่งทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส เมื่อ  $K_p = 0.1$  ทางเดินรากมีจุดเริ่มต้นที่อยู่บนแกนจริงคือ  $s = -1.02 \times 10^2$  และ  $s = -1.33 \times 10^4$  และเมื่อ  $K_p = 4$  ทางเดินรากมีจุดเริ่มต้นที่อยู่บนแกนจริงคือ  $s = -1.19 \times 10^3$  และ  $s = -1.23 \times 10^4$  ค่าเกน  $K_r$  ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 250000 จะเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโพลวงปิด 6 โพลและได้รับทางเดินราก 6 เส้นในระนาบเอส ทางเดินรากที่อยู่บนแกนจริงมีสองส่วนที่แยกออกจากกัน ส่วนแรกอยู่ใกล้กับแกนจินตภาพและส่วนที่สองอยู่ห่างจากแกนจินตภาพ การพิจารณาทางเดินรากสองส่วนนี้ที่แสดงในรูปที่ 4 จะนำมาใช้ในการเลือกโพลวงปิด  $p_1 = -27$  ที่อยู่ใกล้กับแกนจินตภาพและ  $p_2 = -13250$  ที่อยู่ห่างจากแกนจินตภาพ โพลวงปิดสองโพลนี้อยู่บนทางเดินราก

$$\begin{aligned} \text{เนื่องจาก } G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) &= 5.1752, \\ G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) &= -2.7406, \\ G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) &= -2.8109 \times 10^{-4}, \\ G_r(p_2)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) &= 4.1345 \times 10^{-5} \text{ และ} \\ G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2)(G_r(p_2) - G_r(p_1)) &= -5.564 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า } G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) &< G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1), \\ G_r(p_1)G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1) &< G_r(p_2)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2) \text{ และ} \\ G_{inv}(p_1)G_{fv}(p_1)G_{inv}(p_2)G_{fv}(p_2)(G_r(p_2) - G_r(p_1)) &< 0 \end{aligned}$$



รูปที่ 4 ทางเดินรากของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเฟสเดียว

นั่นคือตัวควบคุมมีค่าเกน  $K_p$  และ  $K_r$  ที่เป็นค่าบวก

หลังจากการแทนค่าโพลวงปิด  $p_1 = -27$  และ  $p_2 = -13250$  ลงในสมการที่ (15) และ (16) สมการออกแบบจะคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีดาร์ไม่อัตโนมัติ  $K_p = 0.5795$  และ  $K_r = 14227$  การแทนค่าเกนของตัวควบคุมลงในสมการคุณลักษณะวงปิดและการหารากของสมการคุณลักษณะจะนำมาใช้ตรวจสอบตำแหน่งของโพลวงปิดทุกตัวในระนาบเอส หลังจากการแทนค่าเกนของตัวควบคุมลงในสมการที่ (10) และฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดในสมการที่ (9) ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์วงปิดมีโพล  $p_1 = -27$ ,  $p_2 = -13250$ ,  $p_{3,4} = -72 \pm j904$  และ  $p_{5,6} = -54 \pm j37354$  และมีซีโร  $z_1 = -20.18$ ,  $z_2 = -4890$  และ  $z_3 = -6.67 \times 10^7$  ระบบควบคุมวงปิดที่มีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อนเด่นและหรือซีโรที่ไม่หักล้างโพล จะให้ผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกิน (overshoot) และหรือมีการพุ่งต่ำ (undershoot)

ถ้าโพลวงปิด  $p_1$  และ  $p_2$  คือคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน

( $p_2 = \bar{p}_1$ ) ที่มีส่วนจริงลบ ( $\text{Re}(p_1) < 0$ ) การพุ่งเกินและเวลาเข้าที่ (settling time) ของผลตอบสนองในโดเมนเวลา จะนำมาใช้ในการกำหนดโพลวงปิด  $p_1$  และ  $p_2$  เมื่อความต้องการระบุถึงผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกิน 125% และมีเวลาเข้าที่ 0.11 วินาที โพลวงปิดสองโพลคือ  $p_{1,2} = -36.36 \pm j512$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (20) จะได้ว่า

$$\frac{\text{Im}(G_r(p_1))}{\tan(\angle(G_{inv}(p_1)G_{fs}(p_1)))} + \text{Re}(G_r(p_1)) = -7.0987 \times 10^{-5}$$

$$\frac{\text{Im}(G_r(p_1))}{\tan(\angle(G_{inv}(p_1)G_{fs}(p_1)))} + \text{Re}(G_r(p_1)) < 0$$

และเมื่อพิจารณาสมการที่ (22) จะได้ว่า

$$\frac{\text{Im}(G_{inv}(p_1)G_{fs}(p_1))}{\tan(\angle G_r(p_1))} + \text{Re}(G_{inv}(p_1)G_{fs}(p_1)) = -0.0576$$

$$\frac{\text{Im}(G_{inv}(p_1)G_{fs}(p_1))}{\tan(\angle G_r(p_1))} + \text{Re}(G_{inv}(p_1)G_{fs}(p_1)) < 0$$

นั่นคือตัวควบคุมมีค่าเกน  $K_p$  และ  $K_r$  ที่เป็นค่าบวก

หลังจากการแทนค่าโพล  $p_1 = -36.36 + j512$  ลงในสมการที่ (17) และ (18) สมการออกแบบจะคำนวณค่าเกนของตัวควบคุมพีดาร์ไม้อุดมคติ  $K_p = 0.2349$  และ  $K_r = 3307.1$  การระบุถึงผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินสูงจะได้รับโพลวงปิดที่นำมาแทนค่าลงในสมการออกแบบและทำให้ตัวควบคุมมีค่าเกนบวกทุกค่า หลังจากการแทนค่าเกนลงในคุณลักษณะวงปิดและฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดในสมการที่ (9) ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์วงปิดมีโพล  $p_{1,2} = -36.36 \pm j511.9$ ,  $p_3 = -13291$ ,  $p_4 = -51.05$  และ  $p_{5,6} = -56.277 \pm j37369$  และมีซีโร  $z_1 = -35.49$ ,  $z_2 = -2780.44$  และ  $z_3 = -6.67 \times 10^7$  เนื่องจากระบบควบคุมวงปิดมีคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน  $p_{5,6}$  ที่เด่นกว่าคู่โพลสังยุคเชิงซ้อน  $p_{1,2}$  ระบบควบคุมอาจจะให้ผลตอบสนองที่มีการพุ่งเกินและหรือการพุ่งต่ำที่มากกว่าความต้องการ และเวลาเข้าที่ที่อาจจะยาวนานกว่าความต้องการ

## 6. ผลการจำลองสถานการณ์

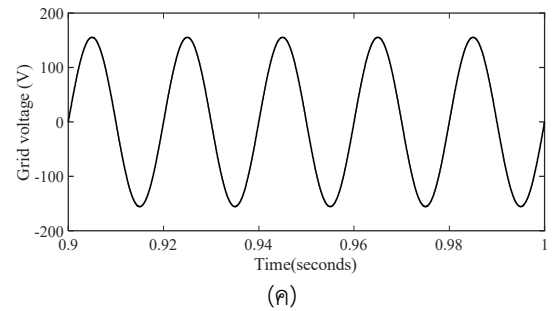
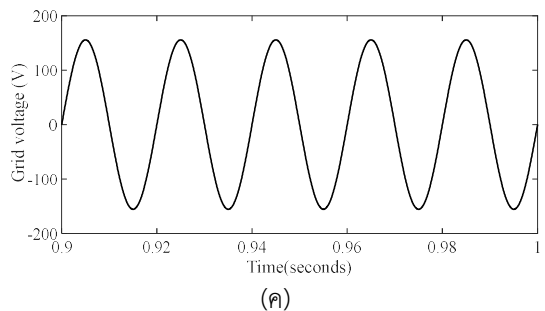
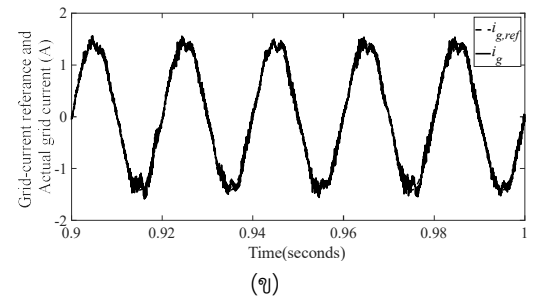
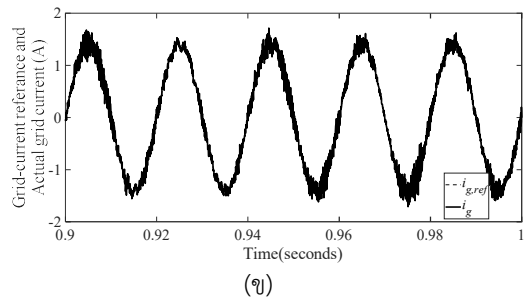
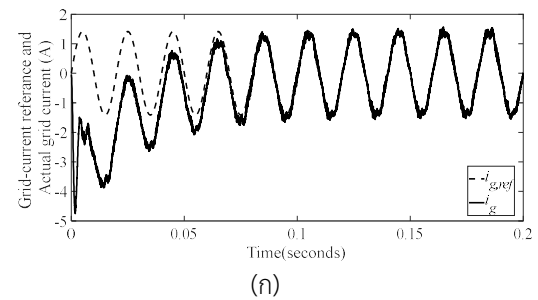
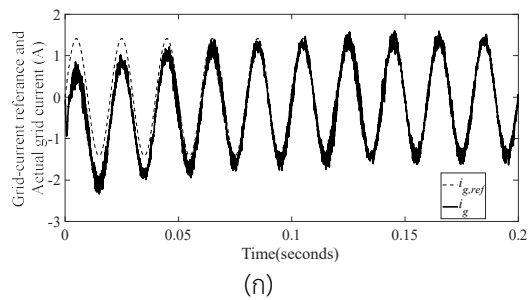
โปรแกรม MATLAB/Simulink จะนำมาใช้จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกิตที่แสดงในรูปที่ 2 การจำลองสถานการณ์มีขั้นตอนเวลาที่ (fixed step-size)  $1 \mu s$  และพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการสวิตช์ของไอจีบีที แหล่งจ่ายแรงดันดีซีมี  $V_{DC} = 280 V$  กริดเอชมีแรงดัน  $110 V_{rms}$  50 Hz และกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ( $i_{g,ref}$ ) (เส้นประ) มีค่าอาร์เอ็มเอส (RMS) 1 A ตัวควบคุมพีดาร์และเฟสล็อก ลูปมีคาบระยะเวลาการสุ่ม  $50 \mu s$  สัญญาณพาหะสามเหลี่ยมมีความถี่ 20 kHz เมื่อตัวควบคุมพีดาร์ไม้อุดมคติมีค่าเกน  $K_p = 0.5795$  และ  $K_r = 14227$  ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์วงปิดจะให้ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริด  $i_g$  (เส้นทึบ) ที่มีการพุ่งต่ำ  $-2.4 A$  โดยประมาณในสถานะชั่วคราว แต่เมื่อเวลาผ่านไป ผลตอบสนอง (actual grid current) จะมีความผิดพลาดลดลงและมีเวลาเข้าที่  $130 ms$  โดยประมาณที่แสดงในรูป

ที่ 5(ก) กระแสไฟฟ้ากริด  $i_g$  มีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับไซน์ชอยด์แต่มีการสั่นเล็กน้อย และมีค่าน้อยกว่า  $1.5 A$  โดยประมาณ เนื่องจากกระแสไฟฟ้ากริดมีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิง การสวิตช์ของไอจีบีทีจะเป็นสาเหตุให้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้ากริดมีการสั่นเล็กน้อย ผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ติดตามกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ( $i_{g,ref}$ ) (grid-current reference) ได้ดีในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5(ข) และกระแสไฟฟ้ากริดซิงโครไนซ์กับแรงดันกริดเอชที่แสดงในรูปที่ 5(ค) เมื่อตัวควบคุมพีดาร์ไม้อุดมคติมีค่าเกน  $K_p = 0.2349$  และ  $K_r = 3307.1$  ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์วงปิดจะให้ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริด  $i_g$  (เส้นทึบ) ที่มีการพุ่งต่ำมากกว่าในสถานะชั่วคราวที่แสดงในรูปที่ 6(ก) กระแสไฟฟ้ากริดมีการพุ่งต่ำ  $-4.9 A$  โดยประมาณและมีความผิดพลาดในสถานะชั่วคราวมากกว่า แต่เมื่อเวลาผ่านไป ผลตอบสนองจะมีความผิดพลาดลดลงและมีเวลาเข้าที่ที่สั้นกว่า ผลตอบสนองมีเวลาเข้าที่  $85 ms$  โดยประมาณ กระแสไฟฟ้ากริด  $i_g$  มีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับไซน์ชอยด์และมีการสั่นน้อยกว่า กระแสไฟฟ้ากริดมีค่าน้อยกว่า  $1.5 A$  โดยประมาณในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6(ข) ผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ติดตามกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ( $i_{g,ref}$ ) (เส้นประ) ได้ดีเช่นเดียวกัน และกระแสไฟฟ้ากริดซิงโครไนซ์กับแรงดันกริดเอชที่แสดงในรูปที่ 6(ค)

ในการจำลองสถานการณ์ ตัวควบคุมพีดาร์ไม้อุดมคติที่มีค่าเกน  $K_p = 0.5795$  และ  $K_r = 14227$  ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าในสถานะชั่วคราว

## 7. ผลการทดลอง

การทดลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกิตเอช มีค่าพารามิเตอร์ทุกค่าที่เป็นตัวเลขเดียวกับค่าพารามิเตอร์ที่ตรงกันทุกค่าที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่ใช้งานคือชุดทดลอง TIEVM-HV-1PH-DCAC (TIDM-HV-1PH-DCAC) ที่ผลิตจาก Texas Instruments ที่แสดงในรูปที่ 7 [9] ชุดทดลองนี้ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟส



รูปที่ 5 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มี  $K_p = 0.5795$  และ  $K_r = 14227$

(ก) กระแสไฟฟ้ากริดในสถานะชั่วคราว

(ข) กระแสไฟฟ้ากริดในสถานะอยู่ตัว

(ค) แรงดันกริดเอซี

รูปที่ 6 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มี  $K_p = 0.2349$  และ  $K_r = 3307.1$

(ก) กระแสไฟฟ้ากริดในสถานะชั่วคราว

(ข) กระแสไฟฟ้ากริดในสถานะอยู่ตัว

(ค) แรงดันกริดเอซี



รูปที่ 7 ชุดทดลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

เดียว วงจรกรองแอลซีแอล วงจรขับเกต เซนเซอร์วัดแรงดันกริด เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากริด วงจรปรับสภาพสัญญาณวัด และการดโมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28377D วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีและมีด้านเอาต์พุตเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุ จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันดีซีที่แสดงในรูปที่ 8 กริดเอซีคือหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน 110/220 V<sub>rms</sub> ที่มีขดลวดทุติยภูมิเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซี 220 V<sub>rms</sub> 50 Hz ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นเฟสล็อกกลูป ตัวควบคุมฟีดแบ็กไม่อุดมคติ หน่วย

สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ซับซ้อนของไอจีบีที และหน่วยบันทึก (data logger) กระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริด และแรงดันกริดที่ได้จากการวัด การเก็บและบันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำในแต่ละครั้ง จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ห่างกัน 0.5 ms

เมื่อตัวควบคุมพ็อร์ไม่อุดมคติมีค่าเกิน

$K_p = 0.5795$  และ  $K_r = 14227$  ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์จะให้ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริด  $i_g$  (เส้นทึบ) ที่ติดตามกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง ( $i_{g,ref}$ ) (เส้นประ) ได้ดีในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 9(ก) และกระแสไฟฟ้ากริดซึ่งโครโนซ์กับแรงดันกริดเอชี่ที่แสดงในรูปที่ 9(ข) อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังงานถึงกริดเอชี่กระแสไฟฟ้ากริดมีค่าอยู่ 1.5 A โดยประมาณ หน่วยบันทึกจะเก็บและรวบรวมผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 9 ออสซิลโลสโคปแสดงรูปคลื่นของแรงดันกริดและกระแสไฟฟ้ากริดในรูปที่ 10 การสั่นของรูปคลื่นจะเกิดจากสัญญาณรบกวนการวัด

เมื่อตัวควบคุมพ็อร์ไม่อุดมคติมีค่าเกิน

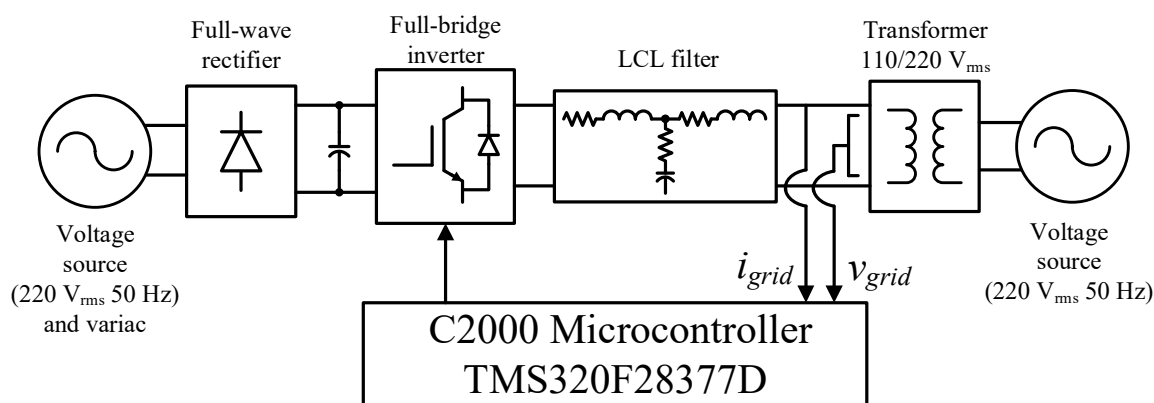
$K_p = 0.2349$  และ  $K_r = 3307.1$  ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริด (เส้นทึบ) ที่ติดตามกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง (เส้นประ) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 11(ก) กระแสไฟฟ้ากริดมีความผันมากกว่า และกระแสไฟฟ้ากริดซึ่งโครโนซ์กับแรงดันกริดเอชี่ที่แสดงในรูปที่ 11(ข) กระแสไฟฟ้ากริดมีค่าอยู่ 1.7

A โดยประมาณ หน่วยบันทึกจะเก็บและรวบรวมผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 11 ออสซิลโลสโคปแสดงรูปคลื่นของแรงดันกริดและกระแสไฟฟ้ากริดในรูปที่ 12 การสั่นของรูปคลื่นจะเกิดจากสัญญาณรบกวนการวัดเช่นเดียวกัน

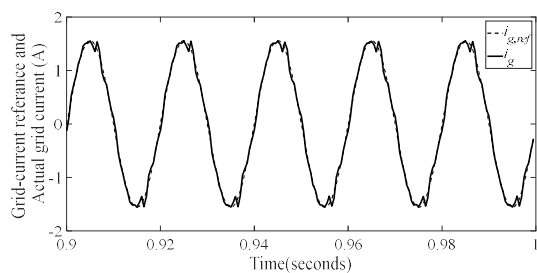
ในการทดลอง ตัวควบคุมพ็อร์ไม่อุดมคติที่มีค่าเกิน  $K_p = 0.5795$  และ  $K_r = 14227$  ให้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้ากริดที่มีความผันน้อยกว่าในสถานะอยู่ตัว

## 8. สรุป

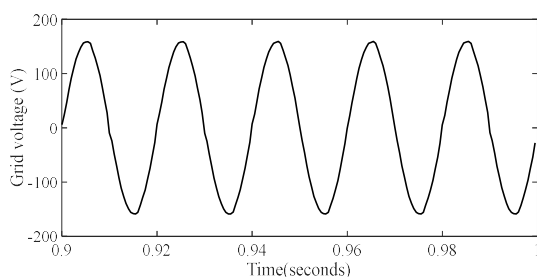
เนื่องจากระบบควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่มีตัวควบคุมพ็อร์ไม่อุดมคติและวงจรกรองแอลซีแอลซีที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างอินเวอร์เตอร์และกริดเอชี่คือระบบอันดับสูงที่มีโพลวงปิด 6 ตัว และตัวควบคุมพ็อร์ไม่อุดมคติมีค่าเกิน 2 ค่าที่ไม่ทราบค่า การกำหนดตำแหน่งของโพลวงปิด 6 ตัวที่แตกต่างกันพร้อมกันลงในด้านซ้ายมือของระนาบเอส จะได้รับระบบสมการเชิงเส้นที่มีสมการ 6 สมการที่แตกต่างกัน แต่มีตัวแปร 2 ตัวแปรที่เป็นค่าเกินของตัวควบคุมที่ไม่ทราบค่า ระบบสมการเชิงเส้นนี้อาจจะมีหรือไม่มีคำตอบ การกำหนดโพลวงปิด 6 ตัว ที่ทำให้ระบบสมการเชิงเส้นมีคำตอบที่เป็นจำนวนจริงบวกทั้งคู่ มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมาก การพิจารณาโพลวงปิด 2 ตัวที่แตกต่างกันและค่าเกิน 2 ค่าของตัวควบคุมพ็อร์ไม่อุดมคติ จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกันและสร้างสมการออกแบบที่ใช้คำนวณค่าเกินของตัวควบคุม



รูปที่ 8 แผนภาพทั้งหมดของชุดทดลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริดเอชี่



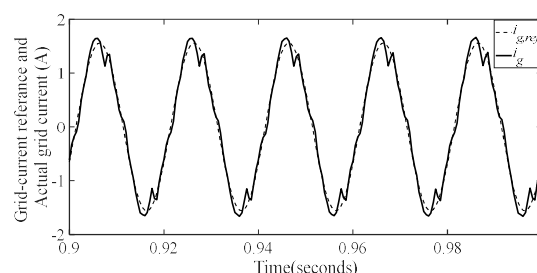
(ก)



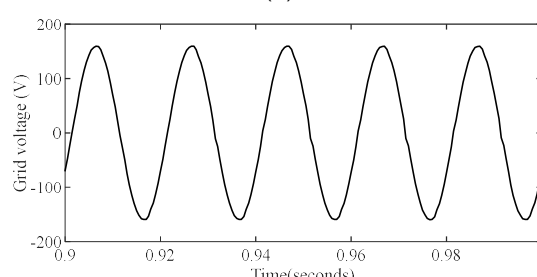
(ข)

รูปที่ 9 ผลการทดลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มี  $K_p = 0.5795$  และ  $K_r = 14227$

(ก) ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริดและกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง และ (ข) แรงดันกริดเอซี



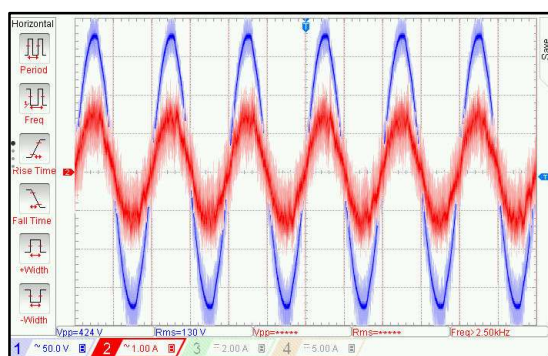
(ก)



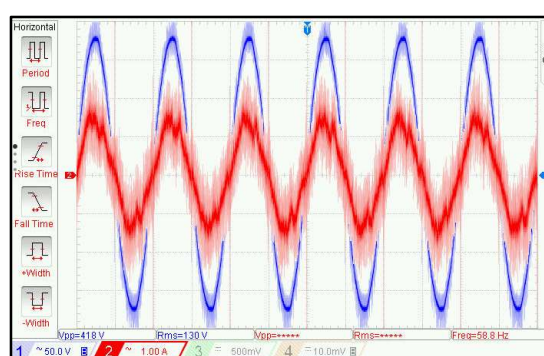
(ข)

รูปที่ 11 ผลการทดลองระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่มี  $K_p = 0.2349$  และ  $K_r = 3307.1$

(ก) ผลตอบสนองกระแสไฟฟ้ากริดและกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง และ (ข) แรงดันกริดเอซี



รูปที่ 10 แรงดันกริด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้ากริด (สีแดง) เมื่อ  $K_p = 0.5795$  และ  $K_r = 14227$



รูปที่ 12 แรงดันกริด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้ากริด (สีแดง) เมื่อ  $K_p = 0.2349$  และ  $K_r = 3307.1$

การเลือกโพลวงปิดสองโพลที่แตกต่างกันคือขั้นตอนที่สำคัญก่อนการใช้งานสมการออกแบบ ถ้าโพลวงปิดสองโพลนี้คือจำนวนจริงลบที่แตกต่างกัน ทางเดินรากจะนำมาใช้เป็นแนวทางในการเลือกโพลวงปิด และถ้าโพลวงปิดสองโพลนี้คือคู่สังยุคเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงลบ การพุ่งเกินและเวลาเข้าที่จะนำมาใช้ในการกำหนดโพลวงปิด

เงื่อนไขที่ทำให้ตัวควบคุมมีค่าเกินบวกจะต้องเกิดขึ้นและเป็นจริง และโพลทุกตัวของระบบควบคุมวงปิดที่อยู่ในตำแหน่งทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส จะต้องได้รับการตรวจสอบ การเลือกโพลวงปิดสองโพลอาจจะเป็นงานวนซ้ำมากกว่าเงื่อนไขของค่าเกินบวกเป็นจริงและระบบควบคุมวงปิดมีเสถียรภาพ การเขียนโปรแกรมงานวนซ้ำ

ดังกล่าวเป็นงานที่มีความสะดวกในทางปฏิบัติ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองยืนยันถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานสมการออกแบบคำนวณค่าเกณฑ์ตัวควบคุมฟีดแบ็กไม่อุดมคติ

## 9. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยและให้ใช้ประโยชน์จากสถานที่และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

## 10. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Escobar, M.J. Lopez-Sanchez, D.F. Balam-Tamayo, J.A. Alonzo-Chavarria and J.M. Sosa, “Inverter-side current control of a single-phase inverter grid connected through an LCL filter,” *IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 5552-5558, 2014.
- [2] Kahlane Abd El Wahid Hamza, Hassaine Linda and Larbes Cherif, “LCL Filter Design With Passive Damping For Photovoltaic Grid Connected Systems,” in *IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress*, pp. 1-4, 2015.
- [3] Xu Jinming and Xie Shaojun, “LCL-resonance damping strategies for grid-connected inverters with LCL filters : a comprehensive review,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 292-305, 2018.
- [4] Marco Liserre, Alberto Pigazo, Antonio Dell’Aquila and Víctor M. Moreno, “An Anti-Islanding Method for Single-Phase Inverters Based on a Grid Voltage Sensorless Control,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1418-1426, 2006.
- [5] D. Zammit, C. Spiteri Staines and M. Apap, “Comparison between PI and PR Current Controllers in Grid Connected PV Inverters,” *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, vol. 8, no. 2, pp. 221-226, 2014.
- [6] R. Teodorescu, M. Liserre and P. Rodríguez, *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [7] Adrian V. Timbus, Mihai Ciobotaru, Remus Teodorescu and Frede Blaabjerg, “Adaptive Resonant Controller for Grid- Connected Converters in Distributed Power Generation Systems,” in *Twenty- First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1601-1606, 2006.
- [8] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre and P.C. Loh, “Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters,” in *IEEE Proceedings- Electric Power Applications*, vol. 153, no. 5, pp. 750-762, 2006.
- [9] Manish Bhardwaj, *TIDM- HV- 1PH- DCAC Grid Connected Inverter Reference Design*, Texas Instruments Incorporated, 2017.

**การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกและประเมินผู้ให้บริการด้าน  
การจัดซื้อและผลิตเครื่องจักรด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์  
PRIORITIZATION OF FACTORS AFFECTING SELECTION AND EVALUATION  
SERVICE PROVIDERS IN MACHINE PROCUREMENT AND FABRICATION  
BY USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS**

ณัชชนม์ มณีธรรมวงศ์ ระพี กาญจนะ\*

ภาควิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110

Chanaichon Maneedhamwong Rapee Kanchana\*

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

Thanyaburi, Rangsit-Nakhonnayok Rd., Klong 6, Khlong Luang Pathum Thani, 12110

\*Corresponding author Email: chanaichon\_m@mail.rmutt.ac.th

(Received: December 24, 2019; Accepted: March 9, 2020)

**บทคัดย่อ**

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษากำหนดระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกและประเมินผู้ให้บริการด้านจัดซื้อและผลิตเครื่องจักร กรณีศึกษาสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ด้วยการใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเพื่อกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาคัดเลือกและประเมินผู้ให้บริการ จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องและผู้เชี่ยวชาญในอุตสาหกรรมการผลิต ปัจจัยที่นำมาใช้ในการตัดสินใจสามารถแบ่งได้เป็น 5 ด้าน ได้แก่ ด้านราคา ด้านความสามารถการผลิต ด้านการจัดส่ง ด้านคุณภาพและด้านเวลา และสามารถกำหนดปัจจัยรองทั้งสิ้น 20 ปัจจัย จากนั้นทำการออกแบบสอบถามตามหลักการของวิธีการวิเคราะห์ลำดับชั้นและเก็บข้อมูลโดยการสัมภาษณ์กลุ่มผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ราย และนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Expert Choice v.11 ผลการวิเคราะห์พบว่า ด้านเวลา (0.482) เป็นลำดับที่แรก ตามด้วย ด้านคุณภาพ (0.288) ด้านความสามารถการผลิต (0.136) ด้านราคา (0.062) และด้านการจัดส่ง (0.032) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาภาพรวมของทุกปัจจัยในระดับปัจจัยรอง ระดับความสำคัญใน 5 ลำดับแรกได้แก่ ด้านส่งมอบตรงเวลา (0.244) มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักระดับความสำคัญเป็นลำดับที่หนึ่ง ตามด้วยด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (0.178) ด้านเสนอราคา (0.115) ด้านเวลาการผลิต (0.106) และด้านความรู้ทางอุตสาหกรรม (0.065) ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** การคัดเลือกผู้ส่งมอบ การประเมินผู้ส่งมอบ ผู้ให้บริการ กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

**ABSTRACT**

The objectives of this study were to study and determine the importance level of factors related to the selection and evaluation service providers in machine procurement and fabrication by

applying analytic hierarchy process (AHP). The research methodology began with studying and collecting data to determine factors affecting the selection and evaluation service provider from related literatures and experts in manufacturing industry. Five main factors that were determined included price, production capability, delivery, quality and time. In addition, twenty minor factors were identified. Then, questionnaire was developed theoretically based on AHP principle. Data were collected from interviewing ten experts and then analyzed by using Expert Choice v.11. The results indicated that time ranked the first priority of importance (0.482) followed by quality (0.288), production capability (0.136), price (0.062) and delivery (0.032), respectively. For overall factors consideration at sub-factor level, the top five of sub-factors were on-time delivery (0.244) followed by product quality (0.178), price quotation (0.115), production time (0.106) and industrial knowledge and know-how (0.065), respectively.

**Keyword:** Supplier selection, Supplier evaluation, Service provider, Analytic hierarchy process (AHP)

## 1. บทนำ

การผลิตเป็นหัวใจสำคัญในการดำเนินธุรกิจทั้งอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น โดยเฉพาะผู้ประกอบการโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีและเครื่องจักรสำหรับการผลิตเพื่อความเร็ว สิ้นค้ามีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด รวมถึงลดผลกระทบต่อระบบการผลิตโดยรวมเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการในการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ให้บริการด้านการจัดซื้อและผลิตเครื่องจักรจึงมีบทบาทเพิ่มมากขึ้น การเลือกผู้ให้บริการที่มีศักยภาพตรงตามเงื่อนไขของผู้ประกอบการกำหนดนั้นทำได้ยากต่อการตัดสินใจเนื่องจากผู้ให้บริการด้านการจัดซื้อและการผลิตหลายรายได้มีการปรับปรุงพัฒนาระบบการบริหารจัดการให้ทันสมัยตรงตามเงื่อนไขความต้องการของผู้ประกอบการมากที่สุด ส่งผลให้ผู้ประกอบการโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มต้องทบทวนและพิจารณาการตัดสินใจเลือกผู้ให้บริการ เพื่อให้การจัดซื้อและการผลิตเครื่องจักรมีความเหมาะสมสอดคล้องกับความต้องการในระบบการผลิต และการใช้งานทั้งทางตรงและทางอ้อมให้มากที่สุด อย่างไรก็ตามบริษัทกรณีศึกษา

ของงานวิจัยนี้มีลักษณะการดำเนินธุรกิจให้บริการผลิตสั่งทำ จัดหาวัสดุและอะไหล่เครื่องจักรที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ดำเนินงานในส่วนของ การจัดซื้อจัดหา ผลิตเครื่องจักร และซ่อมบำรุง แต่ปราศจากการประเมินสมรรถนะโดยภาพรวมที่เป็นรูปแบบมาตรฐานของผู้ให้บริการในการจัดซื้อและผลิตเครื่องจักร จึงส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นในด้านคุณภาพ และการส่งมอบสินค้าที่ไม่ตรงตามคำสั่งซื้อให้แก่ลูกค้า ทำให้ขาดความเชื่อมั่นจากลูกค้าและเป็นผลให้ขีดความสามารถในการแข่งขันลดลง ดังนั้นการประเมินและการคัดเลือกผู้ให้บริการจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากกับบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งการกำหนดเกณฑ์ปัจจัยเพื่อการประเมินคัดเลือกผู้ให้บริการที่จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมาก เพื่อความสำเร็จและการวางแผนด้านกลยุทธ์ ที่ผ่านมามีการกล่าวถึงเกณฑ์การพิจารณาผู้ให้บริการเพื่อการจัดซื้อการผลิตและการส่งมอบที่มีศักยภาพ มีปัจจัยหลายด้านด้วยกันดังเช่น ด้านคุณภาพ ด้านการจัดส่ง ด้านราคา ด้านการผลิต ด้านเวลา [1]-[3] ซึ่งเกณฑ์ปัจจัยเหล่านี้เป็นเกณฑ์ปัจจัยหลักลำดับต้นๆ ที่มีความสำคัญและถูกนำมาใช้ในการพิจารณาประเมินเพื่อคัดเลือกผู้ให้บริการที่มีศักยภาพสูงสุด นอกจากนี้วิธีการที่วิเคราะห์ผลเป็นสิ่งที่

ที่สำคัญเช่นกันขึ้นอยู่กับข้อมูลที่น่าวิเคราะห์ มีหลาย ๆ วิธีการที่นำมาใช้ แต่วิธีการที่ได้รับความนิยมและให้ความแม่นยำเป็นวิธีการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchical Process : AHP) [4] เป็นเทคนิคที่ง่าย ยืดหยุ่นกว่าวิธีการวิเคราะห์อื่น ๆ สามารถแยกโครงสร้างที่ซับซ้อนออกมาเป็นส่วน ๆ โครงสร้างหรือรูปแบบการวิเคราะห์ที่เลียนแบบความคิดของมนุษย์ในการใช้เหตุผล สำหรับการแก้ปัญหา เหมาะสมสำหรับใช้เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลในการนำไปใช้ในกระบวนการการตัดสินใจที่เป็นกลุ่มและรายบุคคล [5] ซึ่งสามารถช่วยในการตัดสินใจได้ง่ายและแม่นยำในการคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบ

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาและกำหนดระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกและประเมินผู้ให้บริการด้านจัดซื้อและผลิตเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ลำดับชั้น เพื่อให้ได้เกณฑ์ปัจจัยที่มีความสำคัญสำหรับการประเมินและคัดเลือกผู้ส่งมอบที่มีศักยภาพสูงสุดตรงตามความต้องการ เพื่อการแข่งขันของผู้ประกอบการบริษัทกรณีศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

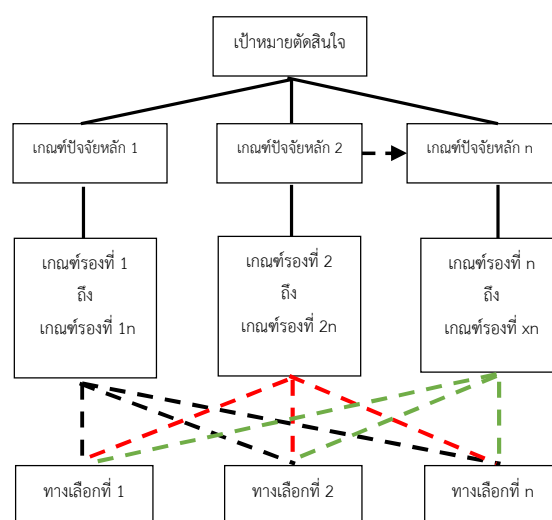
## 2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) เป็นกระบวนการตัดสินใจเพื่อการวินิจฉัยหาเหตุผล สำหรับการหาความสำคัญของเกณฑ์แต่ละเกณฑ์จากการเปรียบเทียบความสำคัญของแต่ละเกณฑ์แล้วสังเคราะห์ (Synthesis) ตัวเลขจากการวินิจฉัยนั้นเพื่อหาว่าเกณฑ์หรือทางเลือกใดที่มีลำดับค่าความสำคัญมากที่สุดและมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของการแก้ปัญหานั้น อีกทั้งเพื่อความถูกต้องวิธีการ AHP ยังได้กำหนดมาตรฐานความสอดคล้องขึ้นมา เพื่อวัดความมีเหตุผลของการวินิจฉัย เพื่อให้มั่นใจว่าการตัดสินใจนั้นมีเหตุผลที่ยอมรับได้ ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

#### 2.1.1 การแยกปัญหาและการสร้างแผนภูมิลำดับชั้น

การแยกปัญหาเริ่มต้นด้วยการระบุถึงองค์ประกอบหรือเกณฑ์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาแล้วก็จัดปัจจัยต่าง ๆ เหล่านั้น ให้เป็นหมวดหมู่ จากนั้นแบ่งกลุ่มของปัจจัยออกเป็นระดับชั้น และสร้างแผนภูมิลำดับชั้นด้วยการแบ่งลำดับออกเป็น หลายระดับชั้นขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหา และระดับชั้นแต่ละระดับจะประกอบด้วยกลุ่มของเกณฑ์ปัจจัยต่าง ๆ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างแผนภูมิโครงสร้างกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP)

#### 2.1.2 การจัดลำดับความสำคัญ

ขั้นตอนการจัดลำดับความสำคัญนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนย่อย คือ การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparisons) การคำนวณ ค่าน้ำหนัก (Weight Calculation) และการหาความสอดคล้องของเหตุผล (Consistency Check)

##### ขั้นตอนที่ 1 การเปรียบเทียบคู่

เมื่อสร้างลำดับชั้นแล้วขั้นต่อไปเป็นการเปรียบเทียบคู่ เพื่อหาความสำคัญเชิงเปรียบเทียบของส่วนย่อยต่าง ๆ ในแต่ละระดับชั้น ซึ่งจะวินิจฉัยเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ เป็นคู่ ๆ ในแต่ละระดับชั้นด้วย

การสร้างเมทริกซ์จัตุรัส  $n \times n$  โดยเริ่มจากระดับชั้นล่างสุดหรือระดับทางเลือกและจะสิ้นสุดที่ระดับของเกณฑ์หลัก เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของระดับความสำคัญในแต่ละเกณฑ์ และการประเมินระดับค่าน้ำหนักความสำคัญโดยใช้ตัวเลข 1 ถึง 9 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับความสำคัญ (Preference Level) [6]

| ระดับความสำคัญ        | ค่าแสดงเป็นตัวเลข |
|-----------------------|-------------------|
| เท่ากัน               | 1                 |
| เท่ากันถึงปานกลาง     | 2                 |
| ปานกลาง               | 3                 |
| ปานกลางถึงค่อนข้างมาก | 4                 |
| ค่อนข้างมาก           | 5                 |
| ค่อนข้างมากถึงมากกว่า | 6                 |
| มากกว่า               | 7                 |
| มากกว่าถึงมากที่สุด   | 8                 |
| มากที่สุด             | 9                 |

#### ขั้นตอนที่ 2 การหาค่าน้ำหนักเกณฑ์

การหาค่าน้ำหนักเกณฑ์เป็นการใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (Eigenvector) และค่าลักษณะเฉพาะที่มากที่สุด (Largest Eigenvalue) ของแต่ละเมทริกซ์เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะจะให้ลำดับความสำคัญ (ค่าน้ำหนัก) ส่วนค่าลักษณะเฉพาะสามารถนำมาใช้เป็น มาตรวัดตัวหนึ่งในการตรวจสอบความสอดคล้องของดุลยพินิจ วิธีคำนวณเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ และค่าลักษณะเฉพาะ สามารถศึกษาได้จากงานวิจัยของ Saaty (1990) หรือหาได้จากสมการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ในแต่ละขั้นตอนตามสมการที่ 1

$$A_{\omega} = \lambda_{\max} = n \quad (1)$$

เมื่อ A คือ สแควร์เมทริกซ์ระดับความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ แสดงด้วยค่าตัวเลขซึ่งปรับค่าให้เป็น 1 แล้ว

n = จำนวนปัจจัยที่ถูกนำมาเปรียบเทียบเป็นคู่ ๆ

$\omega$  คือ Eigenvector แสดงน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ซึ่งอยู่ในลำดับชั้นเดียวกันหรือกลุ่มของที่อยู่ภายใต้ลำดับชั้นที่สูงกว่า

$\lambda_{\max}$  คือ Maximum Eigenvector

ขั้นตอนที่ 3 การหาความสอดคล้องของเหตุผล

การหาความสอดคล้องของเหตุผลหรือดุลยพินิจนั้น เพื่อตรวจสอบผลการเปรียบเทียบที่ได้ ว่ามีความสอดคล้องกันของเหตุและผลหรือไม่ หากมีความสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ จะทำให้ค่า  $\lambda_{\max} = n$  โดยการหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: C.I.) สามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$C.I. = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (2)$$

เมื่อหาค่า C.I. แล้วจากนั้นเปิดตารางค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index: R.I.) โดยที่ค่า R.I. เป็นค่าที่ขึ้นกับขนาดของเมทริกซ์ดังตารางที่ 2 แล้วคำนวณค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: C.R.) จากสมการที่ 3

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (3)$$

ตารางที่ 2 ค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม

| Number of Criteria | Random Consistency Index : R.I. |
|--------------------|---------------------------------|
| 1                  | 0.00                            |
| 2                  | 0.00                            |
| 3                  | 0.58                            |
| 4                  | 0.90                            |
| 5                  | 1.12                            |
| 6                  | 1.24                            |
| 7                  | 1.32                            |
| 8                  | 1.41                            |
| 9                  | 1.45                            |
| 10                 | 1.49                            |
| 11                 | 1.51                            |
| 12                 | 1.54                            |
| 13                 | 1.56                            |
| 14                 | 1.57                            |
| 15                 | 1.59                            |

อัตราส่วนความสอดคล้องหากมีค่าเท่ากับศูนย์จะหมายความว่าชุดของ ดุลยพินิจนั้นมีความสอดคล้องกัน อย่างสมบูรณ์ หากอัตราส่วนความสอดคล้องมีค่าเท่ากับ 1 (หรือ 100%) หมายความว่า ความไม่สอดคล้องจะ เทียบเท่ากับดุลยพินิจที่ได้จากการสุ่ม ถ้าอัตราส่วนความ สอดคล้องมีค่ามาก (โดยทั่วไปค่าวิกฤตจะอยู่ที่ 0.1) แสดง ว่าดุลยพินิจนั้นไม่น่าเชื่อถือ ช่วงที่ยอมรับได้ของ C.R. ขึ้นอยู่กับขนาดของเมทริกซ์ ถ้าชุดดุลยพินิจของผู้ประเมิน ค่า C.R. เกินกว่าระดับที่กำหนด ผู้ประเมินควรจะ ต้อง ทบทวนดุลยพินิจ [7]

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบมีเกณฑ์ปัจจัยที่ หลากหลายขึ้นอยู่กับประเภทของธุรกิจแต่มีเกณฑ์ปัจจัยที่ สำคัญมีผลกระทบมากในการคัดเลือกและประเมินผู้ส่ง มอบโดย R. Ramlan และคณะ ได้กล่าวถึงการคัดเลือก และประเมินผู้ส่งมอบในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารใน ระดับ SMEs ด้วยเกณฑ์ปัจจัยหลาย ๆ ด้านสำหรับใช้ในการ คัดเลือกและประเมิน โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ AHP ซึ่งมีเกณฑ์ปัจจัยหลักที่เรียงตามความสำคัญ 5 ด้าน ประกอบด้วย ต้นทุน คุณภาพ การบริการ การจัดส่ง การ จัดการและองค์กร ตามลำดับนอกจากนี้มีเกณฑ์ปัจจัยรอง 5 ด้านที่จำเป็นต้องนำมาใช้ร่วมในการประเมิน ประกอบด้วย ต้นทุนการจัดซื้อ ผลการตรวจสอบ การ วิเคราะห์จุดบกพร่อง ต้นทุนการขนส่ง ความเร็วในการ ตอบสนอง ซึ่งเกณฑ์เหล่านี้จะสามารถปรับปรุง ความสามารถในการจัดหาผู้ส่งมอบให้ประสบความสำเร็จ ได้ [8] K. Mathiyazhagan และคณะ ได้คัดเลือกและ ประเมินผู้ส่งมอบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรม ยานยนต์โดยใช้เกณฑ์ปัจจัยหลัก 4 ด้าน ประกอบด้วย ด้านการจัดการ ด้านเทคโนโลยี ด้านกระบวนการผลิต และต้นทุน แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีการ AHP ซึ่งเกณฑ์ปัจจัย ด้านเทคโนโลยี เป็นเกณฑ์ปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่ ความสำเร็จในการประเมินผู้ส่งมอบ และด้านต้นทุน การ จัดการ และกระบวนการผลิต เป็นเกณฑ์ปัจจัยหลักที่ สำคัญรองลงมาตามลำดับ [9] และ S. Laksanasiri และ

คณะ ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ AHP สำหรับวิเคราะห์เกณฑ์ คัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบในธุรกิจยานยนต์ ซึ่งเกณฑ์ ปัจจัยที่เป็นกุญแจสำคัญสำหรับการตัดสินใจคัดเลือกผู้ส่ง มอบเป็นเกณฑ์ด้าน คุณภาพ ต้นทุน และการจัดส่ง [10] นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมการผลิตยังได้ใช้วิธีการ AHP ใน การวิเคราะห์เกณฑ์ปัจจัยหลาย ๆ ด้าน ซึ่งเกณฑ์ปัจจัย ด้าน คุณภาพ การจัดส่ง ราคา และเกณฑ์ที่เกี่ยวกับผู้ส่ง มอบ เป็น 4 เกณฑ์ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบในการ ประเมินผู้ส่งมอบอย่างมากสำหรับการคัดเลือกผู้ส่งมอบที่ มีศักยภาพ [11]

นอกจากนี้ ฌนัยชนม์ ฌณิธรรมวงษ์ และ ระพี กาญจนะ ได้รวบรวมปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการคัดเลือก และประเมินผู้ส่งมอบที่มีศักยภาพจากการทบทวน วรรณกรรม ของอุตสาหกรรม 3 กลุ่ม คือ อุตสาหกรรม ยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรม อาหารและเครื่องดื่ม มี 6 เกณฑ์ปัจจัยที่สำคัญตามลำดับ ประกอบด้วยปัจจัย ด้านคุณภาพ ด้านต้นทุน ด้านบริการ ด้านการจัดส่ง ด้านเวลาการจัดส่ง และด้านราคา เป็น เกณฑ์ที่ต้องใช้สำหรับพิจารณาให้แม่นยำสำหรับการ คัดเลือกประเมินผู้ส่งมอบ [3]

จากการทบทวนวรรณกรรมในการคัดเลือกและ ประเมินผู้ส่งมอบของหลายอุตสาหกรรมที่กล่าวมาพอสรุป ได้ว่าวิธีการ AHP เป็นวิธีการที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ ประเมินจัดลำดับเกณฑ์ที่สำคัญได้ดีด้วยวิธีดังกล่าวพบว่ามี เกณฑ์ปัจจัยที่สำคัญหลักประกอบด้วย ด้านคุณภาพ ด้าน ต้นทุน ด้านบริการ ด้านการจัดส่ง ด้านเทคโนโลยี และ ด้านการจัดการองค์กร ที่เป็นเกณฑ์ปัจจัยหลักที่ต้อง นำมาใช้ในการคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบ

## 3. วิธีการดำเนินงาน

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิธีการและเกณฑ์ปัจจัย สำหรับคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบของบริษัท ฌรณศึกษาด้วยเทคนิค AHP โดยมีลำดับการศึกษาดังนี้

### 3.1 ศึกษาข้อมูลปัญหาของบริษัทกรณีศึกษา

บริษัทกรณีศึกษาเมื่อมีการสั่งซื้อหรือสั่งผลิตสินค้าจากผู้ส่งมอบทุกครั้งจะไม่มีเปรียบเทียบราคาจากหลาย ๆ ที่ แต่จะอาศัยประสบการณ์การทำงานมาพิจารณาว่าผู้ส่งมอบรายใดสามารถผลิตสินค้านั้น ๆ ได้ และมีเพียงการจัดเก็บข้อมูลผู้ส่งมอบว่าสามารถผลิตสินค้าประเภทใดได้เท่านั้น โดยผู้ส่งมอบมีจำนวนทั้งสิ้น 10 ราย ซึ่งบริษัทกรณีศึกษาไม่มีการประเมินผลผู้ส่งมอบจึงประสบปัญหาเมื่อส่งสินค้าให้ลูกค้าในด้านส่งมอบไม่ทันเวลาที่กำหนด และปัญหาคุณภาพสินค้าไม่ตรงความต้องการของลูกค้า

### 3.2 การเลือกเครื่องมือในการคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบ

การเลือกเครื่องมือสำหรับการกำหนดระดับความสำคัญของเกณฑ์ปัจจัยในการคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบจากบริษัทกรณีศึกษาได้เลือกใช้เครื่องมือกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) เนื่องจากมีเกณฑ์ปัจจัยที่นำมาใช้ในการคัดเลือกและประเมินหลายเกณฑ์ดังนั้นก็จะเป็นกระบวนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Analysis: MCDA) เป็นวิธีการตัดสินใจซึ่งมีการคำนวณอย่างเป็นระบบจากพื้นฐานความต้องการโดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลจากหลายส่วน และมีจุด

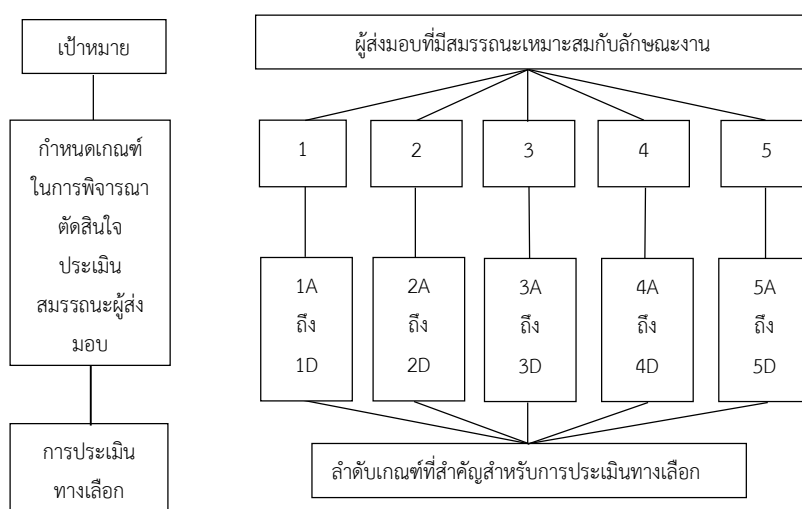
มุ่งหมายเพื่อหาคำตอบในการตัดสินใจที่เหมาะสมกับองค์กรที่สุด

### 3.3 การกำหนดโครงสร้างรูปแบบของปัญหา

การจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์การประเมินผู้ส่งมอบ โดยใช้กระบวนการ AHP ในการประเมินและคัดเลือกผู้ส่งมอบ โดยในการศึกษาวิจัยนี้จะดำเนินการศึกษาการจัดลำดับเกณฑ์ปัจจัยที่มีความสำคัญสำหรับการใช้ในการประเมินคัดเลือกผู้ส่งมอบจนได้เกณฑ์ที่สำคัญออกมา ซึ่งมีโครงสร้างตามหลักเกณฑ์ของกระบวนการ AHP ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยกำหนดเป้าหมายที่ผู้ส่งมอบที่มีสมรรถนะสอดคล้องกับบริษัทกรณีศึกษา จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการกำหนดเกณฑ์เพื่อการตัดสินใจและประเมินผู้ส่งมอบและขั้นสุดท้ายเป็นการจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์สำหรับการประเมินทางเลือก

### 3.4 ออกแบบขั้นตอนการประเมิน และคัดเลือกผู้ส่งมอบ

กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) เป็นกระบวนการ เพื่อใช้ในการพิจารณาตัดสินใจ ซึ่งเกิดจากการพิจารณาแบบเป็นเหตุเป็นผล ผ่านกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นของตัวเลขชี้วัด ตามขั้นตอนย่อยต่อไปนี้



รูปที่ 2 โครงสร้างหลักเกณฑ์ตามวิธี AHP ของบริษัทกรณีศึกษา

### 3.4.1 กำหนดเกณฑ์หรือปัจจัยในการตัดสินใจ

ศึกษารวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง กำหนดผู้เชี่ยวชาญและผู้ที่เกี่ยวข้องให้เหมาะสมกับรูปแบบการให้บริการของบริษัทกรณีศึกษาจากผู้ประกอบการธุรกิจลักษณะคล้ายบริษัทกรณีศึกษาจำนวน 3 คน และผู้เชี่ยวชาญจากประสบการณ์ทำงาน 7 คน เพื่อกำหนดเกณฑ์และการวินิจฉัยหาลำดับความสำคัญของเกณฑ์ต่าง ๆ ที่เป็นปัจจัยเกี่ยวข้องสำหรับใช้ประเมินสมรรถนะผู้ส่งมอบ เพื่อคัดเลือกผู้ส่งมอบที่มีคุณสมบัติเหมาะสม โดยสามารถกำหนดเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องทั้งเกณฑ์หลักและเกณฑ์รองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เกณฑ์ปัจจัยหลักและเกณฑ์ปัจจัยรองสำหรับการใช้ประเมินผู้ส่งมอบ

| เกณฑ์ปัจจัยหลัก        | เกณฑ์ปัจจัยรอง                  | สัญลักษณ์ |
|------------------------|---------------------------------|-----------|
| 1. ราคา                | 1.1 การควบคุมราคา               | 1A        |
|                        | 1.2 บริการก่อนการขาย            | 1B        |
|                        | 1.3 การควบคุมต้นทุน             | 1C        |
|                        | 1.4 การชำระเงิน                 | 1D        |
| 2. ความสามารถในการผลิต | 2.1 กำลังการผลิต                | 2A        |
|                        | 2.2 เทคนิคการผลิต               | 2B        |
|                        | 2.3 ความรู้ทางอุตสาหกรรม        | 2C        |
|                        | 2.4 เทคโนโลยี                   | 2D        |
| 3. การจัดส่ง           | 3.1 ขั้นตอนจัดส่ง               | 3A        |
|                        | 3.2 บรรจุภัณฑ์                  | 3B        |
|                        | 3.3 ความน่าเชื่อถือในการจัดส่ง  | 3C        |
|                        | 3.4 ช่องทางการจัดส่ง            | 3D        |
| 4. คุณภาพ              | 4.1 คุณภาพผลิตภัณฑ์             | 4A        |
|                        | 4.2 ความมุ่งมั่นต่อคุณภาพ       | 4B        |
|                        | 4.3 การสอบเทียบเครื่องมือวัด    | 4C        |
|                        | 4.4 ความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ | 4D        |
| 5. เวลา                | 5.1 การบริการหลังการขาย         | 5A        |
|                        | 5.2 เวลาการผลิต                 | 5B        |
|                        | 5.3 ส่งมอบตรงเวลา               | 5C        |
|                        | 5.4 เสนอราคา                    | 5D        |

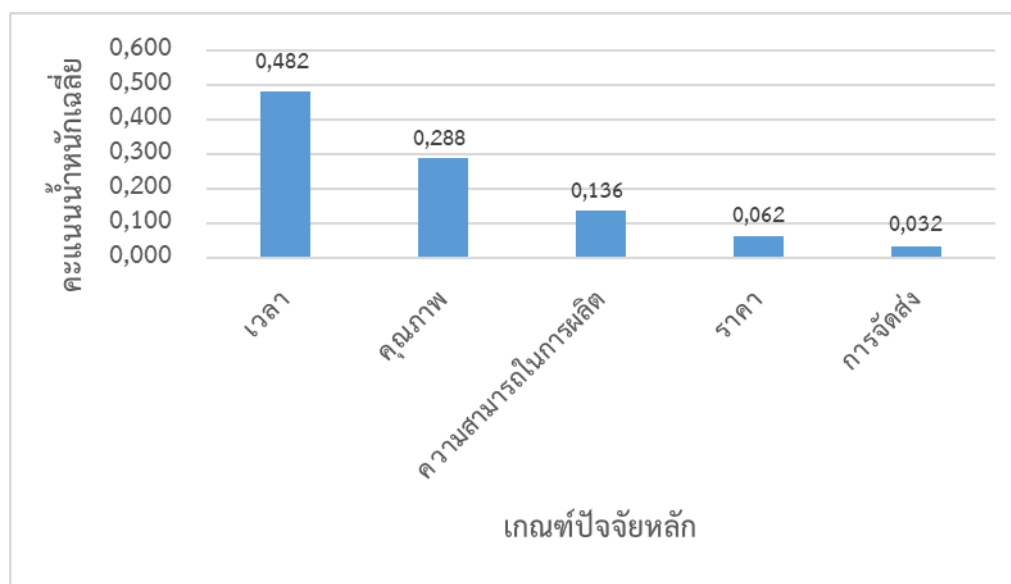
จากนั้นสร้างแบบสอบถามสำหรับผู้เชี่ยวชาญวินิจฉัยหาลำดับความสำคัญของเกณฑ์ต่าง ๆ แล้วจึงระบุถึงแนวทางในการปฏิบัติ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการตัดสินใจ โดยระบุตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการกำหนดทางเลือก การเก็บข้อมูลได้ดำเนินการสัมภาษณ์กลุ่มผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ราย จากข้อมูลดังกล่าวนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Expert Choice v.11 พิจารณาข้อมูลที่มีค่า C.R. น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.10 และจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์ในการคัดเลือกและประเมินเพื่อผู้ส่งมอบ เพื่อประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้กำหนดลำดับความสำคัญของตัวชี้วัดในระบบคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบ

## 4. ผลการการศึกษาและอภิปราย

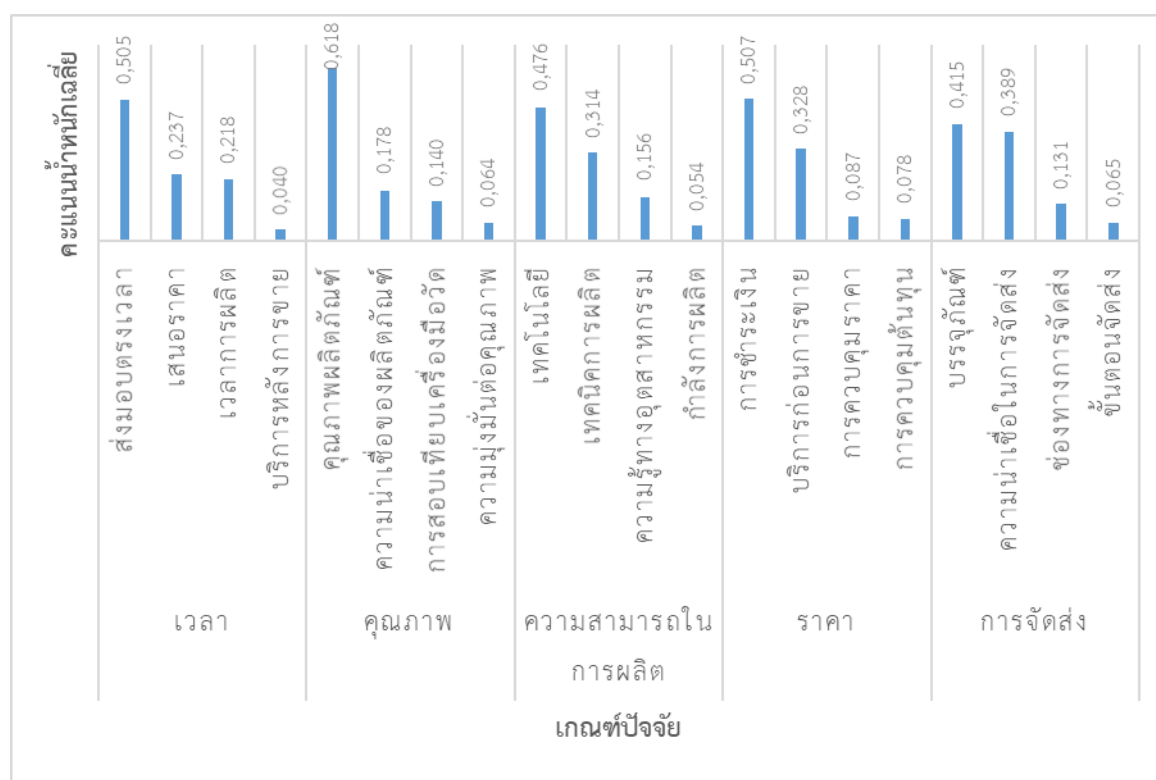
จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยรองสำหรับการตัดสินใจเลือกผู้ให้บริการของบริษัทกรณีศึกษาด้วยวิธีการ AHP พบว่า ผลจากการให้ค่าคะแนนน้ำหนักจากแบบสอบถามโดยผู้เชี่ยวชาญตามเกณฑ์ปัจจัยข้างต้นที่กำหนดเพื่อนำมาใช้ในการประเมินและคัดเลือกผู้ให้บริการด้านการจัดซื้อและผลิตเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ผู้เชี่ยวชาญได้ลำดับความสำคัญจากค่าคะแนนน้ำหนักเฉลี่ยของเกณฑ์ปัจจัยหลักทั้ง 5 ด้านและเกณฑ์ปัจจัยรอง 20 ด้าน แล้ววิเคราะห์เพื่อลำดับความสำคัญด้วยโปรแกรม Expert Choice V.11 ดังตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าการจัดลำดับความสำคัญของทั้งเกณฑ์ปัจจัยหลักและเกณฑ์ปัจจัยรองตามค่าระดับคะแนนความสำคัญเฉลี่ยของแต่ละเกณฑ์ไว้เมื่อตรวจสอบความสอดคล้องของปัจจัยตามสมการที่ 3 ซึ่งค่าความสอดคล้องกันของปัจจัย (Consistency Ratio: C.R.) จากทุกชุดข้อมูลมีค่าน้อยกว่า 0.10 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลมีค่าความสอดคล้องเป็นที่ยอมรับได้ และเกณฑ์ปัจจัยหลักมีค่าเฉลี่ยดังรูปที่ 3 โดยเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปหาน้อยดังนี้ ปัจจัยหลักด้านเวลาเป็นเกณฑ์ที่มีค่าคะแนนเฉลี่ยน้ำหนักสูงสุด (0.482) เป็นเกณฑ์หลักที่มีความสำคัญมากที่สุดเป็นลำดับแรก เนื่องจาก

ตารางที่ 4 ผลการวินิจฉัยคะแนนน้ำหนักเฉลี่ยความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง

| ปัจจัยหลัก            | คะแนน<br>เฉลี่ยปัจจัย<br>หลัก<br>(A) | ลำดับ<br>ความสำคัญ<br>ปัจจัยหลัก | ปัจจัยรอง                       | คะแนน<br>เฉลี่ย<br>ปัจจัยรอง<br>(B) | คะแนนปัจจัย<br>หลักและ<br>ปัจจัยรอง<br>(C = A x B) | ลำดับ<br>ความสำคัญ<br>ปัจจัยรอง |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------|
| ราคา                  | 0.062                                | 4                                | การควบคุมราคา                   | 0.087                               | 0.005                                              | 17                              |
|                       |                                      |                                  | บริการก่อนการขาย                | 0.328                               | 0.020                                              | 11                              |
|                       |                                      |                                  | การควบคุมต้นทุน                 | 0.078                               | 0.004                                              | 18                              |
|                       |                                      |                                  | การชำระเงินเครดิต               | 0.507                               | 0.031                                              | 9                               |
| ความสามารถ<br>การผลิต | 0.136                                | 3                                | กำลังการผลิต                    | 0.054                               | 0.007                                              | 16                              |
|                       |                                      |                                  | เทคนิคการผลิต                   | 0.314                               | 0.043                                              | 7                               |
|                       |                                      |                                  | เทคโนโลยี                       | 0.156                               | 0.021                                              | 10                              |
|                       |                                      |                                  | ความรู้ทาง<br>อุตสาหกรรม        | 0.476                               | 0.065                                              | 5                               |
|                       |                                      |                                  | ขั้นตอนจัดส่ง                   | 0.065                               | 0.002                                              | 20                              |
| การจัดส่ง             | 0.032                                | 5                                | บรรจุภัณฑ์                      | 0.415                               | 0.013                                              | 14                              |
|                       |                                      |                                  | ความน่าเชื่อถือในการ<br>จัดส่ง  | 0.389                               | 0.012                                              | 15                              |
|                       |                                      |                                  | ช่องทางการจัดส่ง                | 0.131                               | 0.004                                              | 19                              |
|                       |                                      |                                  | คุณภาพของ<br>ผลิตภัณฑ์          | 0.618                               | 0.178                                              | 2                               |
| คุณภาพ                | 0.288                                | 2                                | ความมุ่งมั่นต่อ<br>คุณภาพ       | 0.064                               | 0.019                                              | 13                              |
|                       |                                      |                                  | การสอบเทียบ<br>เครื่องมือวัด    | 0.140                               | 0.041                                              | 8                               |
|                       |                                      |                                  | ความน่าเชื่อถือของ<br>ผลิตภัณฑ์ | 0.178                               | 0.052                                              | 6                               |
|                       |                                      |                                  | การบริการหลังการ<br>ขาย         | 0.040                               | 0.020                                              | 11                              |
|                       |                                      |                                  | เวลาการผลิต                     | 0.218                               | 0.106                                              | 4                               |
| เวลา                  | 0.482                                | 1                                | ส่งมอบตรงเวลา                   | 0.505                               | 0.244                                              | 1                               |
|                       |                                      |                                  | เสนอราคา                        | 0.237                               | 0.115                                              | 3                               |



รูปที่ 3 ค่าคะแนนน้ำหนักเฉลี่ยของเกณฑ์ปัจจัยหลัก



รูปที่ 4 ระดับความสำคัญเกณฑ์ปัจจัยรองในแต่ละด้านของเกณฑ์ปัจจัยหลัก

ปัจจัยด้านเวลาเป็นสิ่งสำคัญที่ทางผู้ประกอบการมุ่งเน้น เพื่อจะสร้างประสิทธิภาพด้าน การแข่งขัน ความรวดเร็ว และความน่าเชื่อถือเมื่อผู้ให้บริการด้านการจัดซื้อและผลิตเครื่องจักรสามารถตอบสนองผู้ประกอบการได้ตรงตามระยะเวลาที่กำหนด รองลงมาเป็นเกณฑ์ปัจจัยด้านคุณภาพ (0.288) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้การผลิตสินค้ามีคุณภาพตามกำหนดหรือข้อตกลงจึงเป็นเกณฑ์ปัจจัยที่มีความสำคัญลำดับต้น ๆ สำหรับด้านความสามารถผลิต (0.136) ถือเป็นปัจจัยที่ทางผู้ให้บริการจะสามารถตอบสนองต่อการผลิตให้เป็นตามข้อกำหนดจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อผู้ประกอบการและผู้ให้บริการ ด้านราคา (0.062) เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนสินค้าจึงมีความสำคัญการควบคุมต้นทุนของผู้ประกอบการ และด้านการจัดส่ง (0.032) เป็นปัจจัยหลักที่ถูกจัดลำดับความสำคัญสุดท้ายจากการที่ผู้ประกอบการมองว่าการจัดส่งเป็นส่วนลำดับท้ายกระบวนการหลังการผลิตและมีรูปแบบการบรรจุและจัดส่งที่เหมาะสมกับลักษณะของสินค้า สำหรับเกณฑ์ปัจจัยรอง 20 ด้านนั้น เมื่อพิจารณา ค่าเฉลี่ยน้ำหนักระดับความสำคัญของปัจจัยรองของแต่ละเกณฑ์ปัจจัยหลักโดยเรียงตามความสำคัญของเกณฑ์ปัจจัยหลักดังรูปที่ 4 สามารถอธิบายได้ดังนี้

เกณฑ์ปัจจัยรองภายใต้เกณฑ์ปัจจัยหลักลำดับแรก ด้านเวลา ค่าเฉลี่ยน้ำหนักระดับความสำคัญที่เรียงจากมากไปหาน้อยได้แก่ ด้านการส่งมอบตรงเวลามีค่าคะแนนน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุด (0.505) รองลงมาเป็นด้านเสนอราคา (0.237) ด้านเวลาการผลิต (0.218) และด้านการบริการหลังการขาย (0.040) ตามลำดับ

ในขณะที่เกณฑ์ปัจจัยรองภายใต้เกณฑ์ปัจจัยหลักลำดับที่สอง ด้านคุณภาพ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักระดับความสำคัญที่เรียงจากมากไปหาน้อยได้แก่ ด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีค่าคะแนนน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุด (0.618) รองลงมาเป็นด้านความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ (0.178) ด้านการสอบเทียบเครื่องมือวัด (0.140) และด้านความมุ่งมั่นต่อคุณภาพ (0.064) ตามลำดับ ส่วนเกณฑ์ปัจจัยรองภายใต้เกณฑ์ปัจจัยหลักลำดับที่สาม ด้าน

ความสามารถการผลิต ค่าเฉลี่ยน้ำหนักระดับความสำคัญที่เรียงจากมากไปหาน้อยได้แก่ ด้านบรรจุภัณฑ์มีค่าคะแนนน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุด (0.476) รองลงมาเป็นด้านเทคนิคการผลิต (0.314) ด้านเทคโนโลยี (0.156) และด้านกำลังการผลิต (0.054) ตามลำดับ

สำหรับเกณฑ์ปัจจัยรองภายใต้เกณฑ์ปัจจัยหลักลำดับที่สี่ ด้านราคา ค่าเฉลี่ยน้ำหนักระดับความสำคัญที่เรียงจากมากไปหาน้อยได้แก่ ด้านการชำระเงินเครดิตมีค่าคะแนนน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุด (0.507) รองลงมาเป็นด้านบริการก่อนการขาย (0.328) ด้านการควบคุมราคา (0.087) และด้านการควบคุมต้นทุน (0.078) ตามลำดับ และเกณฑ์ปัจจัยรองภายใต้เกณฑ์ปัจจัยหลักลำดับสุดท้าย ด้านการจัดส่ง ค่าเฉลี่ยน้ำหนักระดับความสำคัญที่เรียงจากมากไปหาน้อยได้แก่ ด้านการชำระเงินเครดิตมีค่าคะแนนน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุด (0.415) รองลงมาเป็นด้านความน่าเชื่อถือในการจัดส่ง (0.389) ด้านช่องทางการจัดส่ง (0.131) และด้านขั้นตอนจัดส่ง (0.065) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาภาพรวมสามารถจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์ปัจจัยรองทั้งหมด 20 ด้าน เป็นปัจจัยรองที่มีความสำคัญ 5 ลำดับแรกโดยเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปหาน้อย ได้แก่ด้านส่งมอบตรงเวลา (0.244) เป็นเกณฑ์ปัจจัยรองที่มีลำดับความสำคัญลำดับแรก รองลงมาเป็นด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (0.178) ด้านเสนอราคา(0.115) ด้านเวลาการผลิต (0.106) และด้านความรู้ทางอุตสาหกรรม (0.065) ตามลำดับ สำหรับลำดับความสำคัญของเกณฑ์ปัจจัยรองอื่น ๆ นั้นดังตารางที่ 4 ซึ่งมีเกณฑ์ปัจจัยรองด้านขั้นตอนการจัดส่ง (0.002) เป็นเกณฑ์ปัจจัยรองที่ให้ความสำคัญลำดับท้ายสุด จากงานวิจัยส่วนใหญ่ พบว่าปัจจัยด้านคุณภาพจะเป็นปัจจัยที่มีน้ำหนักความสำคัญมากในการคัดเลือกผู้ส่งมอบ [10]-[12] แต่งานวิจัยนี้ พบว่า ปัจจัยด้านเวลาเป็นปัจจัยที่มีน้ำหนักความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากเป็นเกณฑ์ปัจจัยด้านเวลาในการรอคอยสินค้าเพื่อการผลิต ซึ่งต้องทันเวลากับการผลิตและส่งมอบสินค้า เพื่อการสร้างภาพความน่าเชื่อถือ

ให้กับลูกค้าของบริษัท ดังนั้นเกณฑ์ปัจจัยด้านเวลาจึงเป็นเกณฑ์ปัจจัยที่บริษัทกรณีศึกษาให้ความสำคัญมากที่สุด

## 5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ลำดับชั้น (AHP) มาช่วยวิเคราะห์และกำหนดระดับความสำคัญของปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาเลือกผู้ให้บริการด้านการจัดซื้อและผลิตเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มของบริษัทกรณีศึกษา จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยหลักที่สำคัญสำหรับการประเมินเพื่อคัดเลือกผู้ให้บริการด้านการจัดซื้อและผลิตเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบเรียงจากมากไปหาน้อยของปัจจัยหลักได้แก่ ปัจจัยด้านเวลา (0.482) ซึ่งเป็นเวลาตั้งแต่การยื่นเสนอราคาไปจนถึงการส่งมอบสินค้าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมาเป็นลำดับแรก ตามด้วย ด้านคุณภาพ (0.288) ด้านความสามารถการผลิต (0.136) ด้านราคา (0.062) และด้านการจัดส่ง (0.032) ตามลำดับ และเมื่อเรียงลำดับความสำคัญภาพรวมของระดับปัจจัยรองทั้ง 20 ปัจจัยภายใต้ 5 ปัจจัยหลัก มีปัจจัยรองที่มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักระดับความสำคัญใน 5 ลำดับแรกได้แก่ปัจจัยด้านส่งมอบตรงเวลา (0.244) มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักระดับความสำคัญเป็นลำดับที่หนึ่ง ตามด้วยด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (0.178) ด้านเสนอราคา (0.115) ด้านเวลาการผลิต (0.106) และด้านความรู้ทางอุตสาหกรรม (0.065) ตามลำดับ ซึ่งเป็นเกณฑ์ปัจจัยรอง 5 ลำดับแรกที่ขาดไม่ได้สำหรับการประเมินเพื่อคัดเลือกผู้ให้บริการที่มีศักยภาพ ผลการวิจัยในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบ และยังเป็นประโยชน์ต่อผู้ส่งมอบใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาศักยภาพขององค์กรตนเองให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาที่อนุเคราะห์ข้อมูลและผู้เชี่ยวชาญสำหรับการศึกษานี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. A. Chaudhari and A. J. Deshmukh "Manufacturing Industries : A Review of Supplier Selection Methods," in National Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, MUMBAI, pp. 1022-1026, 2011.
- [2] F. Tahriri, M. R. Osman, A. Ali and R. M. Yusuff, "A Review of Supplier Selection Methods in Manufacturing Industries," *Suranaree Journal of Science and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 201-208, 2008.
- [3] ฉนัยชนม์ มณีธรรมวงษ์ และ ระพี กาญจนะ, "การศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการคัดเลือกและประเมินผู้ส่งมอบ : การทบทวนวรรณกรรม," *การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10*, นครราชสีมา, pp. 549-557 , 2562.
- [4] S. AKBAS and T. ERBAY DALKILIÇ, "Multi-Criteria Supplier Selection Based on Fuzzy Pairwise Comparison in AHP," *Journal of Science*, vol. 31, no. 1, pp. 296-308 , 2018.
- [5] ศรีเอทีฟคอมมอนส์. (6 กันยายน 2013). การวิเคราะห์ตามลำดับชั้น ตัวช่วยตัดสินใจที่ดีที่สุด. [Online]. Available : <https://www.gotoknow.org/posts/291974>.
- [6] T. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, New York: Mc Grow-Hill. , 1980.

- [7] T. Saaty, "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process.," *Interfaces*, vol. 24, no. 6, pp. 18-43, 1994.
- [8] R. Ramlan, E. M. N. Engku Abu Bakar, F. Mahmud and H. Keng Ng, "The Ideal Criteria of Supplier Selection for SMEs Food Processing Industry," *MATEC Web of Conferences*, vol. 70, pp. 1-5, 2016.
- [9] K. Mathiyazhagan, S. Sudhakar and A. Bhalotia, "Modeling the criteria for selection of suppliers towards green aspect: a case in Indian automobile industry," *OPSEARCH* , vol. 55, pp. 65–84, 2018.
- [10] S. Laksanasiri, N. Paisansin and P. Anussornnitisarn, "Apply The Analytic Hierarchy Process Method for Selecting Supplier in Automotive Business," in *Managing Intellectual Capital and Innovation for Sustainable and Inclusive Society: Managing Intellectual Capital and Innovation; Proceedings of the MakeLearn and TIIM Joint International Conference 2015*, bari, Italy, pp. 2235-2241, 2015.
- [11] D. Öztürk, "Factors that Influence the Supplier Selection of Manufacturing Businesses," *Journal of Research in Business and Management* , vol. 4, no. 11, pp. 18-24 , 2017.
- [12] S. Hosseini and A. Al Khaled, "A hybrid ensemble and AHP approach for resilient supplier selection," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 30, pp. 207-228, 2019.

# การวิเคราะห์กระบวนการเพื่อปรับปรุงวิธีการการตรวจวัดชิ้นส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์

## Process Analysis for Measured Method Improvement of Server Cabinet

### Part

เริงฤทธิ์ ศิริรักษ์<sup>1</sup> กฤษณา คำษา<sup>1</sup> วรพจน์ ศิริรักษ์<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยพะเยา พะเยา 56000

<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย 57120

Reungruthai Sirirak<sup>1</sup> Kisana Kumsa<sup>1</sup> Worapot Sirirak<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Material Science, Faculty of Science, University of Phayao 56000

<sup>2</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Lanna Chiangrai 57120

\*Corresponding author Email: worapotsirirak@hotmail.com

(Received: October 3, 2019; Accepted: March 9, 2020)

#### บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมการผลิตตู้เซิร์ฟเวอร์ความล่าช้าในกระบวนการวัดส่งผลต่อความสามารถในการผลิตของกระบวนการผลิต ด้วยเหตุนี้การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการตรวจวัดคุณภาพรอยเชื่อมแบบจุดของชิ้นส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์ โดยใช้เทคนิคอีซีอาร์เอส (ECRS) เพื่อให้ปฏิบัติงานได้ง่ายและลดระยะเวลาในกระบวนการตรวจวัด โดยออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดสำหรับการตรวจวัดขนาด และศึกษาเวลาเพื่อหาเวลามาตรฐานในการตรวจวัด จากนั้นเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจวัดด้วยวิธีการเดิม จากการศึกษาพบว่า การใช้อุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดความแข็งแรงของจุดเชื่อมของชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 9 มีเวลามาตรฐานในกระบวนการตรวจวัด 5.16 นาที และ 5.53 นาที ตามลำดับ ซึ่งใช้เวลาน้อยและรวดเร็วช่วยให้พนักงานปฏิบัติงานได้ง่ายขึ้นเป็นที่พึงพอใจกับพนักงานฝ่ายตรวจวัดคุณภาพ สำหรับการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 มีเวลามาตรฐานในการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ช่วยตรวจวัดขนาด 7.76 นาที 9.20 นาที และ 9.51 นาที ตามลำดับ ซึ่งตรวจวัดได้ง่ายขึ้นใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการตรวจวัดแบบเดิม คิดเป็นประสิทธิภาพการลดเวลากระบวนการปฏิบัติงานของการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 3 ชิ้นส่วนที่ 9 ชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 ได้ถึง 29.02%, 16.84%, 39.42%, 39.94% และ 35.39% ตามลำดับ อีกทั้งไม่จำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีความชำนาญมากในการตรวจวัดก็สามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

**คำสำคัญ:** เวลามาตรฐาน อุปกรณ์จับยึด ตู้เซิร์ฟเวอร์ เทคนิคอีซีอาร์เอส

#### ABSTRACT

In server cabinet manufacture industry, the lateness in the measurement process affects the productivity of the manufacturing process. Therefore, this research aimed to improve an efficiency of the spot weld measurement process in server cabinet part. The ECRS technique was applied for a

convenient usage and a measured time decrease. The fixture was designed and studied the standard time for measurement and standard time discovery. Afterwards, the received results were compared with the conventional measurement. The study found that the designed fixture was used in part 3 and 9 revealed 5.16 and 5.53 of the standard time, respectively. This result indicated the decrease in the standard measurement time with good continent of QA officer. For part 1, 4 and 8, the standard time is 7.76, 9.20 and 9.51 minute, respectively. All results displayed the more convenient and less standard measurement time than the old one. The efficiency of time decrease is 29.02%, 16.84%, 39.42%, 39.94% and 35.39% for part 3, 9, 1, 4 and 8. Moreover, the proficiency of QA officer was not required for high-efficiency work.

**Keyword:** Standard time, fixture, server cabinet, spot weld measurement, ECRS.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงภาวะเศรษฐกิจเกิดขึ้นทั้งการถดถอยและการชะลอตัวซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ประกอบการอย่างมาก เทคโนโลยีและวิธีการในการผลิตของแต่ละอุตสาหกรรมเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกถึงสมรรถนะและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ที่ผ่านมามีอุตสาหกรรมประสบปัญหาของเสียหรือข้อบกพร่องและความล่าช้าในการผลิต จึงทำให้มีต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น การปรับปรุงวิธีการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต จึงเป็นสิ่งที่ผู้ประกอบการมุ่งหมายเพื่อปรับตัวให้มีความสามารถในการแข่งขันและตอบสนองความต้องการของลูกค้าเพื่อความอยู่รอดของธุรกิจ ที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่ศึกษาปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัยปรับปรุงกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมประเภทอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการปรับปรุงวิธีการทำงานและกระบวนการผลิตให้ทำงานได้ง่าย รวดเร็วและมีคุณภาพด้วยหลายเทคนิคดังเช่นเทคนิคการศึกษางาน เทคนิค ECRS เทคนิคการจำลองสถานการณ์ เทคนิคเครื่องมือคุณภาพ เทคนิคสินค้า และเทคนิคซิกซ์ซิกม่า เป็นต้น [1]-[4] เทคนิคเหล่านี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและคุณภาพสินค้าให้ดีขึ้นได้ [5], [6] ระบบและวิธีการผลิตเป็นลำดับแรกที่ถูกให้ความสำคัญในการผลิตสินค้าที่มีคุณภาพและใช้เวลาในการผลิตน้อยสามารถจัดส่งสินค้าได้

ตามกำหนดส่งผลให้เกิดความน่าเชื่อถือแก่ลูกค้า ดังเช่น Kasemset et al [4] ได้ใช้เทคนิค ECRS และเทคนิคการจำลองสถานการณ์ช่วยในการแก้ปัญหาการเกิดคอขวดของกระบวนการบรรจุกระดาด สามารถปรับปรุงและลดเวลาของกระบวนการทำงานได้ถึง 28.06% ซึ่งทำให้การผลิตมีความรวดเร็วและเที่ยงตรงและชิ้นงานมีคุณภาพ นอกจากนี้การใช้อุปกรณ์ช่วยในการผลิตและตรวจวัดขนาดจำพวก จิ๊กหรือฟิกเจอร์ เป็นอีกสิ่งที่ยินยมนำมาใช้ในการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดปริมาณการสูญเสียและลดระยะเวลาในการตรวจวัดชิ้นงานในกระบวนการผลิต [7]-[11] อีกทั้งผู้ปฏิบัติงานไม่จำเป็นต้องมีประสบการณ์หรือความชำนาญมากก็สามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

สำหรับบริษัทกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ประกอบกิจการผลิตตู้เซิร์ฟเวอร์จัดวางระบบและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการสื่อสารโทรคมนาคมซึ่งมีความต้องการในการผลิตให้ได้วันละไม่ต่ำกว่า 70 ตู้ แต่ไม่สามารถผลิตได้ตามเป้าหมายที่วางไว้ได้ เนื่องจากกำลังประสบปัญหาความเสียหายจากการบิดงอหรือรอยเชื่อมแตกแล้วชิ้นงานเชื่อมประกอบหลุดออกจากกันเมื่อนำชิ้นส่วนต่าง ๆ ของตู้เซิร์ฟเวอร์มาประกอบ จากการขาดการตรวจวัดความแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อ อีกทั้งในการตรวจวัดขนาดของชิ้นส่วนยังเกิดความผิดพลาดหรือ

คลาดเคลื่อนในการตรวจวัดขนาดชิ้นงานตามตำแหน่งที่กำหนดทำให้ต้องมีการตรวจวัดซ้ำหลายครั้ง จึงเกิดความล่าช้าในขั้นตอนการตรวจวัดขนาด ส่งผลให้การผลิตไม่เป็นไปตามแผนการผลิตที่วางไว้ การปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงานในการตรวจวัดของฝ่ายตรวจสอบคุณภาพจึงเป็นเป้าหมายของการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการตรวจวัดคุณภาพชิ้นส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์ด้วยการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดสำหรับการตรวจวัดขนาด ด้วยเทคนิค ECRS และเทคนิคการศึกษาเวลา เพื่อช่วยให้สามารถปฏิบัติงานได้จรวดเร็ว ลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการตรวจวัดขนาดของกระบวนการตรวจวัดคุณภาพจากการผลิตชิ้นส่วนสำหรับการนำไปประกอบเป็นตู้เซิร์ฟเวอร์จัดวางระบบและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการสื่อสารโทรคมนาคม

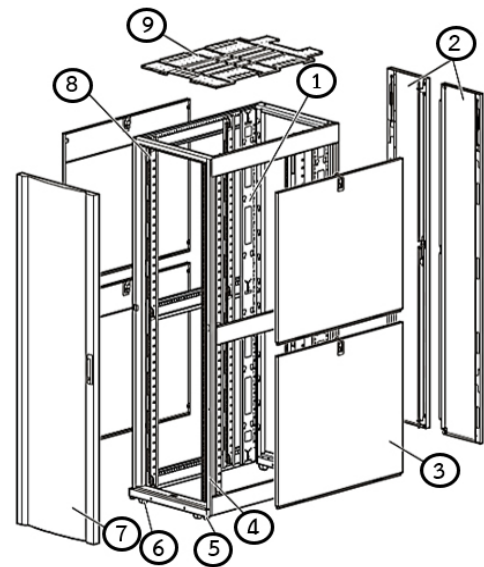
## 2. วิธีการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการศึกษาการผลิตและชิ้นส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์ทางบริษัทมีความต้องการที่ผลิตสินค้าให้ได้ตามเป้าหมายในแต่ละวันไม่น้อยกว่า 70 ตู้ เพื่อส่งสินค้าให้ได้ตามเวลาที่ลูกค้ากำหนด โดยตู้เซิร์ฟเวอร์มีชิ้นส่วนที่ต้องนำมาประกอบเป็นผลิตภัณฑ์มีชิ้นส่วนประกอบที่สำคัญ 9 ชิ้นส่วนดังรูปที่ 1 ชิ้นส่วนประกอบทั้ง 9 ชิ้นส่วนเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญและต้องมีการตรวจวัดคุณภาพเพื่อให้ได้ตามกำหนดเพื่อให้สินค้าที่ได้มีคุณภาพที่ดี จากข้อมูลเบื้องต้นในขั้นตอนการผลิตตู้เซิร์ฟเวอร์พบปัญหาการประกอบจากชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 3 ชิ้นส่วนที่ 4 ชิ้นส่วนที่ 8 และ ชิ้นส่วนที่ 9 โดยสามารถแบ่งแยกปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ปัญหาได้ดังหัวข้อย่อยนี้

### 2.1 การศึกษาปัญหาการผลิตตู้เซิร์ฟเวอร์

ขั้นตอนการผลิตตู้เซิร์ฟเวอร์พบว่าเกิดปัญหา 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นชิ้นส่วนประกอบที่ 3 และ ชิ้นส่วนที่ 9 เกิดปัญหามากในการประกอบตู้เซิร์ฟเวอร์ในตำแหน่งจุดเชื่อมต่อที่เป็นครีบสันสำหรับชิ้นส่วนที่ 3 และ ชิ้นส่วนที่ 9 จุดเชื่อมต่อในส่วนที่เป็นขอบสัน ดังรูปที่ 2

เป็นชิ้นส่วนที่ผ่านการเชื่อมแบบจุดและต้องมีการตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมต่อของแผ่นโลหะซึ่งเป็นตำแหน่งที่ถูกมองข้ามและไม่มีการตรวจวัดค่าความแข็งแรงจุดเชื่อม



- |                              |                            |
|------------------------------|----------------------------|
| 1. Vertical cable organizer  | 2. Split doors             |
| 3. Side panels with locks    | 4. Frame post              |
| 5. Adjustable levelling feet | 6. Casters                 |
| 7. Reversible curved door    | 8. Vertical mounting rails |
| 9. Roof                      |                            |

รูปที่ 1 ส่วนประกอบตู้เซิร์ฟเวอร์



รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ต้องตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อม

เนื่องจากอ้างอิงตามใบรับรองที่เคยส่งชิ้นงานตรวจวัดอย่างไรก็ตามในการเชื่อมจุดของชิ้นส่วนดังกล่าวอาจมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงได้ จึงทำให้เกิดปัญหาการบิดงอหรือหลุดออกจากกันของจุดเชื่อมต่อในขณะประกอบเป็นตู้เซิร์ฟเวอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดความแข็งแรงของแนวเชื่อมสำหรับการผลิตตู้

เซิร์ฟเวอร์ที่มีคุณภาพตามข้อกำหนดของลูกค้า โดยมีรายละเอียดขั้นตอนงานย่อยในการตรวจสอบแบบเดิมด้วยสายตาและการสัมผัสของชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 9 ตามแผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจสอบดังตารางที่ 1-2 โดยที่ สัญลักษณ์ ○ หมายถึง กิจกรรมการปฏิบัติงาน ⇨ หมายถึง กิจกรรมการเคลื่อนที่หรือขนย้าย □ หมายถึง กิจกรรมการตรวจสอบคุณภาพ D หมายถึง กิจกรรมการรอคอย ∇ หมายถึง กิจกรรมการเก็บรักษา จะเห็นได้ว่ากระบวนการในการตรวจสอบใช้เวลาในการปฏิบัติงานตรวจสอบชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 9 มีเวลาเฉลี่ย 5.27 นาที และ 4.82 นาที ตามลำดับ และมีระยะทางในการเคลื่อนที่ของทั้ง 2 ชิ้นส่วนเท่ากัน 12.30 เมตร ซึ่งเวลาเฉลี่ยในการตรวจสอบชิ้นงานแต่ละชิ้นค่อนข้างใช้เวลานาน โดยเฉพาะในกิจกรรมย่อยที่ 3 เป็นขั้นตอนการตรวจเช็คจุดเชื่อมด้วยสายตาและการสัมผัสเพื่อหาจุดบกพร่องของรอยเชื่อมอย่างละเอียด

ส่วนที่สอง เป็นกระบวนการตรวจวัดขนาดชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ และใช้วิธีการตรวจวัดด้วยเวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ในการตรวจวัดของพนักงานทำได้ยากเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดและต้องวัดซ้ำในตำแหน่งเดิม

ตารางที่ 1 แผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 3 ก่อนปรับปรุงวิธีการตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 3 |                                        |                |                |   |   |   |   |
|-------------------------------|----------------------------------------|----------------|----------------|---|---|---|---|
| งานย่อย                       | รายการ                                 | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | ○ | ⇨ | □ | ∇ |
| 1                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด            | 0.33           | 6.30           |   |   |   |   |
| 2                             | ทำความสะอาด                            | 0.22           | -              |   |   |   |   |
| 3                             | ตรวจเช็คจุดเชื่อมด้วยสายตาและการสัมผัส | 3.14           | -              |   |   |   |   |
| 4                             | วางชิ้นส่วนจุดพัก                      | 0.12           | -              |   |   |   |   |
| 5                             | ร่อนพนักงานยกเก็บ                      | 0.23           | -              |   |   |   |   |
| 6                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ                       | 1.23           | 6.00           |   |   |   |   |
| 7                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ                 | -              | -              |   |   |   |   |
| รวม                           |                                        | 5.27           | 12.30          | 2 | 2 | 1 | 1 |

ตารางที่ 2 แผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 9 ก่อนปรับปรุงวิธีการตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 3 |                                        |                |                |   |   |   |   |
|-------------------------------|----------------------------------------|----------------|----------------|---|---|---|---|
| งานย่อย                       | รายการ                                 | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | ○ | ⇨ | □ | ∇ |
| 1                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด            | 0.35           | 6.30           |   |   |   |   |
| 2                             | ทำความสะอาด                            | 0.31           | -              |   |   |   |   |
| 3                             | ตรวจเช็คจุดเชื่อมด้วยสายตาและการสัมผัส | 2.53           | -              |   |   |   |   |
| 4                             | วางชิ้นส่วนจุดพัก                      | 0.13           | -              |   |   |   |   |
| 5                             | ร่อนพนักงานยกเก็บ                      | 0.28           | -              |   |   |   |   |
| 6                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ                       | 1.22           | 6.00           |   |   |   |   |
| 7                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ                 | -              | -              |   |   |   |   |
| รวม                           |                                        | 4.82           | 12.30          | 2 | 2 | 1 | 1 |

จึงใช้เวลากระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนทั้ง 3 ชิ้นส่วนค่อนข้างมาก โดยแยกรายละเอียดงานย่อยในการตรวจวัดตามแผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจวัดดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3 แผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 1 ก่อนปรับปรุงวิธีการตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 1 |                               |                |                |   |   |   |   |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|---|---|---|---|
| งานย่อย                       | รายการ                        | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | ○ | ⇨ | □ | ∇ |
| 1                             | เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้การตรวจวัด | 1.40           | -              |   |   |   |   |
| 2                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด   | 1.33           | 5.30           |   |   |   |   |
| 3                             | ทำความสะอาด                   | 0.52           | -              |   |   |   |   |
| 4                             | หยิบเวอร์เนียร์เพื่อตรวจวัด   | 0.19           | -              |   |   |   |   |
| 5                             | ตรวจวัดขนาด                   | 4.14           | -              |   |   |   |   |
| 6                             | วางเวอร์เนียร์                | 0.18           | -              |   |   |   |   |
| 7                             | ร่อนพนักงานยกเก็บ             | 0.30           | -              |   |   |   |   |
| 8                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ              | 1.53           | 8.00           |   |   |   |   |
| 9                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ        | -              | -              |   |   |   |   |
| รวม                           |                               | 9.29           | 13.30          | 4 | 2 | 1 | 1 |

แสดงให้เห็นว่ากระบวนการตรวจวัดมีงานย่อยที่ต้องปฏิบัติเช่นเดียวกันทั้ง 3 ชิ้นส่วน ที่เป็นส่วนประกอบตู้เซิร์ฟเวอร์ที่ผ่านมาใช้วิธีการตรวจวัดด้วยเวอร์เนียร์คาร์ลิป

เปอร์เซ็นต์เวลาเฉลี่ยในกระบวนการตรวจชิ้นส่วนที่ 1 เป็น 9.29 นาที ชิ้นส่วนที่ 4 เป็น 11.11 นาที และชิ้นส่วนที่ 8 เป็น 10.67 นาที

ตารางที่ 4 แผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 4 ก่อนปรับปรุงวิธีการตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 4 |                               |                |                |   |   |       |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|---|---|-------|
| งานย่อย                       | รายการ                        | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | ○ | ⇒ | □ D ▽ |
| 1                             | เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้การตรวจวัด | 1.44           | -              | ● |   |       |
| 2                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด   | 1.50           | 6.30           |   | ● |       |
| 3                             | ทำความสะอาด                   | 1.05           | -              | ● |   |       |
| 4                             | หยิบเวอร์เนียสเพื่อตรวจวัด    | 0.23           | -              | ● |   |       |
| 5                             | ตรวจวัดขนาด                   | 4.58           | -              |   | ● |       |
| 6                             | วางเวอร์เนียส                 | 0.20           | -              | ● |   |       |
| 7                             | ร่อนพนักงานเก็บ               | 0.28           |                |   | ● |       |
| 8                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ              | 1.43           | 9.00           |   | ● |       |
| 9                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ        | -              | -              |   |   | ●     |
| รวม                           |                               | 11.11          | 15.30          | 4 | 2 | 1 1 1 |

ตารางที่ 5 แผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 8 ก่อนปรับปรุงวิธีการตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 8 |                               |                |                |   |   |       |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|---|---|-------|
| งานย่อย                       | รายการ                        | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | ○ | ⇒ | □ D ▽ |
| 1                             | เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้การตรวจวัด | 1.38           | -              | ● |   |       |
| 2                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด   | 1.55           | 6.00           |   | ● |       |
| 3                             | ทำความสะอาด                   | 1.25           | -              | ● |   |       |
| 4                             | หยิบเวอร์เนียสเพื่อตรวจวัด    | 0.20           | -              | ● |   |       |
| 5                             | ตรวจวัดขนาด                   | 4.24           | -              |   | ● |       |
| 6                             | วางเวอร์เนียส                 | 0.19           | -              | ● |   |       |
| 7                             | ร่อนพนักงานเก็บ               | 0.36           | -              |   | ● |       |
| 8                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ              | 1.50           | 10.00          |   | ● |       |
| 9                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ        | -              | -              |   |   | ●     |
| รวม                           |                               | 10.67          | 16.00          | 4 | 2 | 1 1 1 |

โดยพบว่างานย่อยที่ 5 เป็นขั้นตอนการตรวจวัดขนาด มีลักษณะการตรวจวัดดังรูปที่ 3 ใช้เวลามากที่สุดด้วยเวลาเฉลี่ยในการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 1, 4 และ 8 เป็น 4.14 นาที 4.58 นาที และ 4.24 นาที ตามลำดับ ทำให้เกิดความล่าช้าใช้เวลามากในการตรวจวัดชิ้นส่วนแต่ละชิ้น



รูปที่ 3 วิธีการตรวจวัดชิ้นส่วนด้วยเวอร์เนียสคาร์ลิปเปอร์

เนื่องจากการวัดขนาดมีการตรวจวัดหลายด้านซึ่งต้องหมุนพลิกชิ้นส่วนเพื่อให้ตรวจวัดขนาดได้ครบทุกส่วน จึงทำให้การปฏิบัติงานเกิดความยากลำบากและเกิดความคลาดเคลื่อนจากการวัดขนาดบ่อยครั้ง และต้องตรวจวัดซ้ำในแต่ละชิ้นส่วนเป็นเหตุให้กระบวนการตรวจวัดคุณภาพไม่สามารถตรวจวัดชิ้นส่วนเหล่านี้แล้วเสร็จได้ครบตามแผน ดังนั้นในงานย่อยที่ 5 จึงเป็นเป้าหมายของการศึกษาวิจัยอีกส่วนเพื่อให้มีการทำงานได้ง่าย ลดเวลาของกระบวนการในการตรวจวัดชิ้นส่วนแต่ละชิ้นต่อไป

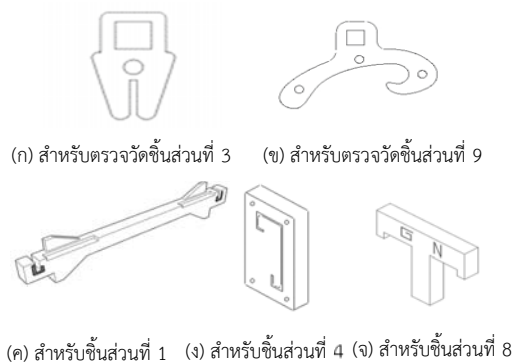
## 2.2 แนวคิดการแก้ปัญหาและวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้ใช้เทคนิค ECRS เพื่อพัฒนาวิธีการใหม่ในการปฏิบัติงานตรวจวัดให้ง่ายและรวดเร็วมากขึ้นด้วยการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดให้เหมาะสมกับลักษณะรูปทรงของชิ้นส่วนและตำแหน่งการวัด โดยการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดชิ้นส่วนตู้แช่ฟรียูเออร์ ใช้หลักการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของรูปทรงชิ้นส่วนและตำแหน่งการวัด ดังนี้

1. กำหนดความต้องการหรือคุณลักษณะของรูปทรงของชิ้นส่วนนั้น ๆ และตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด โดยการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ช่วยให้มีความง่าย ไม่ซับซ้อน มีต้นทุนการสร้างต่ำและสามารถตรวจวัดได้ง่ายรวดเร็ว ไม่ยุ่งยากหรือหลายขั้นตอน ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องมีทักษะการตรวจวัดที่ชำนาญมาก

2. กำหนดวิธีการใช้งานอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัด โดยอุปกรณ์ช่วยตรวจวัดของชิ้นส่วนที่ 3 และ 9 จะใช้ร่วมกับประแจวัดแรงบิดเพื่อตรวจสอบด้วยการบิดจุดเชื่อมสำหรับตรวจวัดค่าความแข็งแรงของจุดเชื่อม ชิ้นส่วนที่ 1, 4 และ 8 จะตรวจวัดชิ้นส่วนเหล่านี้ด้วยการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดวางตามตำแหน่งและการสวมเข้ากับชิ้นส่วน

3. กำหนดรูปร่างของอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัด โดยลักษณะของอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมของชิ้นส่วนที่ 3 และ ชิ้นส่วนที่ 9 ดังรูปที่ 4 ก-ข ออกแบบอุปกรณ์ช่วยให้จับยึดชิ้นส่วนที่ 3 สามารถเสียบเข้าไปบนครีปสันให้ได้ขนาดตามพิคัดพอดีสำหรับการวัดความแข็งแรงจุดเชื่อม และชิ้นส่วนที่ 9 ออกแบบให้สามารถมีรูปทรงเป็นตะขอเกี่ยวกับขอบสันได้ง่าย สำหรับอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดขนาดหรือเรียกว่า เกจวัดขนาดชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 ดังรูปที่ 4 ค-จ ออกแบบให้มีรูปทรงเหมาะสมสอดคล้องกับการตรวจวัดชิ้นส่วนแต่ละชิ้นด้วยการขึ้นรูปเกจวัดให้มีรูปร่างและขนาดกำหนดตามแบบเพื่อให้เกจวัดขนาดตามตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัดของชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 ได้ง่าย ทำให้การตรวจวัดได้รวดเร็วขึ้น



รูปที่ 4 อุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดขนาด

4. กำหนดรายละเอียดวิธีการใช้งานโดยขั้นตอนในการตรวจวัดความแข็งแรงของจุดเชื่อมจะนำอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดจุดเชื่อมของชิ้นงานที่ 3 และชิ้นงานที่ 9 มาประกอบกับประแจขันวัดแรงบิด (Digital Torque

Wrench) สำหรับชิ้นส่วนที่ 1, 4 และ 8 จะสามารถเลื่อนหรือวางไปตามตำแหน่งที่ต้องตรวจวัดได้ง่าย

5. การเลือกวัสดุมาใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด จะต้องเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องตลาดและมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการรับแรงในการตรวจวัดซึ่งเลือกเหล็กกล้า St 37 สำหรับการสร้างอุปกรณ์ช่วยตรวจวัดเนื่องจากมีความแข็งแรงมากกว่าแรงที่ใช้ในการตรวจวัด

เมื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยตรวจวัดแล้วจึงติดตั้งอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดกับประแจวัดแรงบิดสำหรับการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 9 และปรับตั้งค่าแรงที่ใช้ในการตรวจวัด โดยกำหนดให้ต้องมีความแข็งแรงสูงกว่าแรงที่ใช้ในการประกอบเพื่อป้องกันการแตกของรอยเชื่อมมีค่าแรงบิดในการประกอบตามคู่มือกำหนดต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 15 lbf·in สำหรับชิ้นส่วนที่ 3 และต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 23 lbf·in สำหรับชิ้นส่วนที่ 9 โดยในการตรวจวัดจะปรับตั้งให้ค่าแรงมีขนาดแรงทดสอบ 17 lbf·in ดังรูปที่ 5 หากจุดเชื่อมของชิ้นส่วนดังกล่าวสามารถรับแรงบิดได้ตามค่าที่ตั้งไว้ ชิ้นส่วนนั้นผ่านมาตรฐานตามคู่มือกำหนด



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ช่วยตรวจวัดและการตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อม

สำหรับการทดลองตรวจวัดขนาดชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 ชิ้นส่วนที่ 8 และชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 9 จะตรวจวัดจำนวน 20 ชิ้น โดยการตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมจะตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 3 จำนวน 6 จุด และชิ้นส่วนที่ 9 จำนวน 10 จุด ตามตำแหน่งที่มีจุดเชื่อม เมื่อตรวจวัด

ขึ้นส่วนดังกล่าวแล้ว จากนั้นใช้เทคนิคการศึกษาเวลาสำหรับศึกษาเวลากระบวนการตรวจวัดของแต่ละชิ้นส่วนเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยและจำนวนครั้งในการจับเวลาสำหรับหาเวลามาตรฐานในการตรวจวัดแต่ละชิ้นส่วน ส่วนการตรวจวัดขนาดระยะของชิ้นงานที่ 1 จะตรวจวัดขนาดในแต่ละจุด จำนวน 3 จุดตามแนวยาว ซึ่งเป็นตำแหน่งส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง สำหรับการตรวจวัดขนาดชิ้นงานที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 นั้น จะตรวจวัดขนาดตามแนวยาวระยะห่างประมาณ 30 เซนติเมตร จำนวน 6 จุด โดยลักษณะการตรวจวัดของชิ้นส่วนทั้ง 3 ชิ้น ด้วยเกจวัดหรืออุปกรณ์ช่วยตรวจวัดที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ช่วยตรวจวัด

การทดลองในการตรวจวัดจะบันทึกเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจวัดแบบเดิมและหาเวลามาตรฐานในการตรวจวัด โดยเบื้องต้นจะดำเนินการทดลองเก็บข้อมูลด้านเวลาดำเนินการด้วยขนาดตัวอย่าง 20 ตัวอย่าง สำหรับนำไปใช้ในการหาจำนวนครั้งของการเก็บข้อมูล ซึ่งถือเป็นการเก็บข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองตรวจวัด เพื่อให้ได้จำนวนครั้งของการเก็บข้อมูลที่เพียงพอน่าเชื่อถือ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% มีความแม่นยำ  $\pm 5\%$  โดยหาได้จากสูตรที่ 1 [12]

$$N = n / (1 + (n \times p^2)) \quad (1)$$

เมื่อ N คือจำนวนครั้งการเก็บข้อมูล n คือขนาดตัวอย่างข้อมูล และ p คือค่าความแม่นยำ เมื่อได้จำนวนครั้งการเก็บข้อมูลที่น่าเชื่อถือแล้ว จึงหาค่าเวลามาตรฐานการของกระบวนการตรวจวัดแต่ละชิ้นส่วนหาได้จากสูตรที่ 2 และในการทำงานของพนักงานกำหนดเวลาเพื่อในการทำงาน 20%

$$ST = NT(1+AT) \quad (2)$$

เมื่อ ST คือเวลามาตรฐาน NT คือเวลาปกติ และ AT คือ %เวลาเผื่อ โดยเวลาปกติของงานหาได้จากสูตรที่ 3

$$NT = Obt \times E \quad (3)$$

เมื่อ Obt คือ เวลาสังเกตการณ์และ E คือ ประสิทธิภาพในการทำงาน โดยประสิทธิภาพในการทำงานของพนักงานจะประเมินจากระบบ Westing House ดังตารางที่ 6 แล้วนำมาบวกเข้ากับ 1 จึงจะได้ค่าประสิทธิภาพการทำงานของพนักงาน

ตารางที่ 6 ค่าประเมินประสิทธิภาพการทำงานด้วยระบบ Westing House

| ทักษะ                 | ความพยายาม           |
|-----------------------|----------------------|
| +0.15 A1 ขำนาญสูงมาก  | +0.13 A1 ขำนาญสูงมาก |
| +0.13 A2              | +0.12 A2             |
| +0.11 B1 ดีมาก        | +0.10 B1 ดีมาก       |
| +0.08 B2              | +0.08 B2             |
| +0.06 C1 ดี           | +0.06 C1 ดี          |
| +0.03 C2              | +0.02 C2             |
| 0.00 D เฉลี่ย         | 0.00 D เฉลี่ย        |
| -0.05 E1 พอใช้        | -0.04 E1 พอใช้       |
| -0.10 E2              | -0.18 E2             |
| -0.16 F1 ควรปรับปรุง  | -0.12 F1 ควรปรับปรุง |
| -0.22 F2              | -0.17 F2             |
| สภาพแวดล้อมในการทำงาน | ความสม่ำเสมอ         |
| +0.06 A ดีเยี่ยม      | +0.04 A ดีเยี่ยม     |
| +0.04 B ดีมาก         | +0.03 B ดีมาก        |
| +0.02 C ดี            | +0.01 C ดี           |
| 0.00 D เฉลี่ย         | 0.00 D เฉลี่ย        |
| -0.03 E พอใช้         | -0.02 E พอใช้        |
| -0.07 F ควรปรับปรุง   | -0.02 F ควรปรับปรุง  |

เมื่อได้เวลามาตรฐานของกระบวนการตรวจวัดแล้ว จึงดำเนินการเปรียบเทียบความแตกต่างของเวลามาตรฐานในการทำงานสำหรับการตรวจวัดแบบเดิมด้วยเวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์และการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ช่วยตรวจวัดหรือเกจวัดที่สร้างขึ้น

### 3. ผลการทดลองและอภิปราย

การทดลองตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมของชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 9 ด้วยอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดที่ออกแบบมาใช้สำหรับตรวจวัดนั้นสามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดจุดเชื่อมของชิ้นงานซึ่งเป็นจุดเชื่อมที่มีระยะแคบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้การตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมได้ง่ายและรวดเร็วโดยใช้เวลาเฉลี่ยกระบวนการตรวจวัดความแข็งแรงสำหรับชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 9 เป็น 3.74 นาที และ 4.01 นาที ตามลำดับ มีกระบวนการตรวจวัดดังตารางที่ 7 และตารางที่ 8 สำหรับการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8

ตารางที่ 7 แผนภูมิกระบวนการตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมชิ้นส่วนที่ 3 ด้วยอุปกรณ์ช่วยตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 3 |                              |                |                |   |   |       |
|-------------------------------|------------------------------|----------------|----------------|---|---|-------|
| งานย่อย                       | รายการ                       | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | O | ⇒ | □ D ▽ |
| 1                             | ประกอบ การตรวจวัดความแข็งแรง | 1.14           | -              | ● |   |       |
| 2                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด  | 0.33           | 6.30           |   | ● |       |
| 3                             | ทำความสะอาด                  | 0.22           | -              | ● |   |       |
| 4                             | ตรวจวัดความแข็งแรง           | 0.45           | -              |   | ● |       |
| 5                             | วางอุปกรณ์ตรวจวัด            | 0.12           | -              | ● |   |       |
| 6                             | รอกพนักงานยกเก็บ             | 0.25           | -              |   | ● |       |
| 7                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ             | 1.23           | 6.00           | ● |   |       |
| 8                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ       | -              | -              |   | ● |       |
|                               | รวม                          | 3.74           | 12.30          | 3 | 2 | 1 1 1 |

เมื่อใช้เกจวัดช่วยในกระบวนการตรวจวัด พบว่างานย่อยที่ 5 ใช้เวลาเฉลี่ยในการตรวจวัดลดลง สามารถลดเวลาเฉลี่ยในการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 1 เหลือ 0.18 นาที ชิ้นส่วนที่ 4 เหลือ 0.14 นาทีและ ชิ้นส่วนที่ 8 เหลือ 0.47 นาที ซึ่งลดเวลาการตรวจวัดลงอย่างมาก ทำให้เวลาของกระบวนการตรวจวัดลดลงเหลือ 5.63 นาที 6.67 นาที และ 6.90 นาที ตามลำดับ ดังตารางที่ 9-11 แสดงให้เห็น

ว่าการใช้เกจวัดที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานี้ช่วยให้การตรวจวัดได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น

เมื่อดำเนินการเก็บข้อมูลของเวลาในการทำงานเบื้องต้นแล้วจึงคำนวณหาจำนวนการเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมจากสูตรที่ 1 จะได้จำนวนครั้งการเก็บข้อมูลที่เหมาะสม

ตารางที่ 8 แผนภูมิกระบวนการตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมชิ้นส่วนที่ 9 ด้วยอุปกรณ์ช่วยตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 9 |                              |                |                |   |   |       |
|-------------------------------|------------------------------|----------------|----------------|---|---|-------|
| งานย่อย                       | รายการ                       | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | O | ⇒ | □ D ▽ |
| 1                             | ประกอบ การตรวจวัดความแข็งแรง | 1.21           | -              | ● |   |       |
| 2                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด  | 0.35           | 6.00           |   | ● |       |
| 3                             | ทำความสะอาด                  | 0.31           | -              | ● |   |       |
| 4                             | ตรวจวัดความแข็งแรง           | 0.55           | -              |   | ● |       |
| 5                             | วางอุปกรณ์ตรวจวัด            | 0.10           | -              | ● |   |       |
| 6                             | รอกพนักงานยกเก็บ             | 0.29           | -              |   | ● |       |
| 7                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ             | 1.20           | 6.00           | ● |   |       |
| 8                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ       | -              | -              |   | ● |       |
|                               | รวม                          | 4.01           | 12.00          | 3 | 2 | 1 1 1 |

ตารางที่ 9 แผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 1 หลังปรับปรุงวิธีการตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 1 |                               |                |                |   |   |       |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|---|---|-------|
| งานย่อย                       | รายการ                        | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | O | ⇒ | □ D ▽ |
| 1                             | เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้การตรวจวัด | 1.40           | -              | ● |   |       |
| 2                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด   | 1.33           | 5.30           |   | ● |       |
| 3                             | ทำความสะอาด                   | 0.52           | -              | ● |   |       |
| 4                             | หยิบเวอร์เนียร์เพื่อตรวจวัด   | 0.19           | -              | ● |   |       |
| 5                             | ตรวจวัดขนาด                   | 0.18           | -              |   | ● |       |
| 6                             | วางเวอร์เนียร์                | 0.18           | -              | ● |   |       |
| 7                             | รอกพนักงานยกเก็บ              | 0.30           | -              |   | ● |       |
| 8                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ              | 1.53           | 8.00           | ● |   |       |
| 9                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ        | -              | -              |   | ● |       |
|                               | รวม                           | 5.63           | 13.30          | 4 | 2 | 1 1 1 |

เป็น 19 ครั้ง แต่ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการเก็บข้อมูล 20 ครั้ง ซึ่งการเก็บข้อมูลจากการทดลองจึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการนำไปใช้หาเวลามาตรฐาน

ดังนั้นข้อมูลที่นำมาใช้ในการหาค่าเวลามาตรฐานจึงมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการหาค่าเวลามาตรฐานในการตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 9 และการตรวจวัดขนาดชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 ด้วยเช่นกันในการหาเวลาปกติของงาน

และการหาเวลามาตรฐานนั้นจะใช้เวลาเฉลี่ยของการตรวจวัดจากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นมาเป็นเวลาสังเกตการณ์และประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานจะพิจารณาจากประสบการณ์การตรวจวัดซึ่งพนักงานของบริษัทกรณีศึกษามีประสบการณ์ 0-1 ปีและการตรวจวัดมีสภาพแวดล้อมในการทำงานดีมีการทำงานที่สม่ำเสมอจึงให้ระดับประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานในเกณฑ์ดี ดังนั้นค่าเวลามาตรฐานในการทำงานตรวจวัด

ตารางที่ 10 แผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 4 หลังปรับปรุงวิธีการตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 4 |                               |                |                |   |   |       |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|---|---|-------|
| งานย่อย                       | รายการ                        | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | ○ | ⇒ | □ D ▽ |
| 1                             | เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้การตรวจวัด | 1.44           | -              | ● |   |       |
| 2                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด   | 1.50           | 6.30           |   | ● |       |
| 3                             | ทำความสะอาด                   | 1.05           | -              | ● |   |       |
| 4                             | หยิบเวอร์เนียเพื่อตรวจวัด     | 0.23           | -              | ● |   |       |
| 5                             | ตรวจวัดขนาด                   | 0.14           | -              |   | ● |       |
| 6                             | วางเวอร์เนีย                  | 0.20           | -              | ● |   |       |
| 7                             | รอปพนักงานยกเก็บ              | 0.28           | -              |   | ● |       |
| 8                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ              | 1.43           | 9.00           |   | ● |       |
| 9                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ        | -              | -              |   |   | ●     |
|                               | รวม                           | 6.67           | 15.30          | 4 | 2 | 1 1 1 |

ตารางที่ 11 แผนภูมิการไหลกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 8 หลังปรับปรุงวิธีการตรวจวัด

| แผนภูมิกระบวนการชิ้นส่วนที่ 8 |                               |                |                |   |   |       |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|---|---|-------|
| งานย่อย                       | รายการ                        | ใช้เวลา (นาที) | ระยะทาง (เมตร) | ○ | ⇒ | □ D ▽ |
| 1                             | เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้การตรวจวัด | 1.38           | -              | ● |   |       |
| 2                             | ยกชิ้นส่วนมาวางเพื่อตรวจวัด   | 1.55           | 6.00           |   | ● |       |
| 3                             | ทำความสะอาด                   | 1.25           | -              | ● |   |       |
| 4                             | หยิบเวอร์เนียเพื่อตรวจวัด     | 0.20           | -              | ● |   |       |
| 5                             | ตรวจวัดขนาด                   | 4.24           | -              |   | ● |       |
| 6                             | วางเวอร์เนีย                  | 0.19           | -              | ● |   |       |
| 7                             | รอปพนักงานยกเก็บ              | 0.36           | -              |   | ● |       |
| 8                             | ยกชิ้นส่วนไปเก็บ              | 1.50           | 10.00          |   | ● |       |
| 9                             | เก็บเพื่อรอส่งไปประกอบ        | -              | -              |   |   | ●     |
|                               | รวม                           | 6.90           | 16.00          | 4 | 2 | 1 1 1 |

ตารางที่ 12 เวลามาตรฐานการวัดชิ้นส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์

| ชิ้นส่วน      | ประสิทธิภาพการทำงาน                                                                                                                                                     | %เวลาเผื่อ   | เวลาสังเกตการณ์<br>(นาทีต่อชิ้น) | เวลาปกติ<br>(นาทีต่อชิ้น) | เวลามาตรฐาน<br>(นาทีต่อชิ้น) | การตรวจวัด  |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|
| ชิ้นส่วนที่ 3 | ทักษะ C1 = 0.06<br>ความพยายาม C1 = 0.06<br>สภาพแวดล้อมในการทำงาน C = 0.02<br>ความสม่ำเสมอ C = 0.01<br>ดังนั้น ประสิทธิภาพการทำงานเท่ากับ<br>1+0.06+0.06+0.02+0.01 =1.15 | 20/100 = 0.2 | 5.27                             | 6.06                      | 7.27                         | วิธีการเดิม |
| ชิ้นส่วนที่ 9 |                                                                                                                                                                         |              | 3.74                             | 4.30                      | 5.16                         | วิธีการใหม่ |
|               |                                                                                                                                                                         |              | 4.82                             | 5.54                      | 6.65                         | วิธีการเดิม |
| ชิ้นส่วนที่ 1 |                                                                                                                                                                         |              | 4.01                             | 4.61                      | 5.53                         | วิธีการใหม่ |
|               |                                                                                                                                                                         |              | 9.29                             | 10.68                     | 12.81                        | วิธีการเดิม |
| ชิ้นส่วนที่ 4 |                                                                                                                                                                         |              | 5.63                             | 6.47                      | 7.76                         | วิธีการใหม่ |
|               |                                                                                                                                                                         |              | 11.11                            | 12.77                     | 15.32                        | วิธีการเดิม |
| ชิ้นส่วนที่ 8 |                                                                                                                                                                         |              | 6.67                             | 7.67                      | 9.20                         | วิธีการใหม่ |
|               |                                                                                                                                                                         |              | 10.67                            | 12.27                     | 14.72                        | วิธีการเดิม |
|               |                                                                                                                                                                         |              | 6.90                             | 7.93                      | 9.51                         | วิธีการใหม่ |

ของพนักงานดังตารางที่ 12 เวลามาตรฐานในกระบวนการตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมของชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วน 9 มีค่า 5.16 นาที และ 5.53 นาที สำหรับการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 เวลามาตรฐานกระบวนการตรวจวัดด้วยวิธีการเดิมเป็น 12.81 นาที 15.32 นาที และ 14.72 นาที ตามลำดับ แต่เวลามาตรฐานกระบวนการตรวจวัดด้วยวิธีการใหม่ของชิ้นส่วนที่ 1 เป็น 7.76 นาที ชิ้นส่วนที่ 4 เป็น 9.20 นาที และชิ้นส่วนที่ 8 เป็น 9.51 นาทีซึ่งลดลงจากวิธีการเดิม จากเวลามาตรฐานของวิธีการใหม่ที่ปรับปรุงกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่กล่าวมา เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเดิมแล้ว สามารถลดเวลามาตรฐานของกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์เหล่านี้ได้ค่อนข้างมากดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบเวลามาตรฐานก่อนและหลังปรับปรุงวิธีการตรวจวัดชิ้นส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์

| ชิ้นส่วนที่ | เวลามาตรฐาน<br>(นาทีต่อชิ้น) |                 | ผลต่างของ<br>เวลา<br>มาตรฐาน<br>(นาทีต่อชิ้น) | % ประสิทธิภาพ<br>เวลามาตรฐาน<br>การตรวจวัด<br>ลดลง |
|-------------|------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|             | วิธีการ<br>เดิม              | วิธีการ<br>ใหม่ |                                               |                                                    |
| 3           | 7.27                         | 5.16            | 2.11                                          | 29.02                                              |
| 9           | 6.65                         | 5.53            | 1.12                                          | 16.84                                              |
| 1           | 12.81                        | 7.76            | 5.05                                          | 39.42                                              |
| 4           | 15.32                        | 9.20            | 6.12                                          | 39.94                                              |
| 8           | 14.72                        | 9.51            | 5.21                                          | 35.39                                              |

เมื่อเปรียบเทียบผลต่างของเวลามาตรฐานของกระบวนการตรวจวัดจากตารางที่ 13 เห็นได้ว่าผลต่างของเวลามาตรฐานการตรวจวัดของชิ้นส่วนที่ 3, 9, 1, 4 และชิ้นส่วนที่ 8 เป็น 2.11, 1.12, 5.05, 6.12 และ 5.21 นาที ต่อชิ้น ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพของเวลามาตรฐานการตรวจวัดลดลง 29.02%, 16.84%, 39.42%, 39.94% และ 35.39% ตามลำดับ

#### 4. สรุป

จากการศึกษาและผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่ากระบวนการตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อมชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 9 สามารถตรวจวัดความแข็งแรงจุดเชื่อม

ด้วยเวลามาตรฐานกระบวนการการตรวจวัดชิ้นส่วนได้รวดเร็วขึ้น 5.16 นาทีต่อชิ้น และ 5.53 นาทีต่อชิ้นตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพของเวลามาตรฐานการตรวจวัดลดลงถึง 29.02% และ 16.84% ตามลำดับ เนื่องจากการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการตรวจวัดที่เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นส่วนทั้ง 2 ช่วยให้การตรวจวัดสามารถเข้าถึงตำแหน่งพื้นที่แคบและมีขนาดเล็กที่เป็นครีบนสันและขอบสันส่งผลให้การทำงานได้ง่ายและสะดวก ซึ่งจากการสอบถามการใช้งานของพนักงานฝ่ายตรวจสอบคุณภาพพนักงานมีความพึงพอใจในการปฏิบัติงานที่ง่ายสะดวกและขั้นตอนปฏิบัติงานน้อย อีกทั้งไม่จำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีประสบการณ์สูง สามารถแก้ปัญหาการบดงอหรือหลุดออกจากกันก่อนการนำไปประกอบในขั้นตอนต่อไป

สำหรับกระบวนการตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการตรวจวัดวิธีเดิมด้วยการใช้เวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์กับการตรวจวัดวิธีใหม่ด้วยอุปกรณ์ช่วยตรวจวัดขนาด การตรวจวัดวิธีใหม่ใช้เวลาในการตรวจวัดลดลงเหลือ 7.76 นาที 9.20 นาที และ 9.51 นาที ตามลำดับ เนื่องจากการออกแบบเกจวัดชิ้นส่วนทั้ง 3 ชิ้นส่วนนี้ มีรูปทรงและขนาดพิกัดเผื่อที่เหมาะสมตามที่กำหนดในแบบงาน จึงช่วยให้สามารถนำเกจวัดไปวางในตำแหน่งที่ตรวจวัดแต่ละจุดสำหรับชิ้นส่วนที่ 1 และ ชิ้นส่วนที่ 8 ได้อย่างรวดเร็ว และสวมเลื่อนไปตามตำแหน่งที่กำหนดเพื่อตรวจวัดชิ้นส่วนที่ 4 ทำให้สามารถปฏิบัติงานได้ง่ายและรวดเร็วกว่าวิธีการแบบเดิมในการตรวจวัดขนาด ซึ่งผลจากการตรวจวัดขนาดของชิ้นส่วนดังกล่าวจึงใช้เวลาน้อยกว่ามากจากวิธีการตรวจวัดแบบเดิม ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพของเวลามาตรฐานการตรวจวัดลดลงของชิ้นส่วนที่ 1 ชิ้นส่วนที่ 4 และชิ้นส่วนที่ 8 ถึง 39.42%, 39.94% และ 35.39% ตามลำดับ อีกทั้งไม่จำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีความชำนาญมากในการตรวจวัดก็สามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาผู้ผลิตตู้  
เจียร์เวอร์ที่อนุญาตให้ข้อมูลสำหรับการศึกษานี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปิยะพร บุญชาติ, “การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทอิเล็กทรอนิกส์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, 2559.
- [2] อานนท์ จิตรกร, “การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียกรณีศึกษา โรงงานประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2554.
- [3] รัตติยา ราษฎร์สุข และ ชุมพล ยวงโย, “การปรับปรุงกระบวนการผลิตของโรงงานประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์,” *การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555 17-19 ตุลาคม 2555*, ชะอำ เพชรบุรี, 2555.
- [4] C. Kasemset, P. Pinmanee and P. Umarin, “Application of ECRS and Simulation Techniques in Bottleneck Identification and Improvement: A Paper Package Factory,” *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2014*, Jeju-si, South Korea, 2014.
- [5] ปวีณสุดา ปานอำไพ และ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย, “การลดของเสียผลิตผลิตภัณฑ์คอยล์เย็นในอุตสาหกรรมยานยนต์โดยการประยุกต์ใช้แนวทางของซิกซ์ซิกมา DMAIC,” *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, เล่มที่ 22, ฉบับที่ 12, หน้า 56-64, 2554.
- [6] คลอเคลีย วณะวิชากร, ปานจิต ศรีสวัสดิ์, และ วรัญญ์ ทิพย์โพธิ์, “การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเสียและเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา กรณีศึกษาชุมชนเครื่องปั้นดินเผาปากห้วยวังนอง จังหวัดอุบลราชธานี,” *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ*, เล่มที่ 9, ฉบับที่ 12, หน้า 38-46, 2559.
- [7] เสกสรร ทะนิตะ, “การปรับปรุงประสิทธิภาพของสายการผลิตโครงเบาะรถยนต์โดยใช้เทคนิคการผลิตแบบลีน,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, 2559.
- [8] H. M. Shukla, A. S. Puttevar and S. R. Ikhar, “Design of Jig and Fixtures for Productivity Improvement of Stirrup Making Activity,” *International Journal for Scientific Research & Development*, Vol. 3, No. 12, pp. 138-140, 2015.
- [9] C. C. Okpala and E. Okechukwu C., “The Design and Need for Jigs and Fixtures in Manufacturing,” *Science Research*, Vol. 3, No. 14, pp. 213-219, 2015.
- [10] P. Antil and A. Budhiraja, “A Case Study on Tool & Fixture Modification to Increase The Productivity and to Decrease The Rejection Rate in A Manufacturing Industry,” *International Journal Of Advance Research In Science And Engineering*, Vol. 2, No. 19, pp. 180-188, 2013.
- [11] A. Saptari, W. Soon Lai and M. Rizal Salleh, “Jig Design, Assembly Line Design and Work Station Design and their Effect to Productivity,” *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 5, No. 11, pp. 9-16, 2011.

- [12] T. Yamane, “*Statistics: An Introductory Analysis*”, Third edition, Newyork: Harper and Row Publication, 1973.

# การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์เพื่อเลือกสถานประกอบการปฏิบัติสหกิจศึกษาของนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

## The application of the Analysis Hierarch Process to select the industry in the Cooperative Learning program, Faculty of Engineering, Rajamangala university of Technology Lanna Tak

ปริดา จิวปัญญา\* ศุทธิณี อาชนราภิจ อัมพิกา บุญกิจ

วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

Parida Jewpanya\* Suthasinee Archnarakrit Ampika Boonkrit

Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala university of Technology Lanna Tak

\*Corresponding author Email: parida.jewpanya@gmail.com

(Received: March 10, 2019; Accepted: March 9, 2020)

### บทคัดย่อ

การเลือกสถานประกอบการเพื่อออกปฏิบัติงานสหกิจศึกษาของนักศึกษานั้นเป็นสิ่งสำคัญ เพราะการปฏิบัติงานสหกิจศึกษานั้นถือได้ว่าเป็นการเข้าถึงแหล่งความรู้ประสบการณ์ด้านวิชาชีพก่อนจะก้าวไปสู่โลกแห่งความเป็นจริง ดังนั้น นักศึกษาควรเลือกสถานประกอบการให้ตรงตามความต้องการของตนเอง คณะผู้วิจัยได้ทำการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analysis Hierarch Process: AHP) สำหรับเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเลือกสถานประกอบการที่จะออกปฏิบัติงานสหกิจศึกษาของนักศึกษาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยพิจารณาปัจจัยที่ใช้สำหรับการเลือกสถานประกอบการทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ภูมิภาค สายงาน ประเภทธุรกิจ และสวัสดิการ ผลลัพธ์ของผลการวิเคราะห์ AHP คือ รายชื่อสถานประกอบการที่สอดคล้องกับความต้องการของนักศึกษา การศึกษาใช้ข้อมูลของการออกปฏิบัติงานสหกิจศึกษาของ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก จำนวน 36 คน และมีสถานประกอบการที่ใช้ในการพิจารณาทั้งสิ้น 30 บริษัท แยกออกเป็น 3 ประเภทธุรกิจ ได้แก่ ประเภทผลิตชิ้นส่วน ยานยนต์ ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และผลิตภัณฑ์วิศวกรรม จากนั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการสอบถามความพึงพอใจของนักศึกษาหลังจากที่นักศึกษาแต่ละคนทราบรายชื่อบริษัทตามการวิเคราะห์ AHP พบว่า ร้อยละ 5.56 มีความพึงพอใจระดับปานกลาง ร้อยละ 41.67 มีความพึงพอใจระดับมาก และ ร้อยละ 52.78 มีความพึงพอใจระดับมากที่สุด

**คำสำคัญ:** กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ สหกิจศึกษา สถานประกอบการ

### ABSTRACT

The industry selection in the Cooperative Learning program is very importance for students. This is because the students are able to learn and practice in the real places. Therefore, the students should select the suitable industry. In this research, the application of the Analysis Hierarch Process to select the industry in the Cooperative Learning program is proposed. This method can help to find the industry that suitable for each student by considering 4 decision factors including, location, work filed, business type and welfare. In this research, 36 students and 30 industries are selected as a sample group. The type of industries are auto mobile industry, electronic industry and engineering material industry. The result of this study is a list of industries that suitable for each student. Moreover, 5.56% of students are neutral satisfied with the result. 41.67% of students are satisfied and 52.78% of students are very satisfied.

**Keyword:** Analysis Hierarch Process, Cooperative Learning program, Industry

#### 1. บทนำ

การออกฝึกปฏิบัติการสหกิจศึกษาของนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก มีวัตถุประสงค์ เพื่อให้นักศึกษาได้มีโอกาสเพิ่มทักษะและประสบการณ์วิชาชีพที่เป็นประโยชน์แก่การประกอบอาชีพในอนาคต ช่วยให้นักศึกษามีความรู้ ความเข้าใจ ในการปฏิบัติงานจริง เพื่อให้เกิดทักษะและความสามารถในการทำงานที่ดี สอดคล้องกับความต้องการของตลาดแรงงาน ทั้งในสถานประกอบการ และการประกอบอาชีพอิสระ นักศึกษามีโอกาสได้ใช้เครื่องมือใหม่ ๆ ในสถานประกอบการตลอดจนทราบถึงขั้นตอนปฏิบัติงานและเทคนิคการทำงาน สามารถเห็นวิธีการสร้างสรรค์ผลผลิตที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนั้นยังสร้างความเชื่อมั่นและทัศนคติที่ดีต่ออาชีพ และให้นักศึกษามีมนุษยสัมพันธ์ที่ดีในการปฏิบัติงาน ที่สำคัญเป็นการเสริมสมรรถภาพในการประกอบอาชีพในอนาคตต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ได้เห็นความสำคัญของการฝึกประสบการณ์วิชาชีพให้นักศึกษา จึงบรรจุรายวิชา สหกิจศึกษา เข้าไปในหลักสูตรของนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยนักศึกษาต้องออกฝึกปฏิบัติสหกิจเป็นระยะเวลา 1 ภาค

การศึกษา โดยคุณสมบัติของนักศึกษาที่จะเข้าร่วมโครงการนั้นจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ผ่านการเรียนวิชาชีพตามที่แต่ละสาขาวิชากำหนด มีความรู้ความสามารถและทักษะการปฏิบัติงานร่วมกับผู้อื่นได้ มีความประพฤติเรียบร้อย มีวินัยและการพัฒนาตนเองได้ดีเพียงพอที่จะปฏิบัติงานได้ในสถานประกอบการ

การเลือกสถานประกอบการเพื่อออกปฏิบัติงานสหกิจศึกษาถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับนักศึกษา เพราะการปฏิบัติงานสหกิจศึกษานั้นถือได้ว่าเป็นการเข้าถึงแหล่งความรู้ประสบการณ์ด้านวิชาชีพก่อนจะก้าวไปสู่โลกแห่งการทำงานจริง นักศึกษาควรเลือกฝึกปฏิบัติในสถานประกอบการที่สอดคล้องกับความต้องการในการประกอบอาชีพในอนาคต ควรเหมาะสมกับความถนัดและความชอบของตนเอง ในปัจจุบันการเลือกสถานประกอบการของนักศึกษาส่วนใหญ่จะเลือกตามเพื่อนหรือรุ่นพี่ที่เคยออกปฏิบัติงานสหกิจศึกษา โดยไม่ได้พิจารณาจากความสนใจของตนเองเป็นหลัก จึงเป็นสาเหตุให้อาจก่อให้เกิดการตัดสินใจที่ผิดพลาดในการเลือกสถานประกอบการได้ อีกทั้งอาจส่งผลเสียต่อการออกปฏิบัติงานสหกิจศึกษาของนักศึกษาได้

งานวิจัยชิ้นนี้ได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญในการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analysis Hierarch Process: AHP) ในการตัดสินใจเลือกสถานประกอบการที่จะออกปฏิบัติงานสหกิจศึกษาของนักศึกษา เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจเลือกสถานประกอบการปฏิบัติงานสหกิจศึกษาโดยใช้กรณีศึกษา นักศึกษาสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

## 2. การทบทวนวรรณกรรม

การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) เป็นวิธีการเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาเพื่อหาทางเลือกที่เหมาะสม [1] โดยการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์สามารถได้หลายวิธีเช่น การรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย (Simple Additive Weighting, SAW) กระบวนการวิเคราะห์แบบลำดับชั้น (Analysis Hierarchy Process, AHP) และ TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) เป็นต้น กระบวนการ AHP ได้ถูกคิดค้นเมื่อปลายปี ค.ศ. 1990 โดยศาสตราจารย์โทมัส ซาตตี (Tomas Saaty) [2] AHP ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเพื่อเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด ในหลายปัญหา

พงษ์ธนาศ สมบัติมาก [3] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อทัศนคติในการตัดสินใจซื้อเครื่องจักร งานไม้ของผู้ซื้อที่มีต่อบริษัท ไทยเทควัดแมค จำกัด โดยใช้หลักการทาง AHP เพื่อหาปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจซื้อเครื่องจักรงานไม้ ประกอบไปด้วยปัจจัยด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์ ด้านการบริการของพนักงานขาย และช่างเทคนิค ด้านราคา ด้านส่งเสริมการตลาดและด้านการรับประกัน ศศิณา จันทรเชย [4] ประยุกต์ใช้ AHP เพื่อเลือกทำเลที่ตั้งคลังสินค้า กรณีศึกษาบริษัทจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์หล่อสั่น โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณา 8 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจ โดยการใช้แบบสอบถามไป

ยังผู้มีอำนาจในการตัดสินใจ สรุภฤกษ์ นาทธราดล [5] ได้ใช้ AHP ในการคัดเลือกผู้ส่งมอบ ของอุตสาหกรรมประเภทอิเล็กทรอนิกส์และยานยนต์ เนื่องจากถ้าสามารถคัดเลือกผู้ส่งมอบที่ถูกต้องได้ จะลดต้นทุนการผลิตและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแข่งขัน โดยพิจารณาปัจจัยหลักคือ ผลผลิต ต้นทุนการผลิต และระยะเวลา จากผลการศึกษาทำให้ทราบถึงลำดับความสำคัญของหลักเกณฑ์ต่างๆ โดยในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ให้ความสำคัญกับ คุณภาพ ระยะเวลาการส่งมอบ และราคา ตามลำดับ ส่วนอุตสาหกรรมยานยนต์ให้ความสำคัญกับราคา คุณภาพ และกำลังการผลิต ตามลำดับ สุริยา สุนทรารชุน [6] ทำการศึกษาเกณฑ์การตัดสินใจเลือกผู้ให้บริการจ้างงานเทคโนโลยีสารสนเทศภายนอกของบริษัท ฟูจิตี ซีเอสดีเอ็ม บีสซีเนส (ประเทศไทย) ได้นำโปรแกรม Expert Choice มาวิเคราะห์ข้อมูล ปุณยณัฐ อยู่รอด [7] ได้นำหลักการ AHP มาประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกบริษัทขนส่งเงินที่ดีที่สุดสำหรับธนาคารไทยพาณิชย์

จิระวัฒน์ เอ็มโกษา [8] ใช้เทคนิค AHP ในการตัดสินใจเลือกผู้ผลิตชิ้นส่วนประเภทงานเหล็กขึ้นรูปในโรงงานประกอบรถยนต์ ในปีเดียวกัน จุฑาภรณ์ เชื้อทอง (2554) ประยุกต์ใช้กระบวนการ AHP เพื่อเลือกผู้แทนจำหน่ายคอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊กที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Expert Choice มาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ อนุรัตน์ ต้นบรรจง [9] ได้ประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นในการตัดสินใจเลือกเปลี่ยนเครื่องจักรในกระบวนการผลิตโรงโม่หิน โดยผู้วิจัยทำการศึกษางานวิจัยต่างๆเพื่อออกแบบเกณฑ์ที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาคัดเลือกเครื่องจักร จุฑามาศ อินทร์แก้ว [10] ใช้หลักการ AHP มาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาการตัดสินใจในการเลือกทำเลที่ตั้งโรงงาน โดยงานวิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเลือกทำเลที่ตั้งโรงงาน โดยในการกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจนั้นจะพิจารณาถึงจำนวนของเกณฑ์ที่เหมาะสมพบว่าเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจประกอบด้วย ราคา

ที่ดิน การขนส่ง ต้นทุน ตลาด สังคมและชุมชน และความพร้อมของทำเลที่ตั้ง สำหรับทางเลือกที่จะผ่าน

กันต์ธมน สุขกระจำง [11] ใช้ AHP สำหรับกระบวนการตัดสินใจในการคัดเลือกผู้ให้บริการขนส่งของผลิตภัณฑ์สิ่งทอโดยผลการวิจัยพบว่า ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก คือ ด้านรายละเอียดทั่วไป ด้านคุณภาพ และด้านความสามารถ ของการขนส่งตามลำดับ มานะชัย นันทพิศฐ [12] ได้ทำการประยุกต์ใช้ AHP เพื่อทำการตัดสินใจเลือกผู้รับเหมาระบบซ่อมบำรุงเครื่องจักรในกระบวนการผลิตน้ำดื่มที่เหมาะสม จุฬาลักษณ์ กองเพชร [13] นำเอาเทคนิค AHP และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Expert Choice มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการคัดเลือกบริษัทผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ กรณีศึกษา บริษัทผลิตเลนส์และกล้องถ่ายรูป มนัสชนก บริสุทธิญาณิ และ บุษบา พุกษาพันธุ์รัตน์ [14] ใช้ AHP สำหรับการจัดลำดับอุปสรรค ของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับโซ่อุปทาน และ วรพจน์ พันธุ์คง ธรณี มณีศรี และชวลิต มณีศรี [15] ได้ทำการประเมินเพื่อเลือกทำเลที่ตั้งของโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังของจังหวัดพิษณุโลก

งานวิจัยต่างประเทศ V.Paramasivan, V.Senthil และ N.Rajan Ramasamy [16] ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิง ลำดับชั้นในการคัดเลือกเครื่องมือสิ่ง Evrin Ursavas Guildogan [17] ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นในการคัดเลือกเครื่อง ตัดไม้ กรณีศึกษาบริษัทผลิตป้ายโฆษณากลางแจ้งแห่งหนึ่ง P. Kousalya [18] ประยุกต์ใช้ AHP ในการคัดเลือกนักศึกษาในวิทยาลัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์เพื่อเข้ารับรางวัล All Round Excellence Award. Arvind Jayant [19] ใช้ AHP เพื่อตัดสินใจเลือกกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมประกอบเรือ

### 3. กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analysis Hierarch Process: AHP)

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ AHP นิยมนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสม โดยเป็นการนำทางเลือกที่ตรงตามหลักเกณฑ์ (Criteria) มาเรียงลำดับ เพื่อให้ผู้ใช้ตัดสินใจเลือกสิ่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแก้ไขปัญหาขั้นตอนในการวิเคราะห์เพื่อนำเสนอทางเลือกที่เหมาะสมนั้น มีกรอบแนวคิดตั้งแต่การกำหนดปัญหาจนถึงการเสนอทางเลือก โดยเริ่มต้นจากขั้นตอนแรกซึ่งเป็นการกำหนดปัญหาหรือการระบุปัญหา

กระบวนการ AHP เป็นการนำเอาความคิดนำเอาความรู้สึกร่วมกันเป็น นามธรรมมาหาค่าน้ำหนักโดยใช้ตัวเลขแทนค่าเพื่อให้เห็นเป็นรูปธรรม ซึ่งองค์ประกอบในการตัดสินใจนั้นประกอบไปด้วย เป้าหมายของการตัดสินใจที่ควรกำหนดให้ชัดเจน เกณฑ์ในการตัดสินใจที่ควรมองปัญหาอย่างรอบด้าน ทางเลือกที่ควรกำหนดไว้อย่างเหมาะสม และความเสี่ยงที่โดยปกติแล้วมักมีผลกระทบต่อการตัดสินใจเสมอ

ขั้นตอนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 กำหนดประเด็นปัญหา

การกำหนดประเด็นปัญหา ผู้ตัดสินใจควรกำหนดอย่างสร้างสรรค์ และต้องหาคำตอบที่เกี่ยวกับกับปัญหาให้มากที่สุด อีกทั้งควรพยายามหลีกเลี่ยงสมมติฐานที่ไม่เป็นจริงและระมัดระวังไม่ให้เกิดความลำเอียงกับทางเลือกใดทางเลือกหนึ่ง

#### 3.2 สร้างแผนภูมิลำดับชั้น

แผนภูมิลำดับชั้นเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ช่วยในการตัดสินใจ โดยมีองค์ประกอบทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจที่มีลักษณะเป็นระดับชั้น แต่สำหรับจำนวนระดับชั้นจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของการตัดสินใจซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ระดับชั้นที่ 1 แสดงเป้าหมายของการตัดสินใจ

ระดับชั้นที่ 2 แสดงถึงเกณฑ์การตัดสินใจหลักที่มีผลต่อเป้าหมายในการตัดสินใจนั้น

ระดับชั้นที่ 3 แสดงถึงเกณฑ์ย่อยของการตัดสินใจซึ่งจะมีจำนวนเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับความชัดเจนของเกณฑ์หลัก

ส่วนระดับชั้นล่างสุดหรือระดับชั้นสุดท้ายคือทางเลือกที่เราจะนำมาพิจารณาผ่านเกณฑ์การตัดสินใจตามที่เรากำหนดไว้

### 3.3 คำนวณลำดับความสำคัญของเกณฑ์ในการตัดสินใจและการหาค่าน้ำหนักเกณฑ์

การจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์ในการตัดสินใจจะทำได้โดยการเปรียบเทียบแบบคู่ (Pairwise Comparison) มาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือมาตรฐานมูลฐาน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ระดับความสำคัญ (Preference Level)

| ระดับความสำคัญ<br>(Preference Level) | ค่าแสดงเป็นตัวเลข<br>(Numerical Value) |
|--------------------------------------|----------------------------------------|
| เท่ากัน                              | 1                                      |
| เท่ากันถึงปานกลาง                    | 2                                      |
| ปานกลาง                              | 3                                      |
| ปานกลางถึงค่อนข้างมาก                | 4                                      |
| ค่อนข้างมาก                          | 5                                      |
| ค่อนข้างมากถึงมากกว่า                | 6                                      |
| มากกว่า                              | 7                                      |
| มากกว่าถึงมากที่สุด                  | 8                                      |
| มากที่สุด                            | 9                                      |

การเปรียบเทียบคู่ทุกครั้งจะดำเนินการโดยใส่ในตารางเมตริกซ์ โดยค่าของลำดับความสำคัญจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j}{w_i} \right\} \quad (1)$$

โดยที่  $\lambda_{\max}$  คือแกนหลักของ Eigenvector  
 $n$  คือขนาดของเมตริกซ์  
 $a_{ij}$  คือ องค์ประกอบของการเปรียบเทียบเป็นคู่  
 $w_i$  คือค่า Eigenvector ขององค์ประกอบที่  $i$

### 3.5 การตรวจสอบความสอดคล้องกันของเหตุผล

การตรวจสอบความสอดคล้องกันสามารถประเมินได้จากการคำนวณ อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: CR) ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างดัชนีความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency Index: CI) และดัชนีความสอดคล้องของข้อมูลโดยการสุ่มตัวอย่าง (Random Consistency Index: RI)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = CI/RI \quad (3)$$

โดย RI แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ดัชนีความสอดคล้องของข้อมูลโดยการสุ่มตัวอย่าง

| N  | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|----|---|---|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0.52 | 0.89 | 1.11 | 1.25 | 1.35 | 1.40 |

## 4. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

### 4.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูล

งานวิจัยขั้นนี้ได้คัดเลือกสถานประกอบการสำหรับการปฏิบัติงานสหกิจศึกษา ของสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ทั้งสิ้น 30 บริษัท โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภทธุรกิจ ได้แก่ 1) บริษัทผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

จำนวน 15 บริษัท 2) บริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 10 บริษัท 3) บริษัทผลิตวัสดุอุตสาหกรรมจำนวน 5 บริษัท และมีที่ตั้งกระจายอยู่ 4 ภาคของประเทศไทยคือ ภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก

#### 4.2 การออกแบบโครงสร้างการวิเคราะห์ AHP

การสร้างแผนภูมิลำดับชั้นของการวิเคราะห์เพื่อเลือกสถานประกอบการของนักศึกษาที่มีโครงสร้างของแผนภูมิลำดับชั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ระดับชั้นที่ 1 คือเป้าหมายเพื่อเลือกสถานประกอบการสำหรับปฏิบัติการสหกิจของนักศึกษา

ระดับชั้นที่ 2 คือเกณฑ์การตัดสินใจหลัก ที่มีผลต่อเป้าหมายในการตัดสินใจ แบ่งออกเป็น 4 เกณฑ์ คือ

1) ภูมิภาค เป็นเกณฑ์ที่กล่าวถึงภูมิภาคตำแหน่งที่ตั้งของสถานประกอบการ

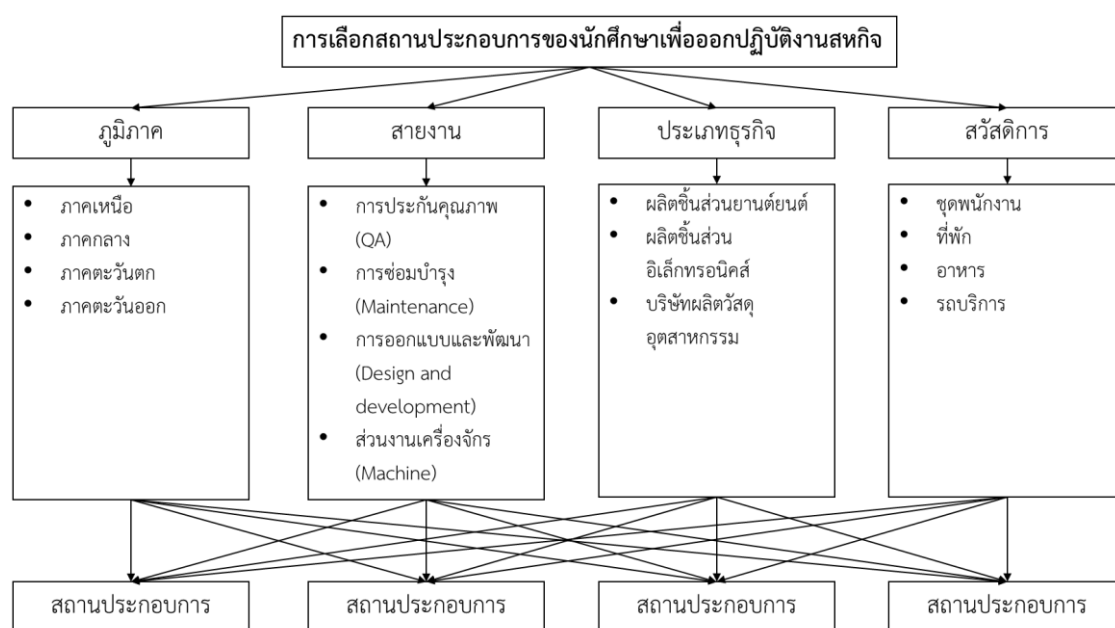
2) สายงาน ส่วนงานในสถานประกอบการที่นักศึกษาสามารถเข้าไปฝึกปฏิบัติงานสหกิจศึกษาได้

3) ประเภทธุรกิจ คือลักษณะของสถานประกอบการว่าประกอบธุรกิจประเภทใด

4) สวัสดิการ คือปัจจัยสนับสนุนที่สถานประกอบการมีให้แก่ นักศึกษาสหกิจศึกษา

ระดับชั้นที่ 3 คือเกณฑ์ย่อยของการตัดสินใจ แสดงในรูปที่ 1

ระดับชั้นสุดท้ายคือสถานประกอบการที่เราจะนำมาพิจารณาผ่านเกณฑ์การตัดสินใจตามที่เรากำหนดไว้



รูปที่1 แผนภูมิลำดับชั้นของการเลือกสถานประกอบการ

#### 4.3 การจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์หลักและเกณฑ์ย่อยของการเลือกสถานประกอบการของนักศึกษา

ในการคำนวณน้ำหนักความสำคัญของทางเลือกโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ลำดับเชิงชั้น AHP ของนักศึกษา สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของ

นักศึกษาและส่วนของผู้วิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 2 โดยดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 นักศึกษาตัดสินใจเลือกความสำคัญของปัจจัยหลักในระดับชั้นที่ 2 โดยต้องทำการตัดสินใจโดยเรียงลำดับความสำคัญของเกณฑ์ในการเลือกสถานประกอบการเพื่อออกปฏิบัติการสหกิจ จากมากที่สุดไปหาลำดับต่ำสุด ยกตัวอย่างเช่น นักศึกษาที่ 1 เลือกให้

ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2563

ภูมิภาค มีความสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือ สายงาน  
สวัสดิการ และประเภทธุรกิจตามลำดับ

ผู้วิเคราะห์จะนำผลการเลือกของนักศึกษาแต่ละ  
ลำดับมาทำการเปรียบเทียบและกำหนดค่าตัวเลขตาม  
ตารางที่ 3

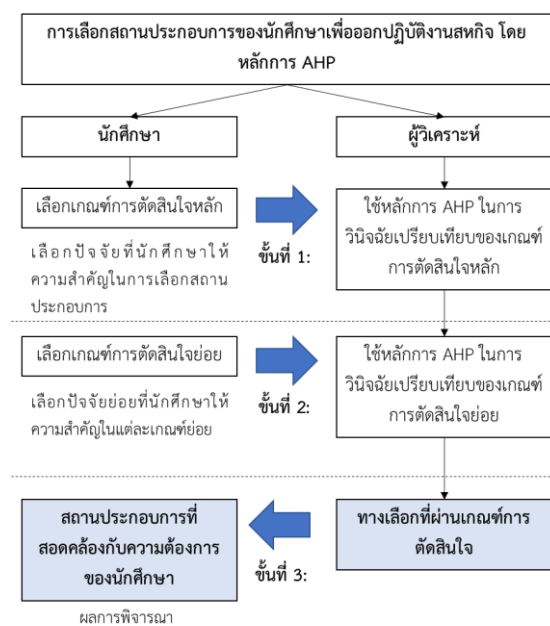
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์

| เป้าหมาย   | ลำดับที่ 1 | ลำดับที่ 2 | ลำดับที่ 3 | ลำดับที่ 4 |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| ลำดับที่ 1 | 1          | 3          | 5          | 7          |
| ลำดับที่ 2 | 1/3        | 1          | 3          | 5          |
| ลำดับที่ 3 | 1/5        | 1/3        | 1          | 3          |
| ลำดับที่ 4 | 1/7        | 1/5        | 1/3        | 1          |
| ผลรวม      | 1.68       | 4.53       | 9.33       | 16         |

จากตารางสามารถคำนวณค่าความสอดคล้อง C.R.  
ได้ 0.07 ซึ่งถือว่าข้อมูลมีความสอดคล้อง

ขั้นที่ 2 นักศึกษาตัดสินใจเลือกความสำคัญของ  
ปัจจัยย่อยในระดับขั้นที่ 3 โดยเลือกลำดับความสำคัญ  
จากมากที่สุดไปหาลำดับต่ำสุด จากนั้นผู้วิเคราะห์จะนำ  
ผลการเลือกของนักศึกษามาทำการเปรียบเทียบและ  
กำหนดค่าตัวเลขตามตารางที่ 3 เช่นเดียวกับเกณฑ์หลัก

ในระดับขั้นสุดท้ายคือสถานประกอบการที่นำมาใช้  
ในการตัดสินใจมีทั้งสิ้น 30 บริษัท



รูปที่ 2 ขั้นตอนการพิจารณาเลือกสถานประกอบการ

ขั้นที่ 3 ผู้วิเคราะห์ดำเนินการคำนวณตามหลักการ  
ของ AHP เพื่อหาลำดับความสำคัญของทางเลือก

#### 4.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ

AHP ในการเลือกสถานประกอบการของ  
นักศึกษา

ตัวอย่างนักศึกษาที่ 1 ได้ให้ลำดับความสำคัญของ  
ปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลำดับความสำคัญของปัจจัย ของตัวอย่าง  
นักศึกษาที่ 1

| ลำดับ | 1          | 2           | 3          | 4                          |
|-------|------------|-------------|------------|----------------------------|
|       | ภูมิภาค    | สายงาน      | สวัสดิการ  | ประเภทธุรกิจ               |
| 1     | ตะวันออก   | QA          | ที่พัก     | ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์        |
| 2     | ภาคตะวันตก | Maintenance | อาหาร      | ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ |
| 3     | ภาคเหนือ   | Design      | รถบริการ   | ผลิตวัสดุวิศวกรรม          |
| 4     | ภาคกลาง    | Machine     | ชุดพนักงาน |                            |

จากลำดับความสำคัญของตัวอย่างนักศึกษาที่ 1  
ในตารางที่ 4 และใช้การเปรียบเทียบเชิงตัวเลขของ  
ความสำคัญของเกณฑ์ตามตารางที่ 2 สามารถคำนวณ  
ค่าน้ำหนัก และอัตราส่วนความสอดคล้องได้ดังตารางที่ 5  
ตารางที่ 5 การจัดลำดับหลักเกณฑ์หลักและหลักเกณฑ์  
ย่อยของตัวอย่างนักศึกษาที่ 1

| เกณฑ์หลัก    | น้ำหนัก | เกณฑ์ย่อย                  | น้ำหนัก |
|--------------|---------|----------------------------|---------|
| ภูมิภาค      | 0.56    | ตะวันออก                   | 0.56    |
|              |         | ภาคตะวันตก                 | 0.26    |
|              |         | ภาคเหนือ                   | 0.12    |
|              |         | ภาคกลาง                    | 0.06    |
| สายงาน       | 0.26    | QA                         | 0.56    |
|              |         | Maintenance                | 0.26    |
|              |         | Design                     | 0.12    |
|              |         | Machine                    | 0.06    |
| สวัสดิการ    | 0.12    | ที่พัก                     | 0.56    |
|              |         | อาหาร                      | 0.26    |
|              |         | รถบริการ                   | 0.12    |
|              |         | ชุดพนักงาน                 | 0.06    |
| ประเภทธุรกิจ | 0.06    | ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์        | 0.63    |
|              |         | ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ | 0.26    |
|              |         | ผลิตวัสดุวิศวกรรม          | 0.11    |

จากนั้นดำเนินการเปรียบเทียบลำดับขั้นที่ 4 คือ ลำดับขั้นสุดท้ายสำหรับการเลือกสถานประกอบการ โดยมีจำนวนสถานประกอบการที่นำมาพิจารณาทั้งสิ้น 30 บริษัท การพิจารณาในลำดับนี้ ได้พิจารณาความสำคัญของแต่ละสถานประกอบการจากปัจจัยย่อยทั้งหมดที่มีในลำดับขั้นที่ 3 จำนวน 15 ปัจจัย

การเปรียบเทียบของสถานประกอบการ เช่น ในเกณฑ์หลักด้านภูมิภาค เกณฑ์ย่อยคือภาคตะวันออก ยกตัวอย่าง สถานประกอบการ A ตั้งอยู่ภาคตะวันออก สถานประกอบการ B ตั้งอยู่ภาคตะวันตก และสถานประกอบการ C ตั้งอยู่ภาคเหนือ การเปรียบเทียบในระดับนี้ จะกำหนดค่าตัวเลขให้ สถานประกอบการ A มีความสำคัญมากกว่า สถานประกอบการ B และ สถานประกอบการ C แต่เมื่อเทียบระหว่าง B และ C จะมีความสำคัญเท่ากัน พิจารณากำหนดตัวเลขลำดับความสำคัญโดยใช้หลักเกณฑ์นี้ในทุกสถานประกอบการ

แบบกรอกข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกสถานประกอบการเพื่อปฏิบัติงานสหกิจศึกษาของนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วัตถุประสงค์: เพื่อใช้สำหรับการตัดสินใจเลือกสถานประกอบการเพื่อปฏิบัติงานสหกิจศึกษาของนักศึกษา

- ปัจจัยที่นักศึกษาเห็นว่ามีความสำคัญในการเลือกสถานประกอบการเพื่อปฏิบัติงานสหกิจศึกษา (เรียงลำดับจากมากไปน้อย 4 อันดับ)
- ปัจจัยด้านภูมิภาค: ภูมิภาคใดที่นักศึกษาสนใจเลือกเพื่อปฏิบัติงานสหกิจศึกษามากที่สุด (เรียงลำดับจากมากไปน้อย 4 อันดับ)
- ปัจจัยด้านสาขา: สาขานี้ใดที่นักศึกษาสนใจเลือกเพื่อปฏิบัติงานสหกิจศึกษามากที่สุด (เรียงลำดับจากมากไปน้อย 4 อันดับ)
- ปัจจัยด้านประเภทธุรกิจ: ประเภทธุรกิจใดที่นักศึกษาสนใจเลือกเพื่อปฏิบัติงานสหกิจศึกษามากที่สุด (เรียงลำดับจากมากไปน้อย 3 อันดับ)
- ปัจจัยด้านสวัสดิการ: สาขานี้ใดที่นักศึกษาสนใจเลือกเพื่อปฏิบัติงานสหกิจศึกษามากที่สุด (เรียงลำดับจากมากไปน้อย 4 อันดับ)

[ ] ภูมิภาค [ ] สาขาน [ ] ประเภทธุรกิจ [ ] สวัสดิการ

[ ] ภาคเหนือ [ ] ภาคตะวันออก [ ] ภาคตะวันตก [ ] ภาคตะวันออก

[ ] การประกันคุณภาพ [ ] งานซ่อมบำรุง [ ] การออกแบบและพัฒนา [ ] ส่วนงานเครื่องจักร

รูปที่ 3 แบบกรอกข้อมูลของนักศึกษา

## 5. ผลการดำเนินการวิจัย

เมื่อได้วิธีการ AHP สำหรับการคัดเลือกสถานประกอบการเพื่อออกปฏิบัติงานสหกิจเรียบร้อยแล้ว คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดทำแบบกรอกข้อมูลเพื่อให้นักศึกษาที่จะออกปฏิบัติงานสหกิจได้เลือกลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัย แสดงในรูปที่ 3 โดยได้ทำการเก็บข้อมูลนักศึกษาที่จะออกปฏิบัติงานสหกิจในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2562 จำนวน 36 คน เป็นนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ลำดับต่อไปผู้วิจัยในฐานะผู้วิเคราะห์ได้นำข้อมูลที่ได้จากแบบกรอกข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหาสถานประกอบการที่ตรงตามความสนใจและความต้องการของนักศึกษาแต่ละคน โดยใช้หลักการ AHP และแจ้งผลการวิเคราะห์เป็นรายชื่อสถานประกอบการให้นักศึกษาทราบเพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจต่อไป

ซึ่งจากการกรอกข้อมูลของนักศึกษาพบว่า นักศึกษาให้ความสำคัญเป็นอันดับแรกของแต่ละปัจจัย โดยนักศึกษาร้อยละ 56 ให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านสายงานในการเลือกสถานประกอบการ รองลงมาคือประเภทธุรกิจและสวัสดิการ รายละเอียดด้านปัจจัยอื่นๆ แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการกรอกข้อมูลลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยในการเลือกสถานประกอบการ

| ปัจจัย                                                     | รายละเอียด          | จำนวนร้อยละของนักศึกษา |
|------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|
| ปัจจัยที่นักศึกษาเห็นว่ามีความสำคัญในการเลือกสถานประกอบการ | ภูมิภาค             | 0                      |
| สายงาน                                                     | 56                  |                        |
| ประเภทธุรกิจ                                               | 25                  |                        |
| สวัสดิการ                                                  | 19                  |                        |
| ปัจจัยด้านภูมิภาค                                          | ภาคเหนือ            | 8                      |
| ภาคกลาง                                                    | 36                  |                        |
| ภาคตะวันตก                                                 | 3                   |                        |
| ภาคตะวันออก                                                | 53                  |                        |
| ปัจจัยด้านสายงาน                                           | การประกันคุณภาพ     | 50                     |
| งานซ่อมบำรุง                                               | 14                  |                        |
| การออกแบบและพัฒนา                                          | 28                  |                        |
| ส่วนงานเครื่องจักร                                         | 8                   |                        |
| ปัจจัยด้านประเภทธุรกิจ                                     | ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ | 44                     |
| ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์                                 | 19                  |                        |
| ผลิตวัสดุวิศวกรรม                                          | 36                  |                        |
| ปัจจัยด้านสวัสดิการ                                        | ชุดพนักงาน          | 0                      |
| ที่พัก                                                     | 78                  |                        |
| อาหาร                                                      | 6                   |                        |
| รถบริการ                                                   | 17                  |                        |

จากนั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการสอบถามความพึงพอใจของนักศึกษาหลังจากที่นักศึกษาแต่ละคนทราบรายชื่อบริษัทตามการวิเคราะห์ AHP พบว่า ร้อยละ 5.56 มีความพึงพอใจระดับปานกลาง ร้อยละ 41.67 มีความพึงพอใจระดับมาก และ ร้อยละ 52.78 มีความพึงพอใจระดับมากที่สุด

## 6. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process : AHP) สำหรับการตัดสินใจเลือกสถานประกอบการในการออกปฏิบัติงานสหกิจในโครงการสหกิจศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยพิจารณาทั้งหมด 4 ลำดับชั้น โดยลำดับชั้นที่ 1 จะแสดงเป้าหมายที่ต้องการทำการตัดสินใจ ลำดับชั้นที่ 2 จะมี 4 ปัจจัย คือ ภูมิภาค สายงาน ประเภทธุรกิจ และสวัสดิการ ต่อมาลำดับชั้นที่ 3 จะเป็นการแสดงถึงเกณฑ์ย่อยที่มีผลต่อปัจจัยหลัก และลำดับชั้นที่ 4 ทางเลือกที่เราจะนำมาพิจารณาผ่านเกณฑ์การตัดสินใจตามที่เรากำหนดไว้

จากนั้นจะทำการทดลองโดยทำแบบกรอกข้อมูลเพื่อให้นักศึกษาที่กำลังจะออกปฏิบัติงานสหกิจศึกษาได้ทำการกรอกความต้องการในการเลือกสถานประกอบการและนำไปวิเคราะห์โดยใช้หลักการ AHP ผลปรากฏว่าการคำนวณน้ำหนักความสำคัญของการประยุกต์ใช้ AHP แสดงชื่อสถานประกอบการที่เป็นที่พึงพอใจกับนักศึกษา

งานวิจัยชิ้นนี้มีประโยชน์กับนักศึกษาเนื่องจากทำให้นักศึกษามีแนวทางในการตัดสินใจเลือกสถานประกอบการปฏิบัติงานสหกิจศึกษาที่เหมาะสมกับตนเอง อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้การจัดการในรายวิชาสหกิจมีประสิทธิภาพมากขึ้นเพราะนักศึกษาจะทราบข้อมูลเบื้องต้นทำให้เกิดการตัดสินใจที่เร็วขึ้น ช่วยลดเวลาในการดำเนินการ

เพื่อให้การใช้ประโยชน์อย่างเต็มประสิทธิภาพและง่ายมากยิ่งขึ้น ควรมีโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการ

กรอกข้อมูลของนักศึกษา และการแสดงผลการวิเคราะห์จากวิธีการ AHP

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาพร โอภาสานนท์, “การตัดสินใจแบบพิจารณาหลายเกณฑ์,” *วารสารบริหารธุรกิจ*, vol. 140, pp. 5-9, 2556.
- [2] T.L. Saaty, “How to make a decision: The analytic hierarchy process,” *European Journal of Operation.*, vol. 48, pp. 2-26, 1990.
- [3] พงษ์ธเนศ สมบัติมาก, “ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อทัศนคติในการตัดสินใจซื้อเครื่องจักรงานไม้ของผู้ซื้อ (ลูกค้า) ที่มีต่อบริษัท ไทยเท็คควัดแมค จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2548.
- [4] ศศิณา จันทรไชย, “การเลือกทำเลที่ตั้งคลังสินค้าโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ กรณีศึกษาบริษัทจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์หล่อลื่น”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาการจัดการโลจิสติกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.
- [5] สุรภฤกษ์ นาทธราดล, “การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือในการคัดเลือกผู้ส่งมอบของอุตสาหกรรมยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.
- [6] สุริยา สุนทรารชุน, “การศึกษาเกณฑ์การตัดสินใจเลือกผู้ให้บริการจ้างงานเทคโนโลยีสารสนเทศภายนอกโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น กรณีศึกษาบริษัท ฟุจิตสึ ซีเอส เติม บีสซีเนส (ประเทศไทย) จำกัด”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิทยาการจัดการ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2552.

- [7] ปุณณช อุรอต, “การประยุกต์ใช้วิธีการ AHP ในการคัดเลือกบริษัทขนส่ง: กรณีศึกษาธนาคารไทยพาณิชย์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาการจัดการโซ่อุปทานแบบบูรณาการ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 2552.
- [8] จุฑาภรณ์ เชื้อทอง, “การประยุกต์ใช้กระบวนการ AHP เพื่อเลือกผู้แทนจำหน่ายคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่เหมาะสม”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาการจัดการวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 2552.
- [9] อนุรัตน์ ต้นบรรจง, “การตัดสินใจเลือกเปลี่ยนเครื่องจักรในกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิตของโรงงานโดยการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.
- [10] จุฑามาศ อินทร์แก้ว, “การวิเคราะห์ปัจจัยการเลือกทำเลที่ตั้งสาขา กรณีศึกษา หจก. เอสเอสคำไม้ จังหวัดสุราษฎร์ธานี”, วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 2556.
- [11] กันต์ธมน สุขกระจ่าง, “การประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นของกระบวนการตัดสินใจในการคัดเลือกผู้ให้บริการขนส่งของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ : บริษัทกรณีศึกษา”. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพวงศ์*, vol. 1, pp. 1-11, 2558.
- [12] มานะชัย นันทพิสิฐ, “กระบวนการสนับสนุนการตัดสินใจในการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตน้ำดื่มด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการรีโทรฟิตและกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น”, วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2558.
- [13] จุฬาลักษณ์ กองเพชร, “การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการคัดเลือกบรรจุภัณฑ์ของบริษัทผลิตเลนส์และกล้องถ่ายรูป”, วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2559.
- [14] มนัสชนก บริสุทธิญาณิ และ บุษบา พุกษาพันธ์รัตน์, “การใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์สำหรับการจัดลำดับอุปสรรค ของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับโซ่อุปทาน”, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, vol. 2, pp. 26-38, 2559.
- [15] วรพจน์ พันธุ์คง ธรณี มณีศรี และชวลิต มณีศรี, “การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น สำหรับการประเมินทำเลที่ตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล”. *วารสารลาดกระบัง*, Vol. 34, No. 2, 2560.
- [16] Evrim Ursavas Guldogan, “An integrated approach to machine selection and operation Allocation problem”, Master's Thesis. Department of Industrial Engineering, Yasar University, 2011.
- [17] V. Paramasivam, V.Senthil and NRajam Ramasamy, “Decision making in equipment selection: an Integrated approach with digraph and matrix approach, AHP and ANP”, Master's Thesis. Department of Mechanical Engineering, PSNA College of Engineering and Technology, 2010.
- [18] P. Kousalya et al. “Analytical Hierarchy Process approach – An application of engineering education”, *Mathematica Aeterna*, Vol. 2, no. 10, pp. 861 – 878, 2012

[19] J. Arvind and S. Mandeep, “ Use of analytic hierarchy process (AHP) to select welding process in high pressure vessel manufacturing environment”, *International Journal of Applied*

*Engineering Research*, Vol. 10, pp. 5869-5884, 2015

## จลนศาสตร์การปลดปล่อยของวิตามินบี 2 จากเม็ดเจลอัลจิเนตร่วมกับเวย์โปรตีนหรือ แซนแทนกัม

### Release Kinetic of Riboflavin from Composite Gel Beads Consisting of Alginate Incorporated with Whey Protein or Xanthan Gum

สวรักษ์ จันทรเทพธิมากุล และ สุกัญญา วิชชุกิจ\*

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เลขที่ 1 ถนนมาลัยแมน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน นครปฐม 73140

Savarak Chantaratheptimakul and Sukanya Wichchukit\*

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University

1 Malaiman Rd. Kamphaeng Saen Subdistrict, Kamphaeng Saen District, Nakorn-pathom, 73140

\*Corresponding author Email: fengskw@ku.ac.th

(Received: February 5, 2020; Accepted: March 20, 2020)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การปลดปล่อยวิตามินบี 2 ในสารละลายจำลองน้ำย่อยในกระเพาะ และสารละลายจำลองน้ำย่อยในลำไส้ จากไฮโดรเจลในรูปเม็ดเจลที่มีโครงสร้างประกอบด้วย อัลจิเนต 100% อัลจิเนต 62% ร่วมกับโปรตีนเวย์ 38% อัลจิเนต 50% ร่วมกับเวย์โปรตีน 50% อัลจิเนต 62% ร่วมกับแซนแทนกัม 38% และอัลจิเนต 50% ร่วมกับแซนแทนกัม 50% โดยมีสารเชื่อมข้ามเป็นแคลเซียมคลอไรด์ร่วมกับไคโตซานในปริมาณไคโตซาน 0% 0.25% และ 0.5% พบว่าอัลจิเนต 100% ให้การขึ้นรูปของเม็ดเจลดี มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ การมีเวย์โปรตีนและแซนแทนกัมเป็นองค์ประกอบร่วมกับอัลจิเนตและการเชื่อมข้ามร่วมกับไคโตซาน มีผลให้กักเก็บวิตามินบี 2 ได้ดีขึ้นและปลดปล่อยช้าลง เมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองการปลดปล่อย 7 แบบ พบว่าการปลดปล่อยทางจลนศาสตร์สามารถอธิบายด้วยแบบจำลอง Higuchi model Korsmeyer-Peppas model และ Weibull model แสดงให้เห็นว่ากลไกการปลดปล่อยของพอลิเมอร์ เกิดการแพร่ร่วมกับการสึกกร่อนของโครงสร้างไฮโดรเจล

**คำสำคัญ:** จลนศาสตร์การปลดปล่อย การเชื่อมข้าม เม็ดเจลอัลจิเนต วิตามินบี 2

#### ABSTRACT

This research aimed to study the release of riboflavin from composite hydrogel beads in simulated gastric fluid (SGF) and simulated intestinal fluid (SIF). The combinations of gel bead were 100% alginate, 62% alginate and 38% whey protein, 50% alginate and 50% whey protein, 62% alginate and 38% xanthan gum and 50% alginate and 50% xanthan gum. The cross linking solutions were mixtures of calcium chloride with 0%, 0.25% and 0.5% chitosan. The result showed that 100% alginate beads elicited good forming with homogeneous size and shape. Adding whey protein and xanthan gum to alginate improved riboflavin captivation and slow release. Comparison of fitting with 7 release models, release kinetics of the beads could be explained by Higuchi model, Korsmeyer-Peppas model, and Weibull model. The release mechanism was governed by a combination of diffusion and bead erosion.

**Keyword:** release kinetic, cross linkage, alginate bead, riboflavin.

## 1. บทนำ

นิยามของอาหารเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา ในปัจจุบัน อาหารไม่เพียงแต่เป็นสิ่งที่จำเป็นชีวิต ให้พลังงาน และส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตของร่างกาย แต่ต้องป้องกันโรค เสริมสร้างสุขภาพกายและจิตด้วย อาหารฟังก์ชันจึงเข้ามามีบทบาทต่อการบริโภค กระบวนการเอนแคปซูเลชันเป็นเทคโนโลยีที่เข้ามาในการทำผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพ เพื่อการปกป้องและนำส่งสารสำคัญที่จำเป็นต่อสุขภาพเข้าสู่ร่างกายให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด [1]

ไฮโดรเจลเป็นเจลโครงข่ายพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับน้ำได้สูง และสามารถคงตัวอยู่ในสารละลายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบได้ โดยสมบัตินี้เกิดจากการเชื่อมข้ามของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นส่วนประกอบหลัก ไฮโดรเจลจึงเป็นที่นิยมใช้ห่อหุ้มสารสำคัญหลากหลายชนิดด้วยกระบวนการเอนแคปซูเลชัน นำส่งสารเหล่านี้ไปปลดปล่อยที่อวัยวะเป้าหมายในร่างกาย เพื่อผลทางการรักษาและการเสริมสุขภาพ [2]

การออกแบบไฮโดรเจลที่เหมาะสมเพื่อการปกป้องสารสำคัญในระหว่างทางของการนำส่งถือเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากปัจจัยภายนอกในร่างกายเช่น ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ออกซิเจน และแสงแล้ว ยังมีปัจจัยภายในร่างกายในขณะลำเลียงผ่านระบบทางเดินอาหาร เช่น ความเป็นกรดต่าง และเอนไซม์ ร่วมด้วย โดยเฉพาะในกระเพาะอาหาร ซึ่งมีสภาวะเป็นกรด ( $\text{pH} < 2$ ) และมีเอนไซม์เพปซิน ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อความคงตัวของไฮโดรเจล [3], [4]

อัลจินเตเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ธรรมชาติที่นิยมใช้ในการทำไฮโดรเจล เป็นสารสกัดจากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ประจุลบ ประกอบด้วยกรดแมนนูโรนิก และกรดกลูคูโรนิกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ สามารถเกิดเจลในสารละลายที่มีไอออนประจุบวก 2 โดยอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตระหว่างกรดกลูคูโรนิกกับไอออนบวก เกิดการเชื่อมข้าม เกิดโครงสร้าง egg-box เป็นโครงข่ายไฮโดรเจลขึ้น [5] ไฮโดรเจลจากอัลจินเตมีรูปทรงกลมสามารถกักเก็บน้ำได้ดี มีผิวเรียบ และใส อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าอัลจินเตให้การปลดปล่อยสารสำคัญในระหว่างทางรวดเร็วเกินไป ดังนั้น จึงมีการศึกษาพัฒนาไฮโดรเจลอัลจินเตร่วมกับพอลิแซ็กคาไรด์และสารธรรมชาติอื่น ๆ เพื่อเป้าหมายการปลดปล่อยแบบทยอย (sustain release)

เวย์โปรตีนแบบไอโซเลทซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากผลพลอยได้ในการผลิตเนยแข็ง เป็นที่นิยมในการนำมาเป็น

องค์ประกอบร่วมในการผลิตไฮโดรเจล ประกอบด้วยโปรตีน 90% โดย 75% เป็น เบต้า แลคโตโกลบูลินและ 15% เป็น แอลฟา แลคตาลบูมิน สามารถเกิดเจลแบบ “cold gelation” โดยการให้โปรตีนเสียสภาพด้วยความร้อน เมื่อสารละลายเวย์โปรตีนได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 70-80°C โปรตีนจะเกิดการตกตะกอน เมื่อเย็นตัวลงสามารถนำไปขึ้นรูปเจลด้วยสารละลายที่มีไอออนประจุบวก 2 โดยวิธีการเช่นเดียวกับอัลจินเต [3], [6], [7] เมื่อทำงานร่วมกับอัลจินเต พบว่าเวย์โปรตีนทำให้การปลดปล่อยสารสำคัญช้าลง [8] และสามารถปกป้องให้โครงสร้างเสียการคงตัวในสารละลายน้ำย่อยจำลองในกระเพาะ ทำให้การสูญเสียสารสำคัญในระหว่างทางก่อนการปลดปล่อยในลำไส้เล็กน้อยลง [3], [9]

แซนแทนกัมเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ธรรมชาติที่ได้จากแบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* NRRL B-1459 มีโครงสร้างหลักเป็นน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลแมนโนส และกรดกลูคูโรนิก มีสมบัติละลายน้ำได้ดีและทำให้เกิดความหนืด จึงนิยมใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดและสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร [10] เมื่อทำงานร่วมกับอัลจินเต แซนแทนกัมทำให้โครงสร้างไฮโดรเจลมีความหนืดเพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มสมรรถนะการดูดซับน้ำและการบวมตัวของไฮโดรเจล ทำให้การปลดปล่อยสารสำคัญเป็นไปอย่างช้า ๆ [11]

โคโตซานเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ธรรมชาติสกัดจากเปลือกสัตว์น้ำ เป็นอนุพันธ์ของไคติน ประกอบด้วยหมู่อะมิโนและไฮดรอกซิล สามารถละลายน้ำได้ดีและมีประจุบวก นิยมใช้ในการนำส่งยาและสารชีวภาพ [12] เมื่อทำงานร่วมกับอัลจินเตและแซนแทนกัม พบว่าไฮโดรเจลที่ได้สามารถกักเก็บแบคทีเรียให้มีชีวิตอยู่ได้นานในสภาวะ 4 – 90°C ได้ และสามารถทนต่อสภาวะกรดในกระเพาะอาหารอีกด้วย โครงสร้างนี้มีแนวโน้มที่จะใช้ประโยชน์ในการกักเก็บโปรไบโอติกส์ได้ [13]

การศึกษาจลนศาสตร์การปลดปล่อยของสารสำคัญ (release kinetic) จากไฮโดรเจล โดยเฉพาะในสภาวะจำลองความเป็นไปในร่างกาย (*in vitro* release) ทำให้เข้าใจกลไกการทำงานของสารปลดปล่อยสาร การอธิบายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทำให้เข้าใจง่ายยิ่งขึ้น ค่าพารามิเตอร์ในสมการจะสามารถบอกถึงลักษณะการปลดปล่อยสารของโครงสร้างไฮโดรเจลนั้น ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการการออกแบบหรือเลือกใช้โครงสร้างไฮโดรเจลให้เหมาะสมกับสารสำคัญ เพื่อประโยชน์ในการนำส่งปลดปล่อย และดูดซึมในร่างกายอย่างเหมาะสม [14]-[16]

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การปลดปล่อยไรโบฟลาวินหรือวิตามินบี 2 จากไฮโดรเจลในรูปแบบเม็ดเจลที่มีโครงสร้างประกอบด้วยอัลจิเนต อัลจิเนต และเวย์โปรตีน อัลจิเนตและแซนแทนกัม โดยใช้สารเชื่อมข้ามเป็นแคลเซียมคลอไรด์ที่แปรปริมาณโคโตซาน 0–0.5% ในสารละลายตัวกลาง 2 ชนิดคือ สารละลายน้ำย่อยจำลองในกระเพาะ (SGF) และสารละลายน้ำย่อยจำลองในลำไส้เล็ก (SIF) ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบเม็ดเจลในการห่อหุ้มวิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญต่อสุขภาพ ในรูปแบบผลิตภัณฑ์อาหารฟังก์ชันต่อไป

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 การเตรียมเม็ดเจล

2.1.1 การเตรียมส่วนผสมของเหลวภายใน (liquid core) เตรียมสารละลายอัลจิเนต โดยนำผง (โซเดียม) อัลจิเนต (Nutrition Sc. Co., Ltd., Thailand) ละลายในน้ำกลั่นในปริมาณ 1.5% โดยน้ำหนัก เติมสารโซเดียม เฮกซ์ (Sigma Chemical Co., LLC, USA) เพื่อป้องกันการเน่าเสียในปริมาณ 0.02% โดยน้ำหนัก คนสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เตรียมสารละลาย แซนแทนกัม (Winner Group. Co., Ltd., Thailand) โดยวิธีการเช่นเดียวกัน ในปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนัก เตรียมสารละลายเวย์โปรตีน โดยการละลายผงโปรตีน (Davisco Foods International Inc., USA) ในน้ำกลั่นในปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก คนสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เท่ากับ 8 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอล นำไปให้ความร้อนประมาณ 80°C เป็นเวลา 45 นาที เพื่อให้โครงสร้างโปรตีนถูกทำลาย สารละลายจะมีลักษณะเป็นสารละลายขุ่นหนืดใส จากนั้น ทำให้เย็นลง แล้วเติมสารโซเดียมเฮกซ์ เพื่อป้องกันการเน่าเสียในปริมาณเดียวกันกับสารละลายที่เตรียมก่อนหน้านี้

2.1.2 การเตรียมสารเชื่อมข้าม ( $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$ ) เตรียมสารละลายโคโตซานที่ความเข้มข้น 0% 0.25% และ 0.5% โดยน้ำหนัก โดยละลายโคโตซาน (Sigma Chemical Co., LLC, USA) ในกรดอะซิติก 0.1 โมลาร์ คนสารละลาย 24 ชั่วโมง จากนั้น เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.25 M ลงในสารละลายโคโตซาน แล้วปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ที่ 5.6 ด้วยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.8 N จะได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ผสมด้วยโคโตซาน ( $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$ ) ที่ความเข้มข้น 3

ระดับ เพื่อใช้ในการทำให้ไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมข้ามเป็นเม็ดเจล

2.1.3 การสร้างเม็ดเจล เตรียมสารละลายไฮโดรเจล 5 ชนิด โดยมี อัลจิเนต 100% (100 A) อัลจิเนต 62% โปรตีนเวย์ 38% (38W/62A) อัลจิเนต 50% โปรตีนเวย์ 50% (50W/50A) อัลจิเนต 62% แซนแทนกัม 38% (38X/62A) และ อัลจิเนต 50% แซนแทนกัม 50% (50X/50A) นำสารละลายไฮโดรเจล 30 ml หยดลงสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ผสมด้วยโคโตซาน (ผสมสารลดแรงตึงผิว Tween 80) 200 ml โดยใช้การอัดผ่านกระบอกฉีดยาขนาดรูเปิด 2 mm อัตราการไหล 2 ml/min และทิ้งไว้ในสารละลายให้เม็ดเจลแข็งตัวเป็นเวลา 45 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วซับให้แห้ง

สำหรับเม็ดเจลที่ห่อหุ้มวิตามินบี 2 ทำโดยการผสมวิตามินบี 2 ในปริมาณ 0.1% โดยน้ำหนักลงในสารละลายไฮโดรเจล แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นเม็ดเจลโดยวิธีเช่นเดียวกับที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ จากนั้นนำเม็ดเจลไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและศึกษาการปลดปล่อยวิตามินบีสอง

### 2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเม็ดเจล

นำเม็ดเจลมาถ่ายภาพและหาขนาดเม็ดเจลจากภาพโดยใช้โปรแกรม ImageJ (version 1.4) หา Feret's diameters และคำนวณค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเจล

### 2.3 การศึกษาการปลดปล่อยวิตามินบี 2 ในสภาวะน้ำย่อยจำลอง

สารละลายตัวกลางที่ใช้ในที่นี้คือ SGF และ SIF เตรียม SGF โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 g/L และปรับค่าความเป็นกรดต่างที่ประมาณ 1.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 M และเตรียม SIF โดยใช้สารละลายโมโนเบสิกโพแทสเซียมฟอสเฟต 6.8 g/L และปรับค่าความเป็นกรดต่างที่ประมาณ 7.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 N

นำเม็ดเจลที่กักเก็บวิตามินบี 2 ปริมาณ 1.2 g ใส่ลงในขวดชมพูที่มีสารละลายน้ำย่อยจำลองปริมาณ 300 ml นำขวดชมพูจุ่มลงในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 37°C เขย่ากวนอย่างสม่ำเสมอที่ 60 rpm เก็บสารละลายจำลองน้ำย่อยจากขวดชมพู 5 ml ทุก ๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทุกครั้งมีการเติมสารละลายจำลองน้ำย่อยใหม่ลงไปทดแทนในปริมาณเดียวกัน นำสารละลายน้ำย่อยจำลองที่เก็บมาไปหาปริมาณวิตามินบี 2 ที่ปลดปล่อยจากเม็ดเจล

ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer (Model Shimadzu UV1800, Japan) ใช้การดูดซับที่ 444 nm

## 2.4 การศึกษาจลนศาสตร์การปลดปล่อยวิตามินบี 2 ในสภาวะน้ำย่อยจำลอง

นำข้อมูลการปลดปล่อยวิตามินบี 2 มาสร้างกราฟเทียบเคียงกับแบบจำลองที่นิยมทั้งหมด 7 สมการ ดังนี้ [14]-[17]

สมการ (1) zero order model ใช้อธิบายการปลดปล่อยสารสำคัญแบบช้า ๆ โดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารสำคัญตั้งต้น ( $F$  = ปริมาณสารสำคัญที่ถูกปลดปล่อย  $t$  = เวลาการปลดปล่อย  $k_0$  = ค่าคงที่)

$$F = k_0 t \quad (1)$$

สมการ (2) first order model ใช้อธิบายการปลดปล่อยที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารสำคัญตั้งต้น ( $k_1$  = ค่าคงที่)

$$\ln(1 - F) = -k_1 t \quad (2)$$

สมการ (3) Higuchi model ใช้อธิบายการปลดปล่อยของสารสำคัญที่ละลายน้ำได้และสารที่ละลายช้าในตัวห่อหุ้มที่เป็นของแข็งหรือกึ่งแข็ง การแพร่ของสารมีพื้นฐานตามกฎของ Fick และรากที่สองของเวลา ( $k_H$  = ค่าคงที่)

$$F = k_H t^{0.5} \quad (3)$$

สมการ (4) Hixson-Crowell cube root law ใช้อธิบายระบบการปลดปล่อยสารสำคัญเมื่อพื้นผิวหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคหรือเม็ดที่ห่อหุ้มสารมีการเปลี่ยนแปลง ( $k_{HC}$  = ค่าคงที่)

$$F = 1 - (1 - k_{HC} t)^3 \quad (4)$$

สมการ (5) Korsmeyer-Peppas model ใช้อธิบายการแพร่ของสารสำคัญทั้งที่มีการแพร่ตามกฎของ Fick และที่ไม่ใช่ จากระบบที่ตัวห่อหุ้มเป็นพอลิเมอร์ทั้งที่บวมน้ำและไม่บวมน้ำ ( $k_{KP}$  = ค่าคงที่  $n$ =release exponent มีค่าขึ้นอยู่กับกลไกการแพร่ของระบบ ในกรณีที่ตัวห่อหุ้มเป็นทรงกลม ค่า  $n \leq 0.45$  สำหรับการปลดปล่อยตามกฎ

ของ Fick และ  $0.45 < n < 0.89$  สำหรับการปลดปล่อยที่ไม่เป็นไปตามกฎของ Fick)

$$F = k_{KP} t^n \quad (5)$$

สมการ (6) Hopfenberg model ใช้อธิบายการปลดปล่อยสารสำคัญจากระบบที่พื้นผิวตัวห่อหุ้มสีกกร่อนแบบไม่สม่ำเสมอ ( $k_{HB}$  = ค่าคงที่  $L$  = ปริมาณสารสำคัญตั้งต้น สำหรับตัวห่อหุ้มทรงกลม  $a$  = รัศมี และ  $n = 3$ )

$$F = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{k_{HB} t}{La} \right) \right]^n \quad (6)$$

สมการ (7) Weibull model ใช้อธิบายการสะสมของสารสำคัญในสารละลายในช่วงเวลาปลดปล่อย ( $\beta$ =shape parameter และ  $\alpha$ =scale parameter ของกราฟการปลดปล่อยสารสำคัญ )

$$F_{cal_i} \quad F = 100 \left[ 1 - \exp \left( - \frac{t\beta}{\alpha} \right) \right] \quad (7)$$

ความเหมาะสมของแบบจำลองพิจารณาจากค่า coefficient of determination ( $R^2$ ) และ ค่า Akaike Information Criterion (AIC) ตามสมการ (8) โดย  $n$  = ขนาดตัวอย่าง  $p$  = จำนวนพารามิเตอร์ WSSR (Weighed sum of square of residues) เป็นดังสมการ (9) โดย  $w_i$  = ค่าถ่วงน้ำหนัก  $F_{cal_i}$  = ปริมาณสารสำคัญที่ถูกปลดปล่อยที่มาจากการคำนวณ และ  $F_{obs_i}$  = ปริมาณสารสำคัญที่ถูกปลดปล่อยที่เกิดขึ้นจริง

$$AIC = n \ln(WSSR) + 2p \quad (8)$$

$$WSSR = \sum_{k_i=1}^n w_i (F_{cal_i} - F_{obs_i}) \quad (9)$$

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดเจล

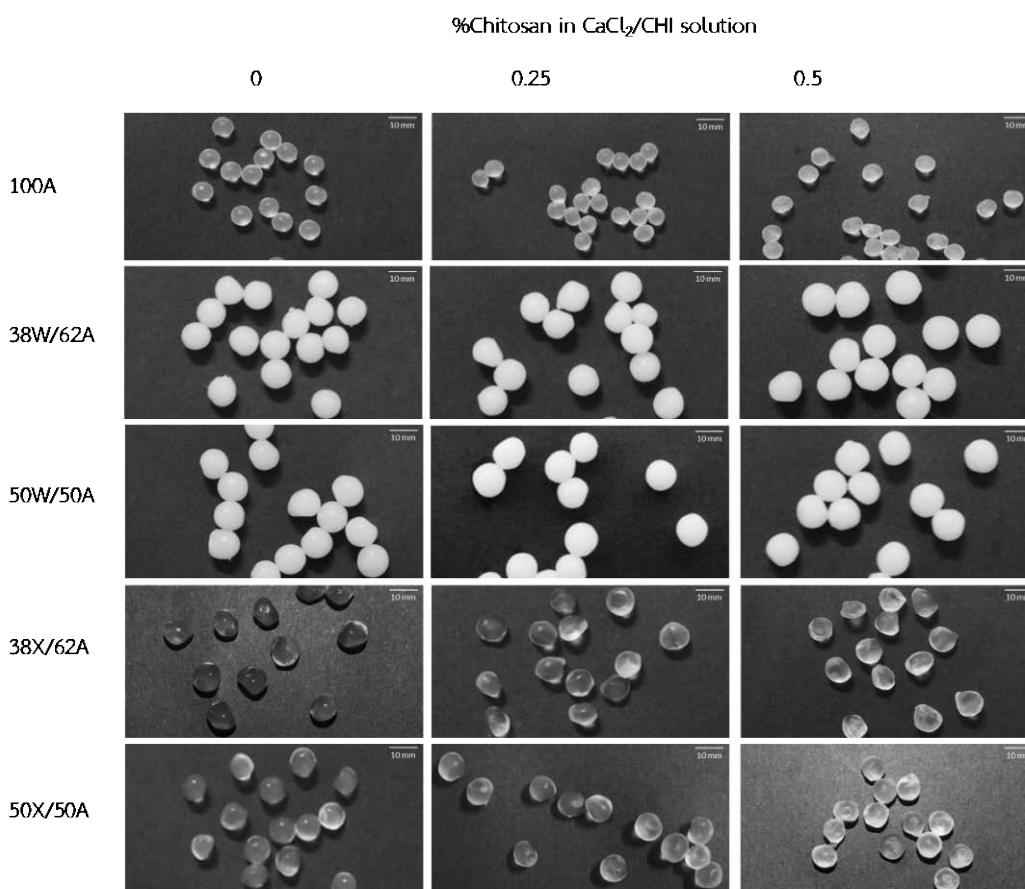
สารละลายไฮโดรเจลที่ผ่านการเชื่อมข้ามด้วย  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ขึ้นรูปเป็นเม็ดเจลมีลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 1 โดยรวม ไฮโดรเจลทุกชนิดให้เม็ดเจลที่เป็นทรง

กลมโดย 100A ซึ่งประกอบด้วยอัลจินตเพียงอย่างเดียว ให้รูปทรงที่เป็นทรงกลมที่สม่ำเสมอและโป่งแสง เมื่อมีแซนแทนกัมเข้ามาช่วยด้วย (38XA/62A และ 50XA/50A) ความโป่งแสงยังคงมีอยู่ แต่ความสม่ำเสมอของรูปทรงกลมลดลง ในขณะที่ไฮโดรเจลที่มีเวย์โปรตีน

ร่วมกับอัลจินตเป็นองค์ประกอบ (38W/62A และ 50W/50A) ให้เม็ดเจลเป็นทรงกลมที่ไม่สม่ำเสมอและทึบแสงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยจากหลายคณะ [8], [18],

[19] โดยลักษณะนี้เป็นผลมาจากการรวมตัวกันระหว่างอัลจินตกับเวย์โปรตีนและสัดส่วนของเวย์โปรตีน

การทึบแสงอาจเนื่องมาจากการเสียสภาพของโปรตีนจากความร้อน ซึ่งทำให้โครงสร้างโปรตีนคลายตัว สูญเสียโครงสร้างชั้นตติยภูมิและกลุ่มกรดอะมิโน เกลือแคลเซียมของสารเชื่อมข้ามทำให้ประจุที่ผิวหน้าโปรตีนลดลง



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดเจล

และการเชื่อมข้ามจากเกลือทำให้เกิดการรวมตัวกันของโปรตีนมากขึ้น [18]

นอกจากนี้ การเติมแซนแทนกัมและเวย์โปรตีนเป็นองค์ประกอบร่วมยังส่งผลให้ขนาดของเม็ดเจลใหญ่ขึ้นด้วยขนาดที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 1 โดยรวม เวย์โปรตีนส่งผลให้ขนาดของเม็ดเจลใหญ่ขึ้นมากกว่าแซนแทนกัม การเพิ่มขึ้นของขนาดเม็ดเจlnั้นอาจเนื่องมาจากการทำงานที่เสริมกันระหว่างอัลจินตและสารที่มาเป็นองค์ประกอบร่วม

เวย์โปรตีนให้ค่าความหนืดปรากฏของสารละลายไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น ส่งผลกับขนาดเมื่อผ่านการเชื่อมข้ามเป็นของแข็งในรูปเม็ดเจล [8], [9] ส่วนแซนแทนกัมเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งที่สายพอลิเมอร์ไม่สามารถชิดกันเมื่อฟอร์มตัวเมื่อมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่คาร์บอกซิลของสายโซ่อัลจินต ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการเชื่อมข้าม มีผลให้ได้เม็ดเจลที่มีรูปทรงและขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ [11] การเพิ่มขึ้นของปริมาณไคโต

ซานใน  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  มีแนวโน้มให้เม็ดเจล 100A และเม็ดเจลที่มีแขนแทนกัมเป็นองค์ประกอบร่วมมีขนาดลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไคโตซานทำให้ความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) เพิ่มขึ้นโดยตัวมันเองและเพิ่มเติมจากการที่ไคโตซานซึ่งมีประจุบวกทำปฏิกิริยากับอัลจินเตและ

แขนแทนกัมซึ่งมีประจุลบเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ [19], [20] ทำให้โครงสร้างเม็ดเจลแน่นและมีโครงข่ายพอลิเมอร์ที่ชิดกัน ในขณะที่เม็ดเจลที่มีเวย์โปรตีนเป็นองค์ประกอบร่วมมีขนาดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 เส้นผ่านจุดศูนย์กลางในหน่วย mm ของเม็ดเจล

| Hydrogel bead | %Chitosan in $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$ |                   |                   |
|---------------|-----------------------------------------|-------------------|-------------------|
|               | 0                                       | 0.25              | 0.5               |
| 100A          | $1.51 \pm 0.37^b$                       | $1.44 \pm 0.41^a$ | $1.47 \pm 0.37^a$ |
| 38W/62A       | $1.87 \pm 0.39^e$                       | $1.85 \pm 0.26^e$ | $1.90 \pm 0.42^f$ |
| 50W/50A       | $1.81 \pm 0.39^e$                       | $1.91 \pm 0.53^f$ | $1.94 \pm 0.39^f$ |
| 38X/62A       | $1.76 \pm 0.39^d$                       | $1.74 \pm 0.26^d$ | $1.71 \pm 0.42^d$ |
| 50X/50A       | $1.68 \pm 0.38^c$                       | $1.70 \pm 0.30^d$ | $1.64 \pm 0.37^c$ |

Means  $\pm$  SD identified by different superscripts in the same column are significantly different ( $p \leq 0.05$ )

### 3.2 การปลดปล่อยวิตามินบี 2 ในสภาวะน้ำย่อยจำลอง

การปลดปล่อยวิตามินบี 2 จากเม็ดเจลใน SGF แสดงดังรูปที่ 2 โดยรวม การปลดปล่อยอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นในช่วง 120 นาทีแรก ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟ ในช่วงนี้ และจะช้าลงหลังจากนั้น ในที่สุดเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 210 นาทีเป็นต้นไป ดังจะเห็นได้จากพฤติกรรมช่วงกราฟที่การปลดปล่อยค่อนข้างคงที่ เป็นเส้นขนานกับเวลา

ในกรณีที่  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ใช้แคลเซียมคลอไรด์ 100% เพียงอย่างเดียว การปลดปล่อยของเม็ดเจลทุกชนิดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน และเม็ดเจลที่มีอัลจินเตเพียงอย่างเดียวและที่มีแขนแทนกัมเป็นองค์ประกอบร่วมมีการปลดปล่อยที่น้อยกว่าเม็ดเจลที่มีเวย์โปรตีน ซึ่งโดยปกติแล้ว อัลจินเตจะคงเสถียรภาพต่อสภาพกรดได้ดีกว่าเวย์โปรตีน และผลงานวิจัยที่ผ่านมาบางส่วน พบว่าการมีเวย์โปรตีนเป็นองค์ประกอบร่วมกับอัลจินเต จะส่งผลให้การปลดปล่อยวิตามินบี 2 ช้าลง อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยที่ช้าลงนี้อาจขึ้นอยู่กับ การออกแบบโครงสร้างไฮโดรเจล ที่จะต้องให้อนุภาคของเวย์โปรตีนถูกห่อหุ้มอยู่ด้านในโดยสมบูรณ์ด้วยอัลจินเต ซึ่งทำได้โดยการเตรียมไฮโดรเจลแบบอิมัลชันซึ่งแตกต่างจากการเตรียมแบบทางกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม ต้องคำนึงถึงปริมาณเวย์โปรตีนต่ออัลจินเตที่เหมาะสมด้วย [3], [9]

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่น เช่น มวลโมเลกุลของสารห่อหุ้มและสารสำคัญที่มีผลต่อการปลดปล่อยเช่นกัน [21] เมื่อเติมไคโตซานลงใน  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  พบว่าเม็ดเจล 100A ให้การปลดปล่อยวิตามินบี 2 รวดเร็วและมากที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอของเม็ดเจล ซึ่งสืบเนื่องมาจากกรรมวิธีการเตรียมไฮโดรเจลที่สารห่อหุ้มผสมกับสารสำคัญแล้วนำไปหยดลงใน  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  วิธีนี้ทำให้อัลจินเตถูกจำกัดในการทำปฏิกิริยากับไคโตซานเพราะต้องเกิดเจลกับแคลเซียมคลอไรด์ไปพร้อม ๆ กันด้วย และปกติแล้ว กลไกการทำปฏิกิริยามี 2 อย่างด้วยกันคือ 1) ไคโตซานเคลือบผิวอัลจินเต โดยการที่ประจุบวกจากไคโตซานเชื่อมกับประจุลบของอัลจินเตที่ผิวหน้า 2) ไคโตซานแพร่เข้าไปเชื่อมกับอัลจินเตโดยการแพร่ผ่านรูพรุนของโครงสร้างอัลจินเต ดังนั้น สัดส่วนความเข้มข้นของอัลจินเตต่อไคโตซานมีผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยา หากอัลจินเตมีความเข้มข้นมากพอกับไคโตซาน การเคลือบผิวก็เกิดขึ้นมาก แต่ในขณะเดียวกัน ก็ทำให้โครงสร้างอัดตัวแน่นมากขึ้น ทำให้จำกัดการแพร่ผ่านของไคโตซานเข้าไปในโครงสร้าง [22]

การปลดปล่อยอย่างรวดเร็วนี้อาจอธิบายได้อีกนัยหนึ่งว่าเป็นการที่โครงสร้างไฮโดรเจลเปื่อยอย่างรวดเร็วเนื่องจากความชอบน้ำของอัลจินเตและไคโตซาน ส่งผลให้เกิดสารสำคัญละลายออกสู่สารละลายตัวกลางหรือน้ำย่อยอย่างรวดเร็ว [23]

ในกรณีของเวย์โปรตีน การเชื่อมข้ามระหว่างกรดอะมิโนหลักที่เป็นอิสระของโคโตซานกับประจุลบของเวย์โปรตีนส่งผลให้ไฮโดรเจลที่มีเวย์โปรตีนเป็นองค์ประกอบร่วมมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทำให้สามารถปกป้องสารสำคัญให้ปลดปล่อยน้อยลงและช้าลง [24]

ในส่วนของการแลกเปลี่ยน พบว่าเม็ดเจลที่มีแกนแทนกัมเป็นองค์ประกอบร่วมให้ผลการปลดปล่อยวิตามินบี 2 ที่น้อยกว่าและช้ากว่าเม็ดเจล 100A ทุกกรณี ทั้งนี้เนื่องมาจากการเข้ากันได้ดีของอัลจินเต แกนแทนกัมและโคโตซาน อัลจินเตเกิดการเชื่อมข้ามผ่านแคลเซียมคลอไรด์ เกิดเจลที่มีผลึก เมื่อเติมแกนแทนกัมทำให้เกิดผลึกน้อยลง และเมื่อถูกเคลือบด้วยโคโตซานร่วมด้วยจะยังลดการเกิดผลึก อสัณฐานมีผลให้เม็ดเจลมีผิวเรียบและมีโครงสร้างที่แน่น ทำให้กักเก็บปกป้องสารสำคัญไว้ได้ดี [25] เกิดการปลดปล่อยในปริมาณน้อยและช้า อย่างไรก็ตาม ผลการทำปฏิกิริยาระหว่างแกนแทนกัมกับโคโตซานนั้นถือเป็นสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ซับซ้อน มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือความเข้มข้นของแกนแทนกัม โคโตซานและค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายโคโตซาน [26] ซึ่งอาจส่งผลกับโครงสร้างของไฮโดรเจล และให้การปลดปล่อยที่ต่างกัน

การปลดปล่อยวิตามินบี 2 จากเม็ดเจลใน SIF แสดงดังรูปที่ 3 โดยรวม การปลดปล่อยอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นในช่วง 150 นาทีแรก จากนั้นปลดปล่อยช้าลงและเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 270 นาที และการปลดปล่อยรวดเร็วกว่าใน SGF ซึ่งถือว่าเป็นไปตามเป้าหมายที่ควรจะเป็น คือการปลดปล่อยวิตามินบี 2 ที่ล่าช้าเล็กน้อยเพื่อการดูดซึมให้ร่างกายนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่

ในกรณีที่  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ใช้แคลเซียมคลอไรด์ 100% เพียงอย่างเดียว การปลดปล่อยของเม็ดเจลทุกชนิดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เมื่อมีการเติมโคโตซานลงใน  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  เม็ดเจล 100A ปลดปล่อยวิตามินบี 2 มากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณของโคโตซานและให้กราฟการปลดปล่อยเป็นลักษณะเส้นโค้งซิกมอยด์ชัดเจนขึ้น เป็นไปได้ว่า โคโตซานที่เชื่อมข้ามและเคลือบอัลจินเตส่งผลให้เม็ดเจลปลดปล่อยวิตามินบี 2 ช้าในช่วงแรก อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยการการทำปฏิกิริยาระหว่างโคโตซานและอัลจินเตมีข้อจำกัด ทำให้โครงสร้างเม็ดเจลไม่สม่ำเสมออย่างที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ จึงส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยอย่างรวดเร็วในช่วงหลังจาก 60 นาทีเป็นต้นไป ความเป็นกรดต่าง 7.5 ของ SIF มีผลให้อัลจินเตเกิดการเปื่อยตัวอย่างรวดเร็ว เกิดการบวม ไอออน  $\text{Ca}^{2+}$  ออกจาก

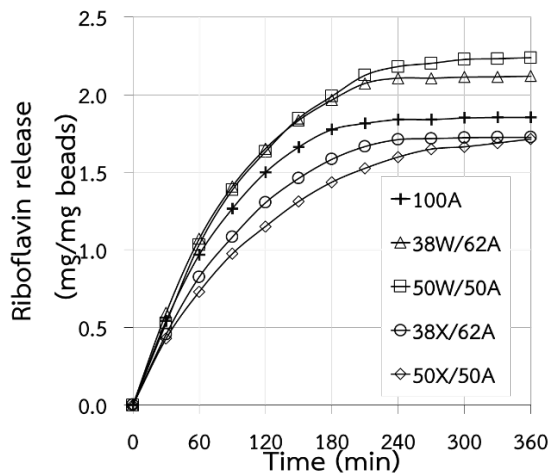
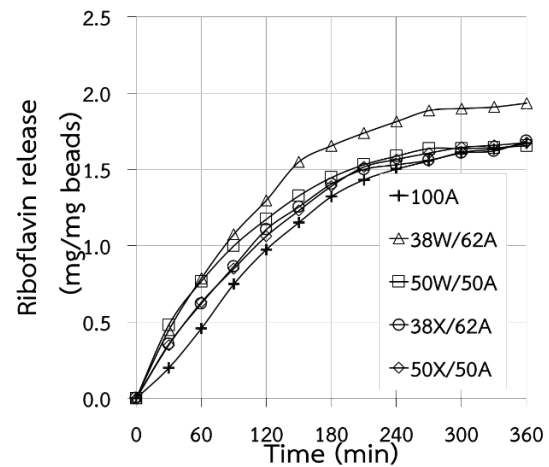
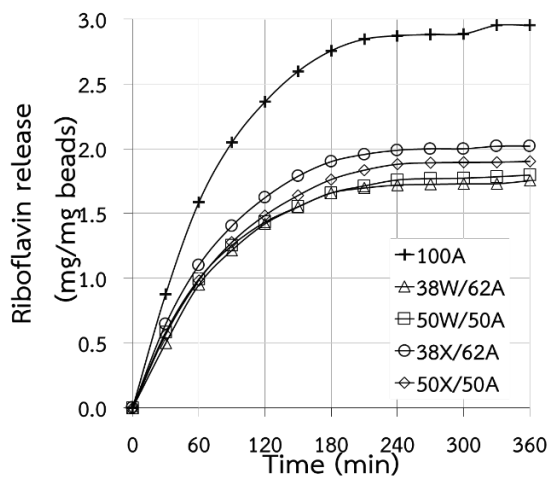
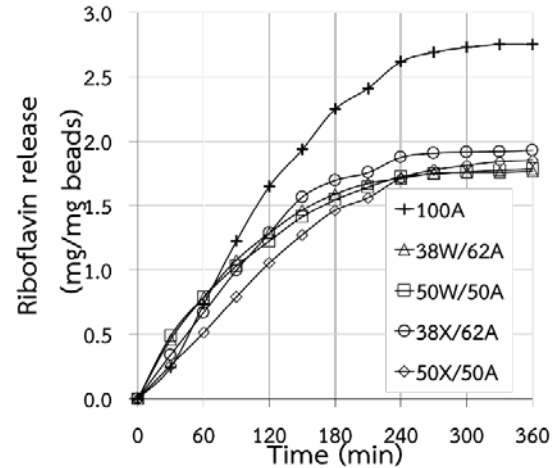
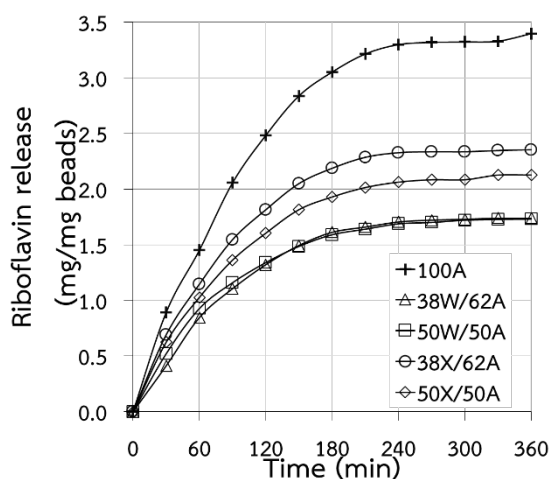
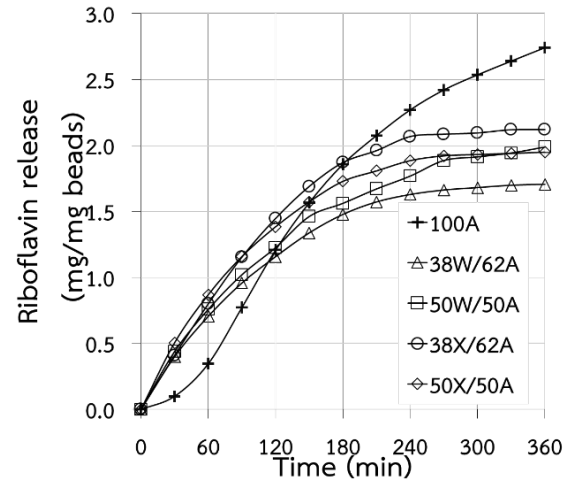
โครงสร้างเม็ดเจล แลกเปลี่ยนกับไอออนในสารละลาย น้ำย่อยจำลอง ทำให้การเชื่อมข้ามสลายออก ส่งผลให้โครงสร้างเม็ดเจลเกิดการสั่นไหวและสลายตัว [3], [11], [21] วิตามินบี 2 จึงถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสลายตัวของโครงสร้าง ทำให้เกิดการปลดปล่อยแบบเส้นโค้งซิกมอยด์ [21] และเช่นเดียวกับปรากฏการณ์ใน SGF ด้วยโครงสร้างที่แข็งแรงจากการเชื่อมข้ามด้วยประจุที่ต่างกันระหว่างโคโตซานกับเวย์โปรตีนส่งผลให้ไฮโดรเจลที่มีเวย์โปรตีนเป็นองค์ประกอบร่วม มีการปลดปล่อยลดลงเมื่อปริมาณโคโตซานใน  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  เพิ่มขึ้น

แกนแทนกัมในปริมาณที่มากพอมีแนวโน้มที่จะลดการดูดซึม น้ำของเม็ดเจลและเพิ่มความคดเคี้ยว (tortuosity) ให้กับเม็ดเจลเมื่อบวม [11] จึงส่งผลให้เม็ดเจลที่มีแกนแทนกัมเป็นองค์ประกอบร่วมมีการปลดปล่อยวิตามินบี 2 น้อย ด้านอิทธิพลของโคโตซาน เป็นไปได้ว่าโคโตซานมีผลให้เม็ดเจลถูกกัดกร่อนช้ากว่า [25] จึงเป็นเหตุให้ในกรณีที่ไม่มีโคโตซานใน  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  เม็ดเจลมีการปลดปล่อยวิตามินบี 2 ได้มากกว่าในกรณีที่ไม่มีโคโตซานใน  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$

### 3.3 จลนศาสตร์การปลดปล่อยวิตามินบี 2 ในสภาวะน้ำย่อยจำลอง

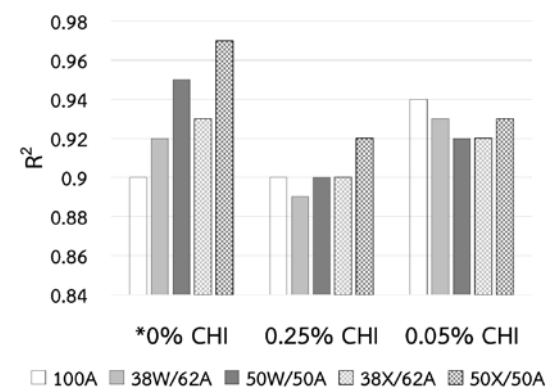
เมื่อนำข้อมูลการปลดปล่อยวิตามินบี 2 ใน SGF และ SIF มาสร้างกราฟเทียบเคียงกับแบบจำลองที่นิยมทั้งหมด 7 สมการ พบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมของทั้งสองสภาวะมี 3 สมการด้วยกันคือ Higuchi model Korsmeyer-Peppas model และ Weibull model โดยค่า  $R^2$  และค่า AIC ของสมการของทั้งสองสภาวะน้ำย่อยจำลองให้ค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มไปในทำนองเดียวกัน ยกตัวอย่างในกรณีของ SGF แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 และค่าพารามิเตอร์ทางจลศาสตร์ในการปลดปล่อยวิตามินบี 2 ใน SGF และใน SIF ของสมการแบบจำลองดังกล่าวแสดงดังตาราง 2-4 และ 5-7 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณา Higuchi model ค่า  $k_H$  ในกรณี SGF และ SIF ประมาณ 0.10-0.29 และ 0.09-0.15 ตามลำดับ ซึ่งโมเดลนี้ยืนยันการปลดปล่อยของวิตามินบี 2 ที่เป็นสารละลายน้ำได้ กระจายอยู่ในโครงสร้างที่เป็นโครงข่าย [14] ซึ่งในที่นี้เป็นพอลิเมอร์ผสม

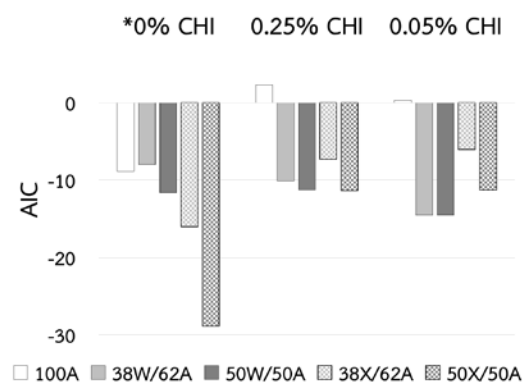
(ก)  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0% ไคโตซาน(ง)  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0% ไคโตซาน(ข)  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0.25% ไคโตซาน(ฉ)  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0.25% ไคโตซาน(ค)  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0.50% ไคโตซาน(ค)  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0.5% ไคโตซาน

รูปที่ 2 การปลดปล่อยวิตามินบี 2 ใน SGF ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นระยะเวลา 360 นาที

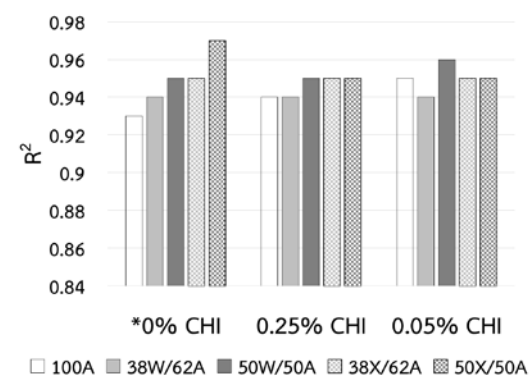
รูปที่ 3 การปลดปล่อยวิตามินบี 2 ใน SIF ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นระยะเวลา 360 นาที



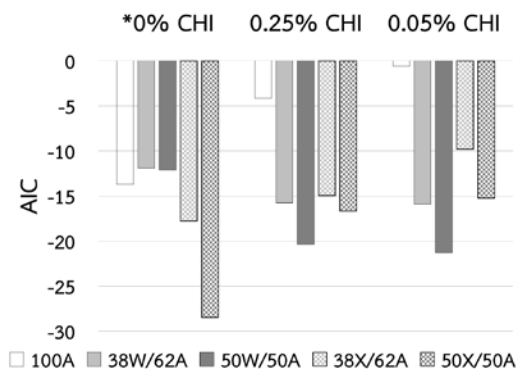
(ก) Higuchi model



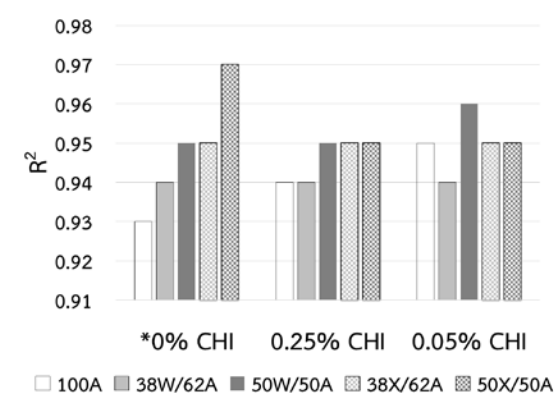
(ง) Higuchi model



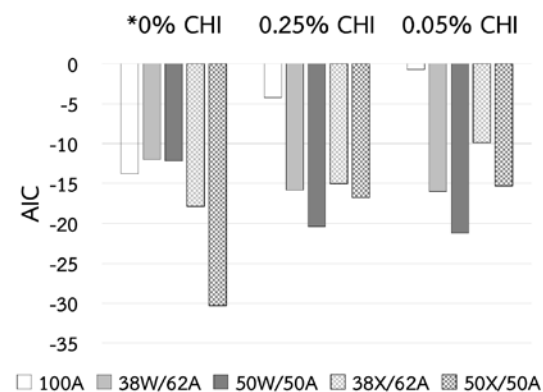
(ข) Korsmeyer-Peppas model



(จ) Korsmeyer-Peppas model



(ค) Weibull model



(ค) Weibull model

รูปที่ 4 ค่า  $R^2$  ของสมการจำลองการปลดปล่อยวิตามินบี 2 ใน SGF  
\*ปริมาณไคโตซานใน  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$

รูปที่ 5 ค่า AIC ของสมการจำลองการปลดปล่อยวิตามินบี 2 ใน SIF  
\*ปริมาณไคโตซานใน  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$

เมื่อพิจารณา empirical model คือ Weibull model และ Korsmeyer-Peppas model ในส่วนของ Weibull model ค่า  $\alpha$  และ  $\beta$  ในกรณี SGF ประมาณ 253.15-857.81 และ 0.32-0.47 ตามลำดับ และในกรณี SIF ประมาณ 618.27-4953.69 และ 0.42-0.85 ตามลำดับ แสดงให้เห็นการสะสมของสารสำคัญในสารละลายน้ำย่อยจำลองทั้งสองชนิดในช่วงเวลาปลดปล่อยมีความแตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้จากกราฟการปลดปล่อยที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

ในส่วนของ Korsmeyer-Peppas model ค่า  $k_{KP}$  และค่า  $n$  ในกรณี SGF ประมาณ 0.12-0.40 และ 0.34-0.46 ตามลำดับ ในกรณี SIF ประมาณ 0.05-0.16 และ 0.42-0.84 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่า  $n$  จะเห็นได้ว่าการปลดปล่อยวิตามินบี 2 ใน SGF เป็นการแพร่ตามกฎของ Fick ในขณะที่ SIF มีแนวโน้มเป็นการแพร่ที่ไม่เป็นไปตามกฎของ Fick ซึ่งสมการนี้บ่งบอกถึงความซับซ้อนของการแพร่ของไฮโดรเจลที่เป็นพอลิเมอร์ [16]

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ในการปลดปล่อยวิตามินบี 2 (Mean  $\pm$  SD) ใน SGF ใช้  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0% ไคโตซาน

| Model            | Parameter | 100A               | 38W/62A            | 50W/50A            | 38X/62A           | 50X/50A            |
|------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| Higuchi          | $k_H$     | 0.11 $\pm$ 0.00    | 0.13 $\pm$ 0.00    | 0.13 $\pm$ 0.00    | 0.10 $\pm$ 0.00   | 0.10 $\pm$ 0.01    |
| Korsmeyer-Peppas | $k_{KP}$  | 0.24 $\pm$ 0.03    | 0.25 $\pm$ 0.05    | 0.20 $\pm$ 0.01    | 0.17 $\pm$ 0.03   | 0.12 $\pm$ 0.04    |
|                  | $n$       | 0.36 $\pm$ 0.02    | 0.38 $\pm$ 0.03    | 0.43 $\pm$ 0.01    | 0.41 $\pm$ 0.03   | 0.46 $\pm$ 0.05    |
| Weibull          | $\alpha$  | 414.99 $\pm$ 43.49 | 412.64 $\pm$ 73.82 | 512.00 $\pm$ 14.66 | 589.6 $\pm$ 98.96 | 857.81 $\pm$ 20.23 |
|                  | $\beta$   | 0.36 $\pm$ 0.02    | 0.38 $\pm$ 0.03    | 0.43 $\pm$ 0.01    | 0.41 $\pm$ 0.03   | 0.47 $\pm$ 0.04    |

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ในการปลดปล่อยวิตามินบี 2 (Mean  $\pm$  SD) ใน SGF ใช้  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0.25% ไคโตซาน

| Model            | Parameter | 100A               | 38W/62A            | 50W/50A            | 38X/62A            | 50X/50A            |
|------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Higuchi          | $k_H$     | 0.18 $\pm$ 0.00    | 0.11 $\pm$ 0.00    | 0.11 $\pm$ 0.00    | 0.12 $\pm$ 0.00    | 0.12 $\pm$ 0.00    |
| Korsmeyer-Peppas | $k_{KP}$  | 0.40 $\pm$ 0.04    | 0.24 $\pm$ 0.01    | 0.26 $\pm$ 0.02    | 0.29 $\pm$ 0.03    | 0.23 $\pm$ 0.01    |
|                  | $n$       | 0.35 $\pm$ 0.02    | 0.35 $\pm$ 0.01    | 0.34 $\pm$ 0.01    | 0.35 $\pm$ 0.02    | 0.37 $\pm$ 0.01    |
| Weibull          | $\alpha$  | 253.15 $\pm$ 23.52 | 421.92 $\pm$ 21.41 | 392.79 $\pm$ 36.17 | 352.49 $\pm$ 35.08 | 430.20 $\pm$ 16.02 |
|                  | $\beta$   | 0.36 $\pm$ 0.02    | 0.36 $\pm$ 0.01    | 0.35 $\pm$ 0.01    | 0.35 $\pm$ 0.02    | 0.37 $\pm$ 0.01    |

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ในการปลดปล่อยวิตามินบี 2 (Mean  $\pm$  SD) ใน SGF ใช้  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0.50% ไคโตซาน

| Model            | Parameter | 100A               | 38W/62A            | 50W/50A           | 38X/62A            | 50X/50A           |
|------------------|-----------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Higuchi          | $k_H$     | 0.20 $\pm$ 0.00    | 0.11 $\pm$ 0.00    | 0.11 $\pm$ 0.00   | 0.14 $\pm$ 0.00    | 0.13 $\pm$ 0.00   |
| Korsmeyer-Peppas | $k_{KP}$  | 0.31 $\pm$ 0.05    | 0.17 $\pm$ 0.03    | 0.22 $\pm$ 0.00   | 0.27 $\pm$ 0.02    | 0.23 $\pm$ 0.00   |
|                  | $n$       | 0.42 $\pm$ 0.03    | 0.41 $\pm$ 0.02    | 0.37 $\pm$ 0.00   | 0.38 $\pm$ 0.01    | 0.39 $\pm$ 0.00   |
| Weibull          | $\alpha$  | 338.14 $\pm$ 60.00 | 586.70 $\pm$ 89.63 | 462.02 $\pm$ 2.87 | 373.19 $\pm$ 31.25 | 433.70 $\pm$ 0.93 |
|                  | $\beta$   | 0.43 $\pm$ 0.03    | 0.41 $\pm$ 0.02    | 0.37 $\pm$ 0.00   | 0.39 $\pm$ 0.01    | 0.39 $\pm$ 0.00   |

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ในการปลดปล่อยวิตามินบี 2 (Mean  $\pm$  SD) ใน SIF ใช้  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0% ไคโตซาน

| Model              | Parameter | 100A                 | 38W/62A            | 50W/50A            | 38X/62A             | 50X/50A              |
|--------------------|-----------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| Higuchi            | $k_H$     | 0.09 $\pm$ 0.00      | 0.11 $\pm$ 0.00    | 0.11 $\pm$ 0.00    | 0.09 $\pm$ 0.00     | 0.10 $\pm$ 0.00      |
| Korsmeyer – Peppas | $k_{KP}$  | 0.05 $\pm$ 0.01      | 0.13 $\pm$ 0.03    | 0.10 $\pm$ 0.00    | 0.09 $\pm$ 0.00     | 0.09 $\pm$ 0.01      |
|                    | $n$       | 0.62 $\pm$ 0.02      | 0.47 $\pm$ 0.04    | 0.51 $\pm$ 0.00    | 0.50 $\pm$ 0.00     | 0.52 $\pm$ 0.02      |
| Weibull            | $\alpha$  | 2094.38 $\pm$ 232.65 | 792.14 $\pm$ 67.05 | 992.12 $\pm$ 12.91 | 1068.41 $\pm$ 40.02 | 1178.49 $\pm$ 119.19 |
|                    | $\beta$   | 0.62 $\pm$ 0.02      | 0.48 $\pm$ 0.04    | 0.52 $\pm$ 0.00    | 0.50 $\pm$ 0.00     | 0.52 $\pm$ 0.02      |

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ในการปลดปล่อยวิตามินบี 2 (Mean  $\pm$  SD) ใน SIF ใช้  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0.25% ไคโตซาน

| Model              | Parameter | 100A                 | 38W/62A            | 50W/50A            | 38X/62A            | 50X/50A              |
|--------------------|-----------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Higuchi            | $k_H$     | 0.15 $\pm$ 0.01      | 0.11 $\pm$ 0.01    | 0.10 $\pm$ 0.00    | 0.11 $\pm$ 0.01    | 0.10 $\pm$ 0.00      |
| Korsmeyer – Peppas | $k_{KP}$  | 0.08 $\pm$ 0.01      | 0.16 $\pm$ 0.04    | 0.15 $\pm$ 0.01    | 0.10 $\pm$ 0.01    | 0.05 $\pm$ 0.02      |
|                    | $n$       | 0.63 $\pm$ 0.02      | 0.43 $\pm$ 0.03    | 0.42 $\pm$ 0.01    | 0.52 $\pm$ 0.00    | 0.63 $\pm$ 0.06      |
| Weibull            | $\alpha$  | 1355.97 $\pm$ 207.05 | 655.27 $\pm$ 42.39 | 667.43 $\pm$ 37.52 | 991.81 $\pm$ 62.69 | 2095.95 $\pm$ 664.86 |
|                    | $\beta$   | 0.64 $\pm$ 0.02      | 0.43 $\pm$ 0.03    | 0.42 $\pm$ 0.01    | 0.52 $\pm$ 0.00    | 0.63 $\pm$ 0.06      |

ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ในการปลดปล่อยวิตามินบี 2 (Mean  $\pm$  SD) ใน SIF ใช้  $\text{CaCl}_2/\text{CHI}$  ที่ 0.50% ไคโตซาน

| Model              | Parameter | 100A                 | 38W/62A            | 50W/50A            | 38X/62A            | 50X/50A            |
|--------------------|-----------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Higuchi            | $k_H$     | 0.14 $\pm$ 0.00      | 0.10 $\pm$ 0.00    | 0.11 $\pm$ 0.00    | 0.13 $\pm$ 0.00    | 0.12 $\pm$ 0.00    |
| Korsmeyer – Peppas | $k_{KP}$  | 0.02 $\pm$ 0.01      | 0.12 $\pm$ 0.01    | 0.14 $\pm$ 0.01    | 0.11 $\pm$ 0.00    | 0.16 $\pm$ 0.01    |
|                    | $n$       | 0.84 $\pm$ 0.02      | 0.47 $\pm$ 0.02    | 0.44 $\pm$ 0.01    | 0.53 $\pm$ 0.01    | 0.44 $\pm$ 0.01    |
| Weibull            | $\alpha$  | 4953.69 $\pm$ 545.38 | 860.73 $\pm$ 92.48 | 704.56 $\pm$ 52.30 | 946.51 $\pm$ 30.16 | 618.27 $\pm$ 34.91 |
|                    | $\beta$   | 0.85 $\pm$ 0.02      | 0.47 $\pm$ 0.02    | 0.45 $\pm$ 0.01    | 0.54 $\pm$ 0.01    | 0.44 $\pm$ 0.01    |

ในการทดลอง สังเกตเห็นว่าเม็ดเจลมีการหดตัวใน SGF ในขณะที่มีการบวมสูงใน SIF จึงเป็นไปได้ที่ส่งผลให้พอลิเมอร์ที่มีอัลจินตเป็นองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่มาจากการแพร่ร่วมกับการสีกกร่อนของโครงสร้างที่ห่อหุ้มสารสำคัญ [5], [8]

#### 4. สรุป

การปลดปล่อยโรโบฟลาวินหรือวิตามินบี 2 จากไฮโดรเจลในรูปเม็ดเจลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโครงสร้างสารห่อหุ้ม สารเชื่อมข้าม และสิ่งแวดล้อมหรือสารละลาย

ตัวกลาง โดยอัลจินตซึ่งเป็นสารชอบน้ำจะให้เม็ดเจลที่เป็นเนื้อเดียวขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ การผสมเวย์โปรตีนและแซนแทนกัมเข้าเป็นองค์ประกอบร่วม และมีไคโตซานซึ่งเป็นสารไม่ชอบน้ำร่วมด้วยกับแคลเซียมคลอไรด์ในการเชื่อมประสาน มีแนวโน้มที่โครงสร้างไฮโดรเจลที่ซับซ้อนและสามารถกักเก็บวิตามินบี 2 (วิตามินที่ละลายน้ำ) ได้ดีขึ้น ทำให้การปลดปล่อยวิตามินบี 2 ในสารละลายตัวกลางเป็นไปอย่างช้าๆ โดยการปลดปล่อยทางจลนศาสตร์สามารถอธิบายด้วยแบบจำลอง Higuchi model Korsmeyer-Peppas และ Weibull model ซึ่ง

บ่งบอกถึงการปลดปล่อยของพอลิเมอร์ที่ซับซ้อน การปลดปล่อยเกิดจากการแพร่ของวิตามินบี 2 ร่วมด้วยการสีกกร่อนของโครงสร้างไฮโดรเจล ความเข้มข้นของสารที่เกี่ยวข้องและกรรมวิธีการเตรียมและการทำให้เกิดการเชื่อมข้ามเป็นปัจจัยสำคัญของการออกแบบระบบนำส่งวิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญต่อสุขภาพ ในรูปแบบผลิตภัณฑ์อาหารฟังก์ชัน

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Q. Ye, N. Georges and C. Selomuya, "Microencapsulation of active ingredients in functional foods: From research stage to commercial food products," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 78, pp. 167-179, 2018.
- [2] C.-C. Lin and A. T. Metters, "Hydrogels in controlled release formulations: Network design and mathematical modeling," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 58, pp. 1379-1408, 2006.
- [3] L. Chen and M. Subirade, "Alginate-whey protein granular microspheres as oral delivery vehicles for bioactive compounds," *Biomaterials*, vol. 27, pp. 4646-4654, 2006.
- [4] J. Han, A.-S. Guenier, S. Salmieri and M. Lacroix, "Alginate and chitosan functionalization for micronutrient encapsulation," *J Agr. Food Chem.*, vol. 56, pp. 2528-2535, 2008.
- [5] M. Szekalska, K. Sosnowska, A. Zakrzaska, I. Kasacka, A. Lewandowska and K. Winnicka, "The influence of chitosan cross-linking on the properties of alginate microparticles with metformin hydrochloride-In vitro and in vivo evaluation," *Molecules*, vol. 22, pp. 1-20, 2017.
- [6] S. B. Doherty, M. A. Auty, C. Stanton, R. P. Ross, G. F. Fitzgerald and A. Brodtkorb, "Application of whey protein micro-bead coatings for enhanced strength and probiotic protection during fruit juice storage and gastric incubation," *J. Microencapsul.*, vol. 29, pp. 713-728, 2012.
- [7] S. A. Fioramonti, A. A. Perez, E. E. Aringoli, A. C. Rubiolo and L. G. Santiago, "Design and characterization of soluble biopolymer complexes produced by electrostatic self-assembly of a whey protein isolate and sodium alginate," *Food Hydrocoll.*, vol. 35, pp. 129-136, 2014.
- [8] S. Wichchukit, M. H. Oztog, M. J. McCarthy and K. L. McCarthy, "Whey protein/alginate beads as carriers of a bioactive component," *Food Hydrocoll.*, vol. 33, pp. 66-73, 2013.
- [9] L. Chen and M. Subirade, "Effect of preparation conditions on the nutrient release properties of alginate-whey protein granular microspheres," *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, vol. 65, pp. 354-362, 2007.
- [10] F. García-Ochoa, V. E. Santos, J. A. Casas and E. Gómez, "Xanthan gum: production, recovery, and properties," *Biotechnol. Adv.*, vol. 18, pp. 549-579, 2000.
- [11] T. Pongjanyakul and S. Puttipipatkachorn, "Xanthan-alginate composite gel beads: Molecular interaction and in vitro characterization," *Int. J. Pharm.*, vol. 331, pp. 61-71, 2007.
- [12] M. Hamidi, A. Azadi and P. Rafiei, "Hydrogel nanoparticles in drug delivery," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 60, pp. 1638-1649, 2008.
- [13] I. M. Fareez, S. M. Lim, R. K. Mishra and K. Ramasamy, "Chitosan coated alginate-xanthan gum bead enhanced pH and thermotolerance of *Lactobacillus plantarum* LAB12," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 72, pp. 1419-1428, 2015.
- [14] P. Costa and J. M. S. Lobo, "Modeling and comparison of dissolution profiles." *Eur. J. Pharm. Sci.*, vol. 13, pp. 123-133, 2001.

- [15] G. Singhvi and M. Singh, "Review: In-vitro drug release characterization models," *Int. J. Pharm. Sci.*, vol. 2, pp. 77-84, 2011.
- [16] S. A. Chime, G. C. Onunkwo nad I. I. Onyishi, "Kinetics and mechanisms of drug release from swellable and non swellable matrices: A review," *Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci.*, vol. 4, pp. 97-103, 2013.
- [17] S. Azadi, H. Ashrafi and A. Azadi, "Mathematical modeling of drug release from swellable polymeric nanoparticles," *J. Appl. Pharm. Sci.*, vol. 7, pp. 125-133, 2017.
- [18] B. A. Harper, S. Barbut, L. T. Lim and M. F. Marcone, "Characterization of 'wet' alginate and composite films containing gelatin, whey or soy protein," *Food Res. Int.*, vol. 52, pp. 452-459, 2013.
- [19] D. Conzatti, M. Castel, F. Avadi, S. Cavalie and A. Tourrette, "Alginate/chitosan polyelectrolyte complexes: A comparative study of the influence of the drying step on physicochemical properties," *Carbohydr. Polym.*, vol. 172, pp. 142-151, 2017.
- [20] N. Lal, J. Dubey, P. Gaur, N. Verma and A. Verma, "Chitosan based in situ forming polyelectrolyte complexes: A potential sustained drug delivery polymeric carrier for high dose drugs," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 79, pp. 491-498, 2017.
- [21] A. Kikuchi, M. Kawabuchi, A. Watanabe, M. Sugihara, Y. Sakurai and T. Okano, "Effect of  $\text{Ca}^{2+}$ -alginate gel dissolution on release of dextran with different molecular weights," *J. Control. Release*, vol. 58, pp. 21-28, 1999.
- [22] X. Z. Shu and K. J. Zhu, "The release behavior of brilliant blue from calcium-alginate gel beads coated by chitosan: the preparation method effect," *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, vol. 53, pp. 193-201, 2002.
- [23] M. A. Mujtaba, K. A. M. Hassan and M. Imran, "Chitosan-alginate nanoparticles as a novel drug delivery system for rutin," *Int. J. Adv. Biotechnol. Res.*, vol. 9, pp. 1895-1903, 2018.
- [24] J. L. C. De Queiroz, R. O. De Araújo Costa, L. L. R. Matias, A. F. De Medeiros, A. F. T. Gomes, T. Dos Santos Pias, T. S. Passos, B. L. L. Maciel, E. A. Dos Santos and A. H. De Araújo Moraes, "Chitosan-whey protein nanoparticles improve encapsulation efficiency and stability of a trypsin inhibitor isolated from *Tamarindus indica* L," *Food Hydrocoll.*, vol. 84, pp. 247-256, 2018.
- [25] I. M. Fareez, S. M. Lim, R. K. Mishra and K. Ramasamy, "Chitosan coated alginate-xanthan gum bead enhanced pH and thermotolerance of *Lactobacillus plantarum* LAB 12," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 72, pp. 1419-1428, 2015.
- [26] S. Argin-Soysal, P. Kofinas and Y. M. Lo, "Effect of complexation conditions on xanthan-chitosan polyelectrolyte complex gels," *Food Hydrocoll.*, vol. 23, pp. 202-209, 2009.

## การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น

### วงจรแปลงผันแบบบัคขนานกัน

### Stability Analysis of AC-DC Power System Feeding

### Paralleled Buck-Converter

จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม<sup>1</sup> เทพพนม โสภะเพิ่ม<sup>2</sup> กองพัน อารีรักษ์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Juthatip Klasongkram<sup>1</sup> Theppanom Sopapirm<sup>2</sup> Kongpan Areerak<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

<sup>2</sup>Department of electrical power engineering, Mahanakhon university of technology

140 Cheumsampan Rd, Nongchok, Bangkok, Thailand, 10530

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

(Received: August 29, 2020; Accepted: April 03, 2020)

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมขนานกัน โดยปกติแล้ววงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในบทความนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอจะถูกใช้ร่วมกับเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบลูค ในการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบ มีการตรวจสอบความถูกต้องโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้จากทางทฤษฎี และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกัน

**คำสำคัญ:** วงจรแปลงผันแบบบัค โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพ

#### ABSTRACT

This paper proposes stability analysis of AC-DC power system feeding paralleled controlled buck-converter. Normally, a controlled buck-converter behaves as a constant power load, that can affect the stability of system. Therefore, stability analysis is very important. In this paper, the proposed mathematical model is used with the Middlebrook's criterion to predict the unstable point. The results are validated by the well-known Eigenvalue's theorem and the simulation. Good agreement between the theory and simulation is achieved.

**Keyword:** Buck-converter, constant power load, stability analysis.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี เอซีเป็นดีซี ที่มีการควบคุมสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีประสิทธิภาพสูง การดูแลรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Load: CPL) [1] ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม เมื่อนำโหลดชนิดดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ [2]-[3] จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ 2 วิธี คือ อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง [4] และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบุรค [5] และมีการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

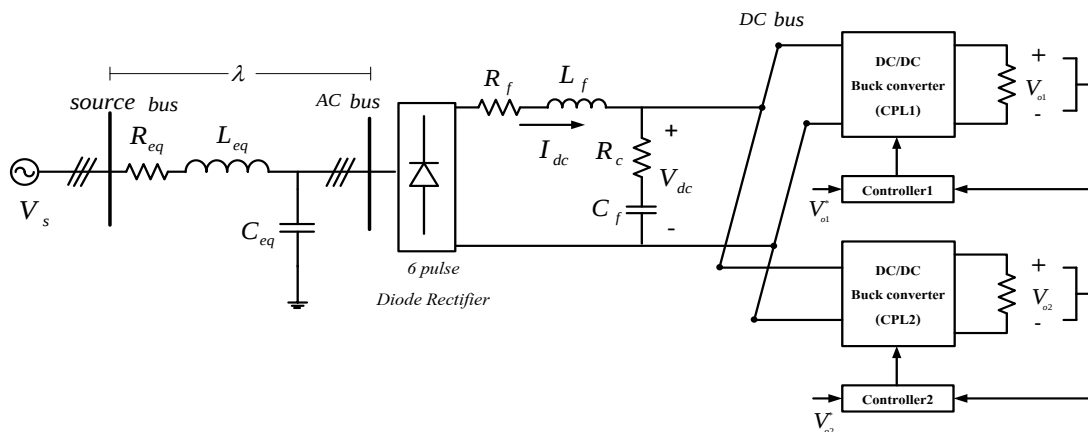
บทความนี้ประกอบด้วยระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในส่วนที่ 2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในส่วนที่ 3 และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในส่วนที่ 4 ซึ่งจะนำเสนออยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบุรค และในส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผลของบทความ

## 2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

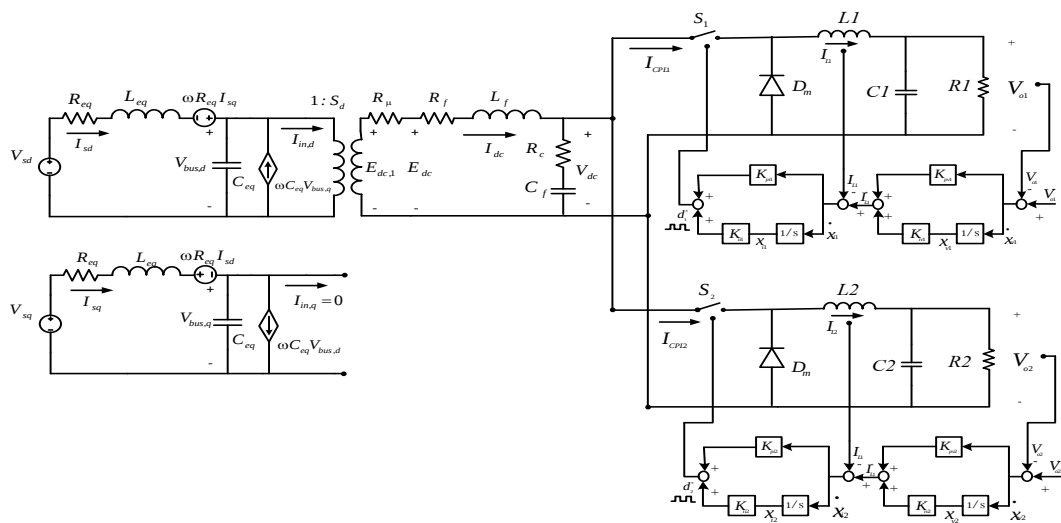
ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาคือระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลที่จ่ายกำลังผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ที่บัส AC ถูกต่ออยู่กับโหลดที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แปลงไฟกระแสสลับมาเป็นกระแสตรงที่บัสดีซี (DC bus) ผ่านวงจรกรองสัญญาณที่บัสดีซี ที่มีโหลดมาต่ออยู่ 2 โหลดด้วยกันคือ โหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมแรงดันทางฝั่งสัญญาณขาออกให้คงที่ 2 ตัว แสดงได้ดังรูปที่ 1

## 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

เนื่องจากระบบไฟฟ้าพิจารณาการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันและวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีการทำงานตามฟังก์ชันกึ่งของเวลา ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงเป็นแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา (time varying model) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยแบบจำลองดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดความยุ่งยาก



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมขนาดกัน



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว

และซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยวิธีการแปลงดีคิว (DQ method) [4] ในส่วนของระบบไฟฟ้าสามเฟสร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method : GSSA) [6]-[7] ในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังดีคิวเป็นดีซี ซึ่งจะได้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว ดังรูปที่ 2 วิธีการดังกล่าวจะทำให้ได้แบบจำลองไม่ขึ้นกับเวลา (time-invariant model)

จากรูปที่ 2 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์รวมทั้งสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่ทางฝั่งเอซี จะถูกเปลี่ยนให้อยู่บนแกนหมุนดีคิว โดยไดโอดเรียงกระแสสามเฟสได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สำหรับการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้งสองชุด โดยแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 2 สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดัน และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้แบบจำลองของระบบในรูปที่ 1 แสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \frac{V_m \cos(\omega)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} + \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \frac{V_m \sin(\omega)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dk} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} - \frac{(R_{\mu} + R_f + R_c) I_{dk}}{L_f} - \frac{V_{dc}}{L_f} - \frac{R_c K_{p1} I_{d1}^2}{L_f} - \frac{I_{d1} R_c K_{p1} K_{p1} V_{o1}}{L_f} \\ + \frac{R_c I_{d1} K_{p1} K_{p1} V_{o1}}{L_f} + \frac{R_c I_{d1} K_{p1} K_{p1} X_{v1}}{L_f} + \frac{R_c I_{d1} K_{p1} X_{v1}}{L_f} - \frac{R_c K_{p2} I_{d2}^2}{L_f} \\ - \frac{I_{d2} R_c K_{p2} K_{p2} V_{o2}}{L_f} + \frac{R_c I_{d2} K_{p2} K_{p2} V_{o2}}{L_f} + \frac{R_c I_{d2} K_{p2} K_{p2} X_{v2}}{L_f} + \frac{R_c I_{d2} K_{p2} X_{v2}}{L_f} \\ \dot{V}_{dk} = \frac{I_{dk}}{C_f} + \frac{K_{p1} I_{d1}^2}{C_f} + \frac{K_{p1} K_{p1} I_{d1} V_{o1}}{C_f} - \frac{K_{p1} K_{p1} I_{d1} V_{o1}}{C_f} - \frac{K_{p1} K_{p1} I_{d1} X_{v1}}{C_f} - \frac{K_{p1} I_{d1} X_{v1}}{C_f} \\ + \frac{K_{p2} I_{d2}^2}{C_f} + \frac{K_{p2} K_{p2} I_{d2} V_{o2}}{C_f} - \frac{K_{p2} K_{p2} I_{d2} V_{o2}}{C_f} - \frac{K_{p2} K_{p2} I_{d2} X_{v2}}{C_f} - \frac{K_{p2} I_{d2} X_{v2}}{C_f} \\ \dot{I}_{d1} = -\frac{V_{o1}}{L_1} - \frac{V_{dk} K_{p1} I_{d1}}{L_1} - \frac{K_{p1} K_{p1} V_{o1} V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{p1} K_{p1} V_{o1} V_{o1}}{L_1} \\ + \frac{K_{p1} K_{p1} V_{o1} X_{v1}}{L_1} - \frac{K_{p1} V_{o1} X_{v1}}{L_1} \\ \dot{V}_{o1} = \frac{I_{d1}}{C_1} - \frac{V_{o1}}{R_1 C_1} \\ \dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\ \dot{X}_{i1} = -I_{d1} - K_{p1} V_{o1} + K_{p1} V_{o1}^* + K_{p1} X_{v1} \\ \dot{I}_{d2} = -\frac{V_{o2}}{L_2} - \frac{V_{dk} K_{p2} I_{d2}}{L_2} - \frac{K_{p2} K_{p2} V_{o2} V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{p2} K_{p2} V_{o2} V_{o2}}{L_2} \\ + \frac{K_{p2} K_{p2} V_{o2} X_{v2}}{L_2} - \frac{K_{p2} V_{o2} X_{v2}}{L_2} \\ \dot{V}_{o2} = \frac{I_{d2}}{C_2} - \frac{V_{o2}}{R_2 C_2} \\ \dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\ \dot{X}_{i2} = -I_{d2} - K_{p2} V_{o2} + K_{p2} V_{o2}^* + K_{p2} X_{v2} \end{cases} \quad (2)$$

สมการที่ (1) และ (2) เป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพจำเป็นต้องทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทเลอร์อันดับหนึ่งจากสมการที่ (1) และ (2) เมื่อผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว เขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ (3) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (3) \quad \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) =$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \delta I_{sd} & \delta I_{sq} & \delta V_{bus,d} & \delta V_{bus,q} & \delta I_{dc} & \delta V_{dc} & \delta I_{L1} \\ \delta V_{o1} & \delta X_{v1} & \delta X_{i1} & \delta I_{L2} & \delta V_{o2} & \delta X_{v2} & \delta X_{i2} \end{bmatrix}^T \\ \delta \mathbf{u} &= \begin{bmatrix} \delta V_s & \delta V_{o1}^* & \delta V_{o2}^* \end{bmatrix}^T \\ \delta \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} \delta V_{dc} & \delta V_{o1} & \delta V_{o2} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_c K_{pv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & \frac{R_c K_{pv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} \\ 0 & -\frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & -\frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} \\ 0 & -\frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{pv1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_{pv2} \end{bmatrix}_{14 \times 3}$$

รายละเอียดของเมทริกซ์ A B C และ D สามารถแสดงได้ดังนี้

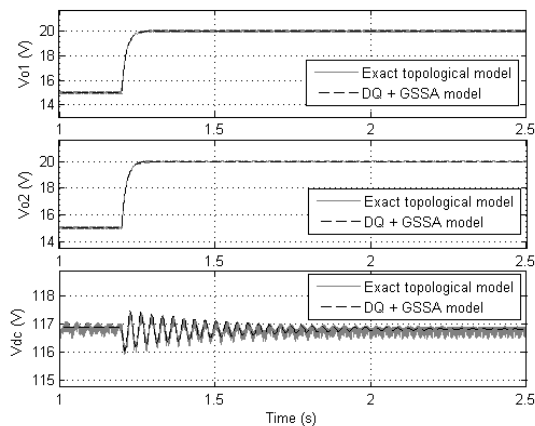
$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 14}$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & -\frac{(R_{\mu} + R_f + R_i)}{L_f} & -\frac{1}{L_f} & a(5,7) & -\frac{R_c K_{pi1} K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & -\frac{R_c K_{pi1} K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & -\frac{R_c K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & a(5,11) & -\frac{R_c K_{pi2} K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} & -\frac{R_c K_{pi2} K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} & -\frac{R_c K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pi1} K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & -\frac{K_{pi1} K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & \frac{K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & a(6,11) & \frac{K_{pi2} K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} & -\frac{K_{pi2} K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} & \frac{K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & -\frac{K_{pi1} K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & \frac{K_{pi1} K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & -\frac{K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_1 R_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv1} & K_{pi1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(11,6) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} & -\frac{K_{pi2} K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} & \frac{K_{pi2} K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2 R_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv2} & K_{pi2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

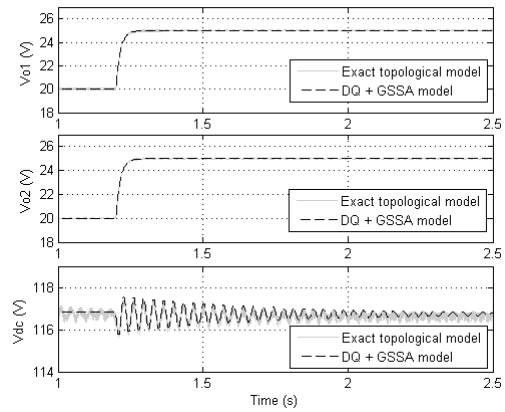
$$D(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$\begin{aligned} a(5,7) &= -\frac{2R_{p1}K_{p1}I_{L1,o}}{L_f} - \frac{R_cK_{p1}K_{p1}V_{o1,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{o1}K_{p1}X_{v1,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{o1}X_{i1,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{p1}K_{p1}V_{o1,o}^*}{L_f} \\ a(5,11) &= -\frac{2R_{p2}K_{p2}I_{L2,o}}{L_f} - \frac{R_cK_{p2}K_{p2}V_{o2,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{o2}K_{p2}X_{v2,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{o2}X_{i2,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{p2}K_{p2}V_{o2,o}^*}{L_f} \\ a(6,7) &= \frac{2K_{p1}I_{L1,o}}{C_f} + \frac{K_{p1}K_{p1}V_{o1,o}}{C_f} - \frac{K_{p1}K_{p1}X_{v1,o}}{C_f} - \frac{K_{p1}X_{i1,o}}{C_f} - \frac{K_{p1}K_{p1}V_{o1,o}^*}{C_f} \\ a(6,11) &= \frac{2K_{p2}I_{L2,o}}{C_f} + \frac{K_{p2}K_{p2}V_{o2,o}}{C_f} - \frac{K_{p2}K_{p2}X_{v2,o}}{C_f} - \frac{K_{p2}X_{i2,o}}{C_f} - \frac{K_{p2}K_{p2}V_{o2,o}^*}{C_f} \\ a(7,6) &= -\frac{K_{p1}I_{L1,o}}{L_1} - \frac{K_{p1}K_{p1}V_{o1,o}}{L_1} + \frac{K_{p1}K_{p1}X_{v1,o}}{L_1} + \frac{K_{p1}X_{i1,o}}{L_1} + \frac{K_{p1}K_{p1}V_{o1,o}^*}{L_1} \\ a(11,6) &= -\frac{K_{p2}I_{L2,o}}{L_2} - \frac{K_{p2}K_{p2}V_{o2,o}}{L_2} + \frac{K_{p2}K_{p2}X_{v2,o}}{L_2} + \frac{K_{p2}X_{i2,o}}{L_2} + \frac{K_{p2}K_{p2}V_{o2,o}^*}{L_2} \end{aligned}$$

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กแบบชั่วคราวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB จะได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 ผลการตอบสนอง  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$  และ  $V_{dc}$  ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  จาก 15 V ไปเป็น 20 V



รูปที่ 4 ผลการตอบสนอง  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$  และ  $V_{dc}$  ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  จาก 20 V ไปเป็น 25 V

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1

| พารามิเตอร์                             | ค่า                    |
|-----------------------------------------|------------------------|
| $V_s$                                   | 50 $V_{rms/phase}$     |
| $\omega$                                | $2\pi \times 50$ rad/s |
| $R_{eq}$                                | 0.1 $\Omega$           |
| $L_{eq}$                                | 24 $\mu H$             |
| $C_{eq}$                                | 2 nF                   |
| $R_f$                                   | 0.1 $\Omega$           |
| $L_f$                                   | 30 $\mu H$             |
| $R_c$                                   | 0.01 $\Omega$          |
| $C_f$                                   | 1000 $\mu F$           |
| $L_1 = L_2$ ( $\Delta L \leq 0.2A$ )    | 15 mH                  |
| $C_1 = C_2$ ( $\Delta V_o \leq 2.8mV$ ) | 1000 $\mu F$           |
| $R_1 = R_2$                             | 15 $\Omega$            |

รูปที่ 3 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) แรงดันเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผันแบบบักค์ชุดที่หนึ่ง ( $V_{o1}$ ) และแรงดันเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผันแบบบักค์ชุดที่สอง ( $V_{o2}$ ) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) และแรงดันเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผัน

แบบบักซ์ชุดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลา 1.2 วินาที และรูปที่ 4 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) แรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่หนึ่ง ( $V_{o1}$ ) และแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง ( $V_{o2}$ ) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) และแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1.2 วินาที จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณ พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ดังนั้นการพิสูจน์แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบักซ์ขนานกัน ด้วยวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้

#### 4. การวิเคราะห์เสถียรภาพ

##### 4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบพื้นฐานที่ใช้สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยมีเงื่อนไขคือถ้าค่าเจาะจงของระบบทุกค่าอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอสจะถือว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพ [9]-[11] ในการวิเคราะห์จะใช้เมตริกซ์  $A$  ที่ได้จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3) การหาค่าเจาะจงสามารถได้จากสมการที่ (4) โดยใช้การคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านคำสั่ง “eig(A)”

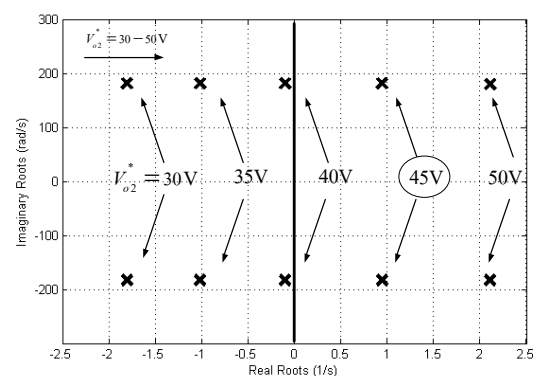
$$\det[A - \lambda I] = 0 \quad (4)$$

จากนั้นจะทำการตรวจสอบค่าเจาะจงของระบบ ถ้าค่าเจาะจงเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (5) จะถือว่าระบบมีเสถียรภาพ [9]

$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (5)$$

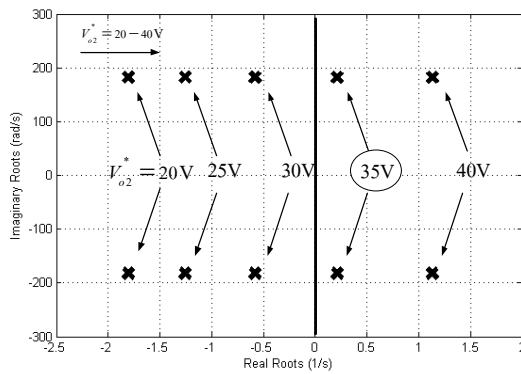
เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  และ  $n$  คือ จำนวนตัวแปรสถานะของระบบ

การพิจารณาเสถียรภาพ จะพิจารณาค่าเจาะจงจากแบบจำลองในสมการที่ (3) โดยปรับเปลี่ยนค่าจุดการทำงาน ซึ่งในที่นี้คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ จะได้ค่าเจาะจงเด่น (dominant eigenvalues) เมื่อทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง ( $V_{o2}^*$ ) จาก 30 V จนถึง 50 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่หนึ่ง ( $V_{o1}^*$ ) เท่ากับ 20 V แสดงได้ดังรูปที่ 5 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง ( $V_{o2}^*$ ) จาก 20 V จนถึง 40 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่หนึ่ง ( $V_{o1}^*$ ) เท่ากับ 30 V แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ

เมื่อมีการคงค่า  $V_{o1}^*$  เท่ากับ 30 V



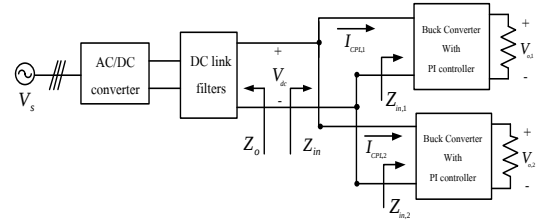
รูปที่ 6 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ

เมื่อมีการคงค่า  $V_{o1}^*$  เท่ากับ 20 V

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลตวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่สองเท่ากับ 45 V ส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่ามากกว่าศูนย์หรือมีตำแหน่งอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลตวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 45 V เป็นต้นไป และจากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลตวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 35 V เป็นต้นไป

#### 4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก

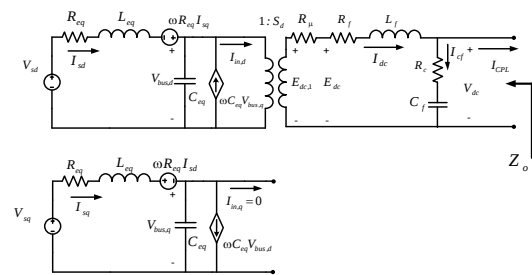
หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพตามเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกจะอาศัยเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_o$ ) ของวงจรด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) ของวงจรด้านฝั่งโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีการควบคุมขนานกัน ดังรูปที่ 7 โดยมีเงื่อนไขคือ ถ้าขนาดของ  $Z_o$  มีค่ามากกว่าขนาดของ  $Z_{in}$  ที่ความถี่ใดๆ ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพ



รูปที่ 7 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด  
วงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีการควบคุมขนานกัน

จากระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 7 ประกอบด้วยวงจรทางด้านแหล่งจ่ายที่มีวงจรกรองกำลังไฟฟ้า และวงจรทางฝั่งโหลดคือวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีตัวควบคุมขนานกัน ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์สามารถแยกพิจารณาวงจรออกเป็นทีละฝั่งดังต่อไปนี้

##### - พิจารณาทางฝั่งแหล่งจ่าย



รูปที่ 8 วงจรที่พิจารณาทางฝั่งแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 8 เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรด้วยกฎแรงดันและกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการตัวแปรสถานะดังสมการที่ (6) และ (7) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} + \omega I_{sd} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} + \omega V_{bus,d} \end{cases} \quad (6)$$

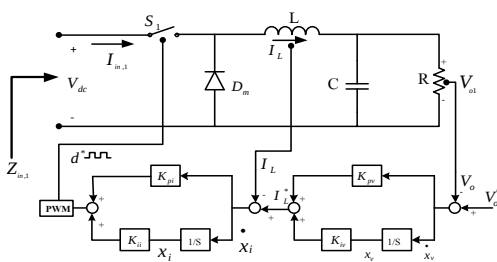
$$\begin{cases} \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} - \frac{(R_\mu + R_f + R_c) I_{dc}}{L_f} \\ \quad + \frac{R_c}{L_f} I_{CPL} - \frac{1}{L_f} V_{dc} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_f} I_{dc} - \frac{1}{C_f} I_{CPL} \end{cases} \quad (7)$$

เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 8 สามารถหาได้จากสมการที่ (8) ดังนี้

$$Z_o = \frac{V_{dc}}{I_{CPL}} \quad (8)$$

- พิจารณาทางฝั่งโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มี การควบคุมขนานกัน

การหาอินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) ของวงจรทางฝั่งโหลด ที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ขนานกัน ทำได้โดยการ ขนานกันระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผัน แบบบักก์ตัวที่หนึ่ง ( $Z_{in,1}$ ) และอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร แปลงผันแบบบักก์ตัวที่สอง ( $Z_{in,2}$ ) นั่นคือ  $Z_{in,1} // Z_{in,2}$  ก็จะได้อินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) ของระบบที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบักก์ขนานกัน [8] ดังสมการที่ (9) พิจารณาที่โหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ตัวที่หนึ่งได้ดังรูป ที่ 9 ดังนี้



รูปที่ 9 วงจรที่พิจารณาทางด้านโหลดวงจรแปลงผัน แบบบักก์ที่มีตัวควบคุมตัวที่หนึ่ง

$$Z_{in} = Z_{in,1} // Z_{in,2} \quad (9)$$

จากรูปที่ 9 เมื่อการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยกฎแรงดัน และกฎกระแสของเคอร์ซอพฟ์ จะได้สมการตัวแปรสถานะ ดังสมการที่ (10) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -\frac{R_L}{L} I_L - \frac{1}{L} V_o + \frac{d^*}{L} V_{dc} \\ \dot{V}_o = -\frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\ \dot{x}_v = -V_o + V_o^* \\ \dot{x}_i = -I_L + K_{pv} V_o^* - K_{pv} V_o + K_{iv} x_v \end{cases} \quad (10)$$

เมื่อ

$$d^* = -K_{pv} I_L - K_{pi} K_{pv} V_o + K_{pi} K_{pv} V_o^* + K_{pi} K_{iv} x_v + K_{ii} x_i$$

พิจารณากระแสที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันแบบบักก์ตัว ที่หนึ่งจะได้ดังสมการที่ (11) ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{in,1} &= u(t) I_L \\ I_{in,1} &= -K_{pv} I_L^2 - K_{pi} K_{pv} V_o I_L + K_{pi} K_{pv} V_o^* I_L \\ &\quad + K_{pi} K_{iv} x_v I_L + K_{ii} x_i I_L \end{aligned} \quad (11)$$

เมื่อ  $u(t) = d^*$

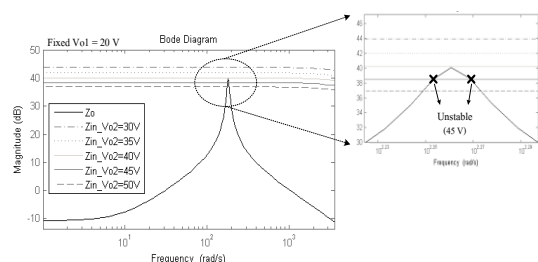
อินพุตอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 9 สามารถหาได้ จากสมการที่ (12) ดังนี้

$$Z_{in,1} = \frac{V_{dc}}{I_{in,1}} \quad (12)$$

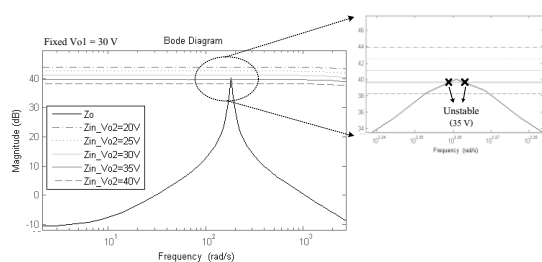
สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) และอินพุตอิมพีแดนซ์ ( $Z_o$ ) ด้วยการโปรแกรมบน คอมพิวเตอร์ และนำไปเขียนแผนภาพโบเดเพื่อแสดง ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองในย่านความถี่ต่างๆ

การวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำการปรับค่าแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 30 V จนถึง 50 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ )

เท่ากับ 20 V มีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 10 และปรับค่าแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 20 V จนถึง 40 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) เท่ากับ 30 V มีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 แผนภาพโบดของ  $Z_o$  และ  $Z_{in}$  เมื่อมีการคงค่า  $V_{o1}^*$  เท่ากับ 20 V

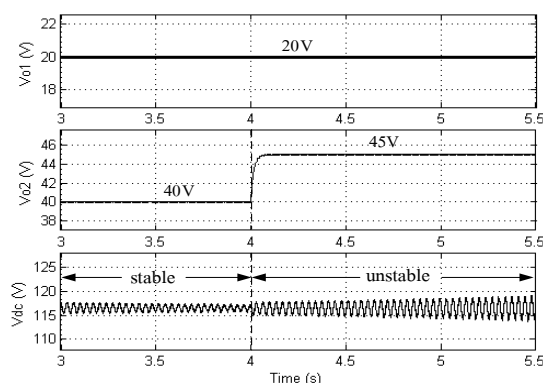


รูปที่ 11 แผนภาพโบดของ  $Z_o$  และ  $Z_{in}$  เมื่อมีการคงค่า  $V_{o1}^*$  เท่ากับ 30 V

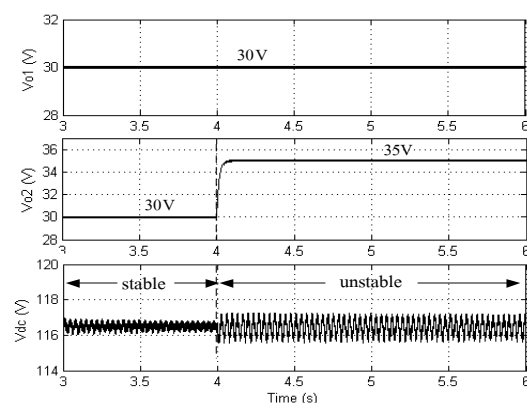
จากรูปที่ 10 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่สอง ( $V_{o2}^*$ ) จาก 30 V จนถึง 50 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่หนึ่ง ( $V_{o1}^*$ ) เท่ากับ 20 V พบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 45 V เป็นต้นไป และจากรูปที่ 11 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่สอง ( $V_{o2}^*$ ) จาก 20 V จนถึง 40 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่หนึ่ง ( $V_{o1}^*$ ) เท่ากับ 30 V พบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนด

วงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 35 V เป็นต้นไป

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในรูปที่ 5 และ 10 กับรูปที่ 6 และ 11 จะดำเนินการโดยการจำลองของระบบในรูปที่ 1 บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 12 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการคงค่า  $V_{o1}^*$  เท่ากับ 30 V



รูปที่ 13 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการคงค่า  $V_{o1}^*$  เท่ากับ 20 V

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 12 เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่หนึ่ง ( $V_{o1}^*$ ) เท่ากับ 20 V และเปลี่ยนแปลงค่า

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชด  
ที่สอง ( $V_{o2}^*$ ) จาก 40 V ไป 45 V ที่ค่าแรงดัน 45 V จะทำ  
ให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซีเกิดการกระเพื่อมของ  
แรงดันที่มากขึ้นหรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของ  
ระบบ และจากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 13 เมื่อ  
ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผัน  
แบบบัคค์ชดที่หนึ่ง ( $V_{o1}^*$ ) เท่ากับ 30 V และเปลี่ยนแปลง  
ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์  
ชดที่สอง ( $V_{o2}^*$ ) จาก 30 V ไป 35 V ที่ค่าแรงดัน 35 V จะ  
เกิดการขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์  
เสถียรภาพสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้ถูกต้อง

## 5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของ  
ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโพลดเป็นวงจรแปลงผัน  
แบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยอาศัยทฤษฎีบทค่า  
เจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบุคค์ โดยเริ่มจาก  
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งจากผล  
การวิเคราะห์เสถียรภาพทั้ง 2 วิธี พบว่าให้ผลการ  
วิเคราะห์ที่ตรงกัน และสอดคล้องกับการยืนยันผลโดยการ  
จำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบน  
คอมพิวเตอร์

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อัน  
เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta, and G.A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, Jul. 2006.
- [2] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach." *IEEE Trans. on Circuit and Systems.*, Vol. 44, pp. 767-770, August 1997.
- [3] C. Rivetta, G.A. Williamson, and A. Emadi, "Constant power loads and negative impedance instability in sea and undersea vehicles: statement of the problem and comprehensive large-signal solution," *Proc. IEEE Electric Ship Tech Symposium.*, July 2005, pp. 313-320.
- [4] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC System with mixed load using DQ-transformation method." In 2008 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*. Cambridge, UK, 2008 pp. 19-24.
- [5] R. D. Middlebrook, "Input filter consideration in design and application of switching regulators," *IEEE Industry Applicat. Soc. Annu. Meeting*, 1976, pp. 366-382.
- [6] A. Emadi, "Modeling of power electronic loads in AC distribution systems using the generalized state-space averaging method." *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 51, no. 5, pp. 992-1000, Oct 2004.
- [7] A. Emadi, "Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging

- method.” *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 51, no. 3, pp. 661-668, Jun 2004.
- [8] X. Feng, J. Liu, and F. C. Lee, “Impedance specification for stable DC distributed power system,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 157-162, Mar. 2002.
- [9] T. Sopapirm, “Instability mitigation of a three-phase diode rectifier feeding a controlled buck converter by using the active damping method,” in *2018 21st International Conference on Electrical Machines and System*, Jeju, 2018, pp. 745-748.
- [10] กองพัน อารีรักษ์, “ระบบควบคุม,” พิมพ์ครั้งที่ 1. นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2560.
- [11] เทพพนม โสภะเพิ่ม, “การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2554.

## การศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

### A Study of Discharge Heads Affecting the Temperature and Amount of Hot Water Using Mathematical Modeling of a Solar Water Heating System

จิรวัดน์ สิตรานนท์<sup>1\*</sup> กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์<sup>2</sup> ณัฐพล รุ่งประแสง<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี, 21110

<sup>2</sup>ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ, 10800

<sup>3</sup>กองกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

17 ถนนพระราม 1 แขวงรอบเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ, 10300

Jirawat Sitranon<sup>1\*</sup> Kittiwoot Sutthivirode<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bang Phra Sub-district, Siracha District, Chonburi 21110

<sup>2</sup>Department of Mechanical Education, Faculty of Industrial Education, King Mongkut's University  
of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

<sup>3</sup>Bureau of Energy Regulation and Conservation, Department of Alternative Energy Development  
and Efficiency, Ministry of Energy

17 Rama 1 Road, Rong Muang, Pathum Wan, Bangkok 10330

\*Corresponding author Email: Jirawat\_solar@hotmail.com

(Received: February 3, 2020; Accepted: April 7, 2020)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ และปริมาณน้ำร้อน ในถังเก็บน้ำร้อนของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบที่ถูกรออกแบบประกอบไปด้วยแผงรับรังสีอาทิตย์ขนาด 1.58 m<sup>2</sup> ถึงเก็บน้ำด้านบน ท่อสามทาง และถังเก็บน้ำร้อน การจำลองระบบถูกดำเนินการในช่วงเวลา 8:00–17:00น. เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5, 1, 2 และ 3 m เมื่อมีค่ารังสีอาทิตย์ 20 MJ/m<sup>2</sup>d ระบบนี้ สามารถทำงานได้เมื่อความดัน (หน่วยความสูงของน้ำ) ภายในแผงมากกว่าระดับความสูงในการส่งน้ำของระบบ ถ้าเราเพิ่มระดับความสูงในการส่งน้ำ ผลที่ได้ อุณหภูมิของน้ำร้อนและความดันไอเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณน้ำร้อนที่ได้จะลดลงตามไปด้วย เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงในการส่งน้ำ ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้สูงสุดคือ 89.39 L/d และประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดคือ 40.71% ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ต่ำสุดคือ 37.2 L/d และประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำสุดคือ 19.93% ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 3 m นอกจากนี้อุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนสูงสุด 70.46°C ระดับความสูงในการ

ส่งน้ำ 3 m และต่ำสุดที่ 64.2 °C ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m จากงานวิจัยนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ยอมรับได้กับผลการทดลองที่มีความแตกต่างระหว่างค่าการคำนวณและการวัดมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า  $\pm 10\%$

**คำสำคัญ:** น้ำร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

### ABSTRACT

The aim of this research was to study the discharge heads affecting the temperature and hot water amount in the storage tank of a solar water heating system (SWHS). The designed system consisted of 1.58-m<sup>2</sup> flat plate solar collectors, an overhead tank, the T-vent tube and the hot water storage tank. The system simulation was done during 8:00 am–5:00 for 9 h for discharge head of 0.5, 1, 2 and 3 m when solar irradiation was 20 MJ/m<sup>2</sup> d. The system could work when the pressure head was slightly more than the discharge head of the system. If the discharge head was increased, the hot water temperature and vapor pressure increased. However, hot water production reduced accordingly. By varying the discharge head, the maximum produced hot water was 89.39 L/d and the maximum thermal efficiency was 40.71% at discharge head 0.5 m, the minimum produced hot water was 37.2 L/d and the minimum thermal efficiency was 19.93% at discharge head 3 m. Furthermore, the maximum water temperature in the storage tank was roughly 70.46°C at discharge head 3 m and the minimum was roughly 64.2°C at discharge head 0.5 m. From this research of the mathematical model gave a reasonable agreement with the experimental results when the difference between the calculated and measured values was less than  $\pm 10\%$ .

**Keyword:** Hot water, Mathematical model, Solar water heating system.

### 1. บทนำ

การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่นำไปสู่การปล่อยก๊าซขนาดใหญ่และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกในการผลิตพลังงานและเป็นความท้าทายในการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดและมีกระจายอยู่เกือบทุกที่ ปริมาณรังสีอาทิตย์ถูกกักเก็บโดยตัวดูดซับรังสีอาทิตย์ที่ขึ้นอยู่กับทิศทางและพื้นที่ตัวดูดซับ การพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีข้อจำกัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากต้นทุนทางความร้อนจากรังสีอาทิตย์ต่ำ การพัฒนาระบบความร้อนที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพทางความร้อนขึ้นอยู่กับ

พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น การออกแบบตัวดูดซับ วัสดุที่ใช้ทำฉนวน และตัวดูดซับ สารทำงานภายในระบบ หลักการหมุนเวียนของสารทำงานในระบบ การไม่ใช้แหล่งพลังงานจากภายนอกในการทำงานของระบบโดยอาศัย ความดันและการถ่ายเทความร้อน อัตราการไหลของสารทำงาน

ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (solar water heating system) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน ขึ้นอยู่กับวิธีการหมุนเวียนน้ำภายในระบบว่าเป็นแบบไหลเวียนตามธรรมชาติ (Thermosyphon) หรือแบบไหลเวียนตามแรงดัน (Force-circulation) ซึ่งแบบไหลเวียนตามธรรมชาติ ถึงเก็บเก็บน้ำร้อนจะหนักและมีแรงดันสูง ส่วนแบบไหลเวียนตามแรงดัน (Force-circulation) จะลดน้ำหนักของระบบ

ที่กระทำกับหลังคาของที่อยู่อาศัย แม้ว่าแบบไหลเวียนตามแรงดันจะไม่ประหยัดพลังงานไฟฟ้า [1-2] ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไหลเวียนตามแรงดันแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [3] ประสิทธิภาพของแบบไหลเวียนตามแรงดันมีค่าประมาณ 50-60% ส่วนแบบไหลเวียนตามธรรมชาติมีค่าประมาณ 34-38% [4]

การปั้มน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ขนาดพื้นที่รับแสง 1 m<sup>2</sup> ประสิทธิภาพของระบบปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 0.12 - 0.14% สำหรับความสูงในการจ่ายน้ำ 6 - 10 เมตร และระบบนี้สามารถปั้มน้ำได้ 12 - 23 รอบต่อวัน มวลน้ำที่สามารถขับเคลื่อนได้ในแต่ละรอบการทำงาน 15 กิโลกรัม [5] การศึกษาพัฒนาของระบบสูบน้ำชนิดลูกสูบโดยอาศัยพลังงานไอน้ำใช้ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศร่วมกับ heat pipe ขนาดพื้นที่รับแสง 2 m<sup>2</sup> สามารถสามารถผลิตไอน้ำร้อนได้ 110 °C ประสิทธิภาพปั้มน้ำมีค่าต่ำมากประมาณ 0.05% ปริมาณน้ำที่ได้จากการขับเคลื่อน 10-20 L/h ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำระหว่าง 2 ถึง 8 m [6] การทดลองและทฤษฎีของการศึกษาการขับเคลื่อนน้ำโดยใช้พลังงานความร้อน (การปั้มน้ำแบบขยายตัวของกำลังไอน้ำ) ระบบปั้มน้ำใช้ไฟฟ้าแหล่งให้พลังงานความร้อน เพื่อผลิตไอน้ำเป็นสารทำงานที่อุณหภูมิต่ำ (90-120 °C) จากการทดลองประสิทธิภาพปั้มน้ำมีค่าเท่ากับ 0.005-0.03% ปริมาณน้ำที่ได้จากการขับเคลื่อน 1-8 L/cycle และความสูงของด้านสูบน้ำ 1-2.5 m อย่างไรก็ตามระบบยังต้องใช้เวลาควบคุมการทำงานของระบบด้วยมือ [7]

การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (SWHS) ร่วมด้วยปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบใหม่โดยระบบประกอบด้วยตัวรับรังสีแบบแผ่นราบขนาดพื้นที่ 1.58 m<sup>2</sup> ถึงเก็บน้ำด้านบนถูกติดตั้งอยู่ด้านบน ถึงเก็บน้ำขนาดใหญ่โดยมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ภายในติดตั้งอยู่ด้านล่าง ระบบจะเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใส่ให้ระบบต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 580, 600 และ 630 W/m<sup>2</sup> ที่ระดับความสูงในการจ่ายน้ำ

1, 1.5 และ 2 m อุณหภูมิในในตัวรับรังสีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 75-78 °C อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อน มีค่าประมาณ 46-61 °C การถ่ายโอนความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนโดยมีแลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งอยู่ภายใน ประสิทธิภาพปั้มน้ำเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.0014-0.0019% การหมุนเวียนน้ำภายในระบบ SWHS มีค่าระหว่าง 12 และ 59 L/d อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพทางความร้อนรายวันมีค่าประมาณ 7-13% สรุปได้ว่าการสูญเสียพลังงานความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน ระบบอาจจะทำงานสำหรับที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 1-3 m เท่านั้นขึ้นอยู่กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ป้อนให้กับระบบ อย่างไรก็ตามระบบสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการหมุนเวียนน้ำและลดน้ำหนักของระบบทำน้ำร้อนที่กระทำกับหลังคาของที่อยู่อาศัย [8] การเก็บน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนโดยตรง ไม่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนมีค่า 17.4% ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากระบบเดิม แต่ยังพบการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการระบายไอน้ำ ในช่วงที่น้ำภายในแผงรับรังสีให้ไหลออกไปเก็บในถังเก็บน้ำร้อน [9] ต่อมาได้ปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยกำลังไอน้ำ โดยการต่อท่อสามทางเพื่อนำไอน้ำมาระบายในถังเก็บน้ำร้อนและเปิดสู่บรรยากาศภายในถังเก็บน้ำร้อน เพื่อลดการสูญเสียความร้อนของไอน้ำที่ระบายสู่บรรยากาศ ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงถึง 41.2% [10]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (SWHS) เพื่อหาความเหมาะสมของระดับความสูงในการส่งน้ำ ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำร้อน และอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน โดยเทียบผลการทดลองที่ระดับความสูง 1 m และการออกแบบความสูงในการส่งน้ำ 0.5 ถึง 3 m สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 2. ทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

พลังงานสะสมที่กักเก็บในถังเก็บน้ำร้อน

$$Q_s = m_w C_{pw} (T_{end} - T_{initia}) \quad (1)$$

เมื่อ  $Q_s$  คือพลังงานที่กักเก็บ (kJ)  $m_w$  คือมวลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (kg)  $C_{pw}$  ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg °C) และ  $(T_{end} - T_{initia})$  อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นภายในถังเก็บน้ำร้อน (°C) ประสิทธิภาพทางความร้อนรายวันของระบบในรูปแบบเปอร์เซ็นต์  $\eta_t$  คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ถูกกักเก็บภายในถังเก็บน้ำร้อนรายวันต่อผลรวมค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนตัวรับรังสี

$$\eta_t(\%) = \frac{\int \dot{Q}_s dt}{A_c \int I_T dt} \times 100 \quad (2)$$

หรือ 
$$\eta_t(\%) = \frac{Q_s}{H_{tot}} \times 100 \quad (3)$$

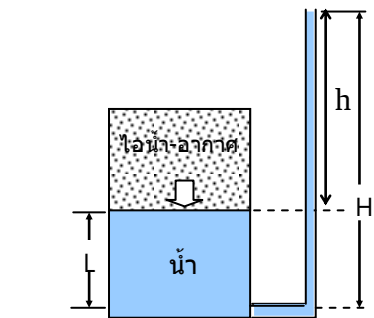
เมื่อ  $A_c$  คือพื้นที่ตัวรับรังสี ( $m^2$ )  $I_T$  ความเข้มค่ารังสีดวงอาทิตย์ ( $W/m^2$ ) และ  $H_{tot}$  ผลรวมค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนตัวรับรังสี (kJ)

นอกจากนั้นค่ารังสีดวงอาทิตย์วิกฤต (Critical Solar irradiance) ได้ถูกเพิ่มเข้ามา โดยที่ค่ารังสีดวงอาทิตย์วิกฤตเป็นค่าเริ่มต้นที่ใส่ให้แก่ปั๊มเพื่อที่จะให้ปั๊มสามารถเริ่มทำงานได้ การคำนวณความดันภายในแผงรับรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ความดันของไอน้ำ-อากาศภายในแผงรับรังสีอาทิตย์เกิดจากความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จาก Bernoulli equation และแปรตามระดับน้ำ  $h$  ดังรูปที่ 1

$$\frac{P_c}{\gamma} = h + (1 + k_d) \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

$P_c$  คือความดันรวมในแผง (Pa)  $\gamma$  น้ำหนักจำเพาะของน้ำ ( $N/m^2$ )  $h$  ระดับความสูงในการส่งน้ำที่เปลี่ยนแปลง (m)  $k_d$  สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  $V$  ความเร็วของการไหล (m/s)  $g$  ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )



รูปที่ 1 ตัวรับรังสีอาทิตย์ขณะขับเคลื่อนน้ำด้วยความดันไอน้ำ-อากาศ

$$\text{เมื่อ } L = \frac{(1-h)}{\sin 14^\circ} \text{ เมื่อ } H=1 \text{ m} \quad (5)$$

เมื่อแผงรับรังสีอาทิตย์เอียง  $14^\circ$  กับแนวราบ หันไปทางทิศใต้ และ  $H$  คือระดับความสูงในการส่งน้ำ (m) จากสมมูลมวล ปริมาตรของน้ำในแผงรับรังสีอาทิตย์ที่ลดลง = ปริมาณน้ำที่ไหลออกทางท่อส่งน้ำ

เมื่อ  $H=h$  ทำให้  $L=0$  ระดับความสูงของน้ำภายในแผงจึงเป็น 0 m แสดงว่าน้ำภายในแผงไหลออกจนหมด

$$A_o dL = A_T v dt \quad (6)$$

เมื่อ  $A_o$  คือพื้นที่หน้าตัดของท่อในแผงรับรังสีอาทิตย์ ( $m^2$ )  $A_T$  พื้นที่หน้าตัดของท่อส่งน้ำ ( $m^2$ )  $t$  เวลา (s) ดังนั้นจะสามารถประเมินปริมาตรไอน้ำ-อากาศ ที่เปลี่ยนแปลงในทอมของ  $h$  ได้ดังนี้

$$dV = A_o dh / \sin 14^\circ = A_T v dt \quad (7)$$

ค่า  $dV$  สามารถนำไปคำนวณความดันรวมของไอน้ำ-อากาศ ในแผงรับรังสีอาทิตย์ของสมการ 4

$$W = V_c \times \rho_w \times g \times h \quad (8)$$

เมื่อ  $W$  คือ พลังงานที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำต่อรอบ  
(J)  $V_c$  คือปริมาตรของน้ำที่สามารถส่งได้ต่อรอบ ( $m^3$ )  
 $\rho_w$  ความหนาแน่นของน้ำ ( $kg/m^3$ )  $g$  ความเร่งเนื่องจาก  
แรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ )  $h$  ระดับความสูงในการส่งน้ำ  
(m)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในน้ำในแผงรับรังสีอาทิตย์  
(ปั๊มพลังงานความร้อน) สมมติฐานในระบบประกอบด้วย

1. อุณหภูมิของของไหลทุกตัวในแผงเท่ากัน
2. มวลของอากาศในแผงของแต่ละวัฏจักรเปลี่ยนตามเวลา และมีค่าน้อยลง ถ้าอุณหภูมิในน้ำร้อนในแผงสูงขึ้น และมีค่ามากพอที่จะทำให้ความดันรวมมากกว่า 1 บรรยากาศ
3. สำหรับกระบวนการบีบอัดจากผลของความดันบรรยากาศและคอลัมน์น้ำในท่อส่ง ทำให้ความดันไอน้ำในแผงถึงจุดอิ่มตัวเสมอ
4. ปริมาตรอากาศเริ่มต้น 1.3 ลิตร ปริมาตรน้ำ 4.1 ลิตร และมีการปั๊มน้ำ 3.1 L/ cycle
5. ที่ heating stage ความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ เนื่องจากมีอากาศไหลเข้ามาในระบบ
6. ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ น้ำ และอากาศใช้ค่าเฉลี่ย
7. ความเร็วของการไหลน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมอื่น ๆ

โดยใช้ Lumped model อุณหภูมิในน้ำในแผงรับรังสีอาทิตย์ประเมินได้จากสมดุลพลังงาน

$$\frac{d(m_a C_{Pa} T)}{dt} + \frac{d(m C_p T)}{dt} + \frac{d(m_L C_{PL} T)}{dt} = \alpha \tau A_c I - \lambda \frac{dm}{dt} - \frac{dW}{dt} - U A_c (T - T_a) \quad (9)$$

พลังงานที่ อากาศ ไอน้ำ และ น้ำในแผงได้รับ = พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผง - พลังงานที่ใช้ในการระเหยของน้ำ - งานที่ใช้ในการปั๊มน้ำ - ความสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม

เมื่อ  $I$  พลังงานจากแสงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )  $m_a$  มวลของอากาศในแผง (kg)  $m$  มวลของไอน้ำในแผง (kg)  $m_L$  มวลของน้ำในแผง (kg)  $C_p$  ความร้อนจำเพาะ ( $kJ/kg \text{ } ^\circ C$ )  $T$  อุณหภูมิของของไหลในแผง ( $^\circ C$ )  $\alpha \tau$  คือ สมบัติของแผง  $A_c$  พื้นที่รับแสงของท่อในแผง  $\lambda$  ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ ( $kJ/kg$ )  $W = P_c V_c$  งานของการปั๊มน้ำ (kJ)  $U$  คือ top loss coefficient ( $W/m^2 K$ )  $T_a$  คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $^\circ C$ )  $a$  แทน อากาศ  $L$  แทน น้ำ

$$P = 133.32 \times 10^{(8.07131 - \frac{1730.63}{T+233.426})} \quad (10)$$

$$P_a = \frac{m_a R_a T}{V}; 8 \text{ kg} \quad (11)$$

$$V = V_o + \frac{A_o}{\sin 14} \Delta h \quad (12)$$

$$v = \frac{\Delta V}{A_T \Delta t} \quad (13)$$

$$A_T = \pi \left( \frac{0.006}{2} \right)^2; A_o = 64\pi \left( \frac{0.013}{2} \right)^2 \quad (14)$$

โดยความดันรวมของไอน้ำในแผง ( $P_c$ ) จะต้องเป็นไปตามสมการ 4, 7, 9-12

$$h = h_o + \Delta h = \frac{P_c}{\gamma} - (1 + k_d) \frac{V^2}{2g} \quad (15)$$

เมื่อ  $P$  คือความดันไอน้ำ (kPa)  $V$  ปริมาตรใหม่ของไอน้ำในแผง ( $m^3$ )  $V_o$  ปริมาตรเดิมของไอน้ำในแผง ( $m^3$ )  $R_a$  gas constant ของอากาศ ( $kJ/kg K$ )  $P_a$  ความดันอากาศภายในแผง (kPa)

สมดุลพลังงานขณะเกิดสภาวะอากาศในแผงรับรังสีความร้อน พลังงานความร้อนไอน้ำ ( $T_c$ ) ภายในแผงจะมีการถ่ายโอนความร้อนให้แก่ น้ำเย็น ( $30^\circ C$ ) ที่ไหลมาจากถังเติมน้ำด้านบน ทำให้ไอน้ำทั้งหมดกลั่นตัว อากาศและน้ำร้อนที่เหลือในแผงจากขั้นตอนก่อนจะลดอุณหภูมิลง ส่วนน้ำเย็นบางส่วนจะกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิผสม ดังนั้นสมดุลของพลังงานจะเกิดขึ้นดังนี้

พลังงานสูญเสียของไอน้ำร้อนที่กลั่นตัว + พลังงานของน้ำร้อนที่ลดลง + พลังงานของอากาศที่ลดลง = พลังงานของน้ำที่เย็น ( $30^{\circ}\text{C}$ ) ที่เพิ่มขึ้น + พลังงานที่ใช้ในการระเหยเป็นไอน้ำ ณ อุณหภูมิผสม ( $T_x$ )

$$m_v(hg_{T_c} - hf_{T_x}) + (m_w C_{pw} + m_a C_{pa})(T_c - T_x) = m_f(hf_{T_x} - hf_{30}) + m_e hf_{g_{T_x}} \quad (16)$$

เมื่อ  $m_v$  คือ มวลของไอน้ำ (kg)  $m_w$  มวลของน้ำ (kg)  $m_a$  มวลของอากาศ (kg) ที่  $T_c$   $m_f$  มวลของน้ำ (kg) ที่  $30^{\circ}\text{C}$   $h_g$  คือ enthalpy ของไอน้ำ (kJ/kg)  $h_f$  คือ enthalpy ของน้ำ (kJ/kg)  $h_{fg}$  ความร้อนแฝงของการเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)  $C_{pa}$  ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg  $^{\circ}\text{C}$ )  $m_e$  มวลของน้ำที่ระเหยเป็นไอ (kg)  $T_x$  อุณหภูมิผสม ( $^{\circ}\text{C}$ )

การวัดความแตกต่างจากผลการทดลอง และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการประเมินผลด้วย RMSE (Root Mean Squared Error) แสดงผลของความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คำนวณได้ดังสมการที่ 17

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_E - X_S)^2}{N}} \quad (17)$$

เมื่อ  $X_E$  คือ ค่าของผลการทดลอง  $X_S$  คือ ค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์  $N$  คือ จำนวนข้อมูล

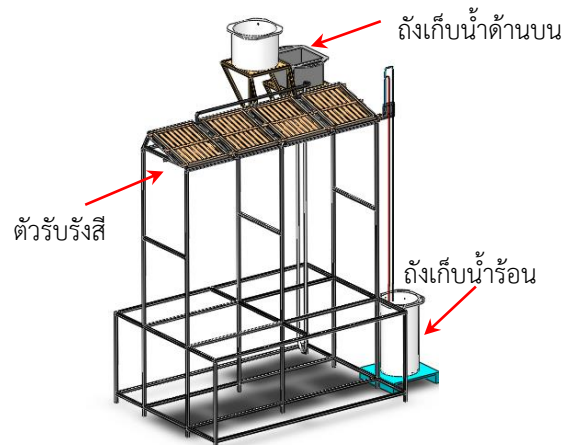
### 3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์

ตัวรับรังสี มีพื้นที่รับแสง 1.58 ตารางเมตร (จำนวน 4 แผง ขนาดแต่ละแผง 0.638 X 0.619 m) และติดตั้งท่ามกลาง 14 องศา กับพื้นราบ ภายในบรรจุน้ำจำนวน 4.1 L และอากาศจำนวน 1.3 L

ถังเก็บน้ำด้านบน เป็นตัวระบายความร้อนทำจากสแตนเลส ขนาด 40 x 40 cm สูง 30 cm มีรูระบาย (Air vent) ที่ด้านบนของถัง ถังนี้ติดตั้งอยู่ด้านบนและต่อเชื่อม

กับตัวรับรังสี โดยท่อ ระดับของ ถังเก็บน้ำด้านบนควรจะ มีระดับสูงเพียงพอเพื่อให้แน่ใจได้ว่าเฮดความสูงมีค่ามากกว่าการสูญเสียที่วาล์วควบคุมในระหว่างจังหวะการดูดน้ำ สำหรับในแต่ละรอบการทำงานวาล์วกลอย ขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่ภายในถังเก็บน้ำด้านบนกำหนดน้ำ 3.1 L ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2 ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (SWHS)

ถังเก็บน้ำร้อน รูปทรงกระบอก ความสูงของถัง 42 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 cm หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน

วาล์วควบคุม เป็นวาล์วทางเดียว ทำจากสแตนเลส ขนาด 1/2" ยาวตามความสูงของแผงเป็นรูปตัวยู (ปลายตัวยูสัมผัสพื้น) ถูกติดตั้งระหว่างตัวรับรังสี และถังเก็บน้ำด้านบน น้ำสามารถไหลจากถังเก็บน้ำด้านบนสู่ตัวรับรังสี เนื่องจากว่าเฮดความสูงเพียงพอเมื่อแรงดันภายในตัวรับรังสีมีค่าเท่ากับ 1 ความดันบรรยากาศ ในทางกลับกันน้ำไม่สามารถไหลจากตัวรับรังสีสู่ถังเก็บน้ำด้านบนได้เพราะว่าแรงดันภายในตัวรับรังสีน้อยกว่าแรงดันตกคร่อมที่วาล์วและน้ำสามารถไหลจากตัวรับรังสีสู่ถังเก็บน้ำร้อนได้ง่ายกว่าไหลผ่านวาล์ว

#### 3.2 การทดลอง

หลักการทำงานของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (SWHS) ประกอบด้วย การให้ความร้อน (heating) การขับเคลื่อนน้ำ (pumping) การระบายไอ (vapor expansion) การเติมน้ำ (suction)

ช่วงการให้ความร้อน (Heating Stage) วาล์วควบคุม (CV) ปิดโดยอัตโนมัติในช่วงแรงดันตกคร่อมที่วาล์วสูงมาก จะปิดกันไม่ให้ให้น้ำภายในตัวรับรังสีออกสู่ถังเติมน้ำ ด้านบนได้เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันตกคร่อมต่ำในทางออกที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ

ช่วงการขับดันน้ำ (Pumping Stage) เมื่อแรงดันไอน้ำภายในตัวรับรังสีมีค่าสูงกว่าความสูงในการจ่ายน้ำของระบบเพียงเล็กน้อย น้ำร้อนภายในตัวรับรังสีจะถูกขับดันผ่านทางท่อต่อสามทางโดยแรงดันและไหลสู่ถังเก็บน้ำร้อนด้วยค่าแรงโน้มถ่วง

ช่วงการระบายไอ (Vapor Expansion Stage) เมื่อระดับน้ำภายในตัวรับรังสีไหลออกจนต่ำกว่าท่อทางออกไอน้ำภายในตัวรับรังสีสามารถไหลออกผ่านท่อสามทางและเปิดสู่บรรยากาศ สู่เพื่อเป็นการระบายไอน้ำให้แรงดันภายในตัวเก็บรังสี มีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศ โดยไอน้ำที่ระบายจะถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อน

ช่วงการเติมน้ำ (Suction Stage) เมื่อแรงดันไอน้ำภายในตัวรับรังสีถูกระบายสู่ถังเก็บน้ำร้อนออกมาเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงดันภายในตัวรับรังสีเท่าใกล้เคียงกับความดันอากาศแวดล้อม (Surrounding air pressure) ดังนั้นเฮดความสูงของน้ำ (water head) ที่ถังเก็บน้ำด้านบนมีค่ามากกว่าเฮดการสูญเสีย (head loss) ที่วาล์วควบคุม ดังนั้นวาล์วควบคุมจะเปิดโดยอัตโนมัติ น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำจากถังเก็บน้ำด้านล่างไหลลงสู่ตัวรับรังสีด้วยค่าแรงโน้มถ่วงและจะเกิดการดูดน้ำจากถังเก็บน้ำด้านล่าง น้ำจะหยุดไหลก็ต่อเมื่อแรงดันภายในตัวรับรังสีเพิ่มสูงพออีกครั้งเป็นการดำเนินการไหล จะครบ 1 รอบการทำงาน ระบบพร้อมที่จะทำงานในรอบต่อไปได้

วิธีการทดลอง ควบคุมการจ่ายน้ำเข้าแผงรับรังสี 3.1 L ตั้งค่าระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m เริ่มทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 8:00–17:00น. โดยบันทึกอุณหภูมิ ความดัน และค่ารังสีดวงอาทิตย์ วัดปริมาณน้ำสุดท้ายที่ผลิตได้ทุกวัน

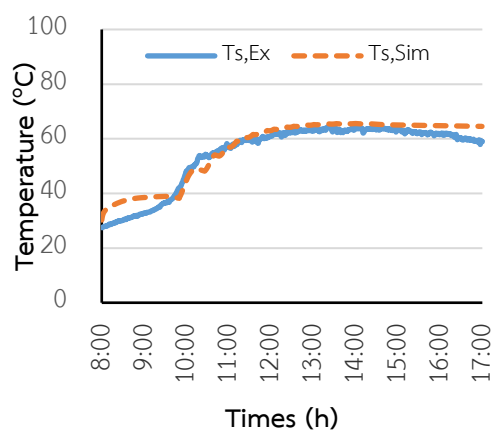
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C กำหนดค่ารังสีอาทิตย์ 20 MJ/m<sup>2</sup> d และกำหนด

ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5, 1, 2 และ 3 m ระยะเวลาในการทำงานของระบบตั้งแต่วันที่ 8:00–17:00น.

#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์

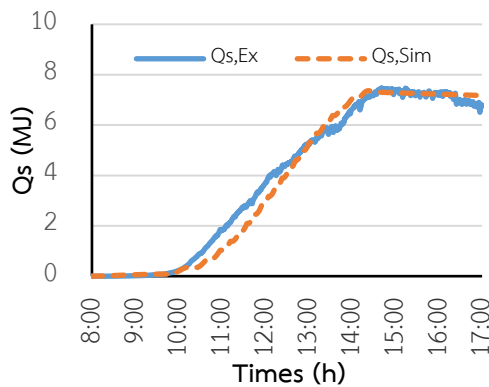
##### 4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนและความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน ระหว่างการทดลองที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวัน 17.22 MJ/m<sup>2</sup> d (จากเครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์) ระดับความสูงในการส่งน้ำ 1 m เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อน จากรูปที่ 3 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน มีค่า *RMSE* เท่ากับ 2.6222  $\left(\frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100\right)$  มีความคลาดเคลื่อน 4.7937% ลักษณะอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 30°C เมื่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ลดลงจนระบบไม่สามารถขับดันน้ำไปเก็บที่ถังเก็บน้ำร้อนได้ อุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนก็จะคงที่ และหลังจากนั้นจะลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของถังเก็บน้ำร้อน

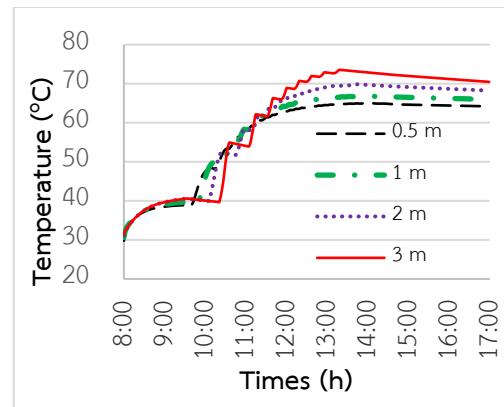


รูปที่ 4 ผลของความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน ระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 4 ความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน เริ่มต้นที่ 0 MJ เนื่องจาก ความร้อนสะสมคำนวณได้จาก สมการที่ 1 ดังนั้นเมื่อระบบเริ่มทำงานปริมาตรน้ำในถัง เก็บน้ำร้อนจึงยังไม่มี ปริมาณความร้อนสะสมจะเริ่มขึ้นก็ ต่อเมื่อมีการขับดันน้ำจากแผงรับรังสี และสามารถ เอาชนะความสูงในการส่งน้ำได้ ดังสมการที่ 15 เมื่อระบบ หยุดทำงานปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำร้อนก็จะคงที่ ส่งผลให้ ปริมาณความร้อนสะสมมีแนวโน้มคงที่ตามไปด้วย และ เนื่องจากอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนสูงกว่า อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม จึงเกิดการถ่ายโอนความร้อน ทำให้ปริมาณ ความร้อนสะสมลดลงไม่มาก เนื่องจากถังเก็บน้ำร้อนได้ถูก หุ้มฉนวนกันความร้อนโดยรอบ มีค่า  $RMSE$  เท่ากับ 0.3082 มีความคลาดเคลื่อน  $\left(\frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100\right)$  7.8070%

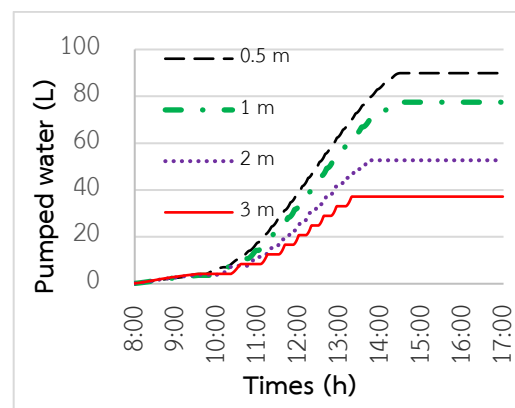
#### 4.2 ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ระดับ ความสูง 0.5, 1, 2 และ 3 m

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เปรียบเทียบระดับ ความสูงในการส่งน้ำ 0.5, 1, 2 และ 3 m โดยใช้ค่ารังสี อาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีสูงสุด  $20 \text{ MJ/m}^2 \text{ d}$  ประกอบการ คำนวณ (แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ฉบับใหม่ สำหรับประเทศไทย ปี 2560 กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน)



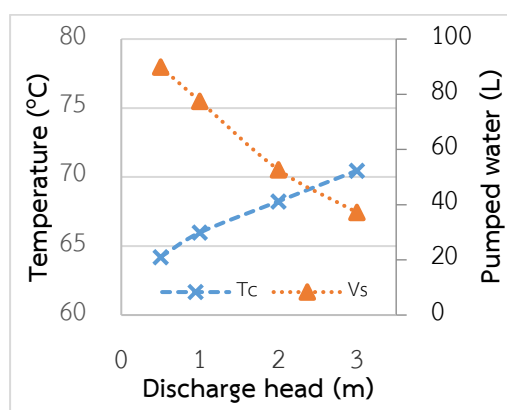
รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนที่ระดับความ สูงในการส่งน้ำต่างๆ

การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละ ระดับความสูง จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระดับ ความสูงในการส่งน้ำ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำ ร้อนเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ น้ำในแผงรับรังสีอาทิตย์ไหลออกได้ยากขึ้น ดังสมการที่ 4 เป็นการสูญเสียความดันจากความสูง ดังนั้นความดัน ภายในแผงจึงต้องมีค่ามากขึ้นตาม เพื่อที่จะสามารถขับดัน น้ำภายในแผงให้พ้นระดับความสูงที่ตั้งไว้ เมื่อน้ำอยู่ในแผง รับรังสีอาทิตย์เป็นเวลานาน จึงได้รับพลังงานจาก แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น น้ำจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับดัง สมการที่ 9



รูปที่ 6 ผลของปริมาณน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนที่ ระดับความสูงในการส่งน้ำต่างๆ

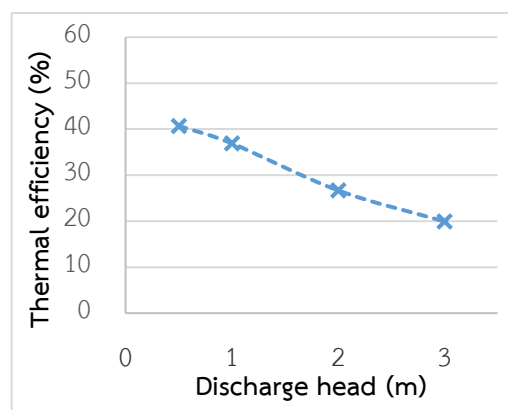
ระดับความสูงในการส่งน้ำต่ำจะทำให้ น้ำในแผงรับรังสีสามารถไหลออกจากแผงได้ง่าย จึงทำให้ระบบสามารถขับเคลื่อนน้ำร้อนได้เร็วขึ้น และได้ปริมาณน้ำร้อนมากขึ้น ดังรูปที่ 6 กล่าวคือระดับความสูงยิ่งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ก็จะลดลง เป็นตัวแปรที่ส่งผลในทิศทางตรงกันข้ามกัน เมื่อระดับค่ารังสีอาทิตย์ลดลงในช่วงบ่าย จนระบบไม่สามารถสร้างแรงดันภายในแผงรับรังสีอาทิตย์ ให้เอาชนะระดับความสูงในการส่งน้ำได้ น้ำในแผงจึงไม่สามารถไหลออกไปเก็บที่ถังเก็บน้ำร้อนได้ ปริมาตรของน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนจึงคงที่ โดยแต่ระดับความสูงในการส่งน้ำ ปริมาตรของน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนจะคงที่ในเวลาที่ไม่เท่ากันดังสมการที่ 15 โดยที่ระดับความสูงในการส่งน้ำมาก ระบบจะหยุดขับเคลื่อนน้ำก่อน ที่ระดับความเข้มรังสีอาทิตย์เดียวกัน



รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำต่างๆ

ระดับความสูงในการส่งน้ำส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อน ดังรูปที่ 7 เมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิสูงขึ้นตาม แต่ปริมาณน้ำร้อนลดลง ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถที่จะเลือกผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ระดับความสูงในการส่งน้ำ 3 m ได้ตามความต้องการในการใช้น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูง หรือความต้องการน้ำร้อนในปริมาณที่มากกว่าที่อุณหภูมิสูงไม่มากตั้งแต่ 60-65 °C จะได้ปริมาณน้ำร้อน 75-90 L/day

จากแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนอยู่ในช่วง 60-70 °C และปริมาณน้ำร้อนอยู่ในช่วง 35-90 L/d ที่ระดับความสูง 0.5, 1, 2 และ 3 m อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10 °C แต่ปริมาณน้ำร้อนมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 55 L/d แสดงให้เห็นว่าระดับความสูงส่งผลกับปริมาณน้ำร้อน เป็นปัจจัยหลักเมื่อความสูงลดลงปริมาณน้ำร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ระดับความสูงต่ำ ความดันภายในระบบที่ต่ำสามารถชนะระดับความสูงในการส่งน้ำ และขับเคลื่อนน้ำออกจากแผงได้ ดังสมการที่ 4 เมื่อระดับความสูงลดลง ความดันที่ใช้ขับเคลื่อนน้ำก็ลดลงตามความสูง



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพทางความร้อน ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำต่างๆ

เมื่อระดับความสูงในการส่งน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง ถึงแม้ว่าอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อนลดลงตามปริมาณน้ำร้อน ดังนั้นประสิทธิภาพทางความร้อนจึงลดลง ดังสมการที่ 1 และ 3 เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 8 โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อปริมาณความร้อนสะสมภายในถังเก็บน้ำร้อน คือปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ และอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อน ค่ารังสีสูงสุดอยู่ในช่วงเดือนเมษายน จะทำให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้นตาม

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนภายในถังเก็บน้ำร้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความคลาดเคลื่อน  $\left(\frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100\right)$  ไม่เกิน 10% ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง ผลการศึกษาจากระดับความสูงในการส่งน้ำ ระบบผลิตน้ำร้อนได้สูงสุด 89.9 L/d ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 40.71% ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m และผลิตน้ำร้อนได้ต่ำสุด 37.2 L/d ประสิทธิภาพความร้อนต่ำสุด 19.93% ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 3 m อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดที่นำไปใช้งาน 70.46 °C ที่ระดับความสูงในการส่งน้ำ 3 m และต่ำสุดที่ 64.2 °C ระดับความสูงในการส่งน้ำ 0.5 m

ผลจากระดับความสูงส่งผลต่อความดันที่ใช้การขับเคลื่อนน้ำร้อนออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์ ที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้น ระบบต้องสร้างความดันเพิ่มขึ้นเพื่อเอาชนะระดับความสูงในการส่งน้ำ และเมื่อความดันภายในแผงรับรังสีอาทิตย์สูงขึ้น อุณหภูมิภายในแผงก็สูงขึ้นตาม ส่งผลให้ใช้เวลาขับเคลื่อนน้ำร้อนภายในแผงรับรังสีอาทิตย์ ไปกักเก็บที่ถังเก็บน้ำร้อนนานขึ้น และน้ำร้อนที่ได้ก็มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามอุณหภูมิภายในแผง

เมื่อระดับสูงในการส่งน้ำเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของน้ำร้อนก็เพิ่มขึ้นตาม และเมื่อระดับสูงในการส่งน้ำลดลง ปริมาณน้ำร้อนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิและปริมาณของน้ำร้อนจะแปรผกผันกัน โดยมีระดับความสูงในการส่งน้ำเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณของน้ำร้อน ดังนั้นการเลือกระดับความสูงในการส่งน้ำที่เหมาะสม จึงต้องพิจารณาอุณหภูมิและปริมาณของน้ำร้อนที่ต้องการ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] DW. Lee, A. Sharma, “Thermal performances of the active and passive water heating systems based on annual operation,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 2, pp. 207-215, Feb. 2007.
- [2] SV. Joshi, RS. Bokil, JK. Nayak, “Test standards for thermosyphon-type solar domestic hot water system: review and experimental evaluation”, *Sol. Energy*, vol. 78, no. 6, pp. 781-798, Jun. 2005.
- [3] JA. Duffie, and WA. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 4<sup>th</sup> ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2013.
- [4] AN. Khalifa, “Forced versus natural circulation solar water heaters: A comparative performance study,” *Renewable Energy*, vol. 14, no. 1-4, pp. 77-82, May-Aug. 1998.
- [5] K. Sumathy, “Experimental studies on a solar thermal water pump,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 19, no. 5, pp. 449-459, May 1999.
- [6] DJ. Picken, KDR. Seare, F. Goto, “Design and development of a water piston solar powered steam pump,” *Sol. Energy*, vol. 61, no. 3, pp. 219-227, Sep. 1997.
- [7] S. Liengjindathaworn, K. Kirtikara, P. Namprakai, T. Kiatsiriroat, “Parametric studies of a pulsating-steam water pump,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 23, no. 1, pp. 37-46, Jan. 2002.
- [8] N. Roonprasang, P. Namprakai, N. Pratinthong, “Experimental studies of a new solar water heater system using a solar water pump,” *Int. J. Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 639-646, Apr. 2008.

- [9] K. Sutthivirode, P. Namprakai, N. Roonprasang, "A new version of a solar water heating system coupled with a solar water pump," *Appl. Energy*, vol. 86, no 9, pp. 1423-1430, Sep. 2009.
- [10] J. Sitranon, C. Lertsatitthanakorn, P. Namprakai, N. Namprakai, T. Suparos, N. Roonprasang, "Performance Enhancement of Solar Water Heater with a Thermal Water Pump," *J. Energy Eng. (ASCE)*, vol. 141, no.4, pp. 04014036-1 - 04014036-10, Sep. 2014.

## การลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายที่มีขนาดละเอียดด้วยเบนโทไนท์ Hydraulic conductivity reduction of poorly graded sand by bentonite

สหัสชัย ปรีวัตรพันธ์<sup>1\*</sup> สมชาย ดอนเจดีย์<sup>2\*</sup> และ นิมิตร เชิดฉันทพิพัฒน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นิสิตปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการชลประทาน, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการชลประทาน, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม 73140

Sahatchai Parivatphun<sup>1</sup> Somchai Donjadee<sup>2\*</sup> and Nimit Cherdchanpipat<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Irrigation Technology Research Laboratory, Department of Irrigation, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand

<sup>2</sup>Assistant Professor, Irrigation Technology Research Laboratory, Department of Irrigation, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, Thailand

\*Corresponding author: Email: pung4207@gmail.com

(Received: September 28, 2018; Accepted: April 21, 2020)

### บทคัดย่อ

การศึกษาค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายโดยการผสมด้วยเบนโทไนท์ ได้ดำเนินการโดยใช้ดินทรายที่พบในกลุ่มน้ำลำภาชีซึ่งมีปัญหาการรั่วซึมสูง โดยนำดินทรายตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ จากการทดสอบพบว่าดินทรายตัวอย่างมีค่าความนำชลศาสตร์เท่ากับ 119.2 mm/day ที่ความหนาแน่น 1.69 g/cm<sup>3</sup> และมีค่าความนำชลศาสตร์เท่ากับ 23.16 mm/day ที่ความหนาแน่น 2.25 g/cm<sup>3</sup> จากการศึกษาพบว่าค่าความนำชลศาสตร์มีค่าลดลงเมื่อ อัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ หรือ ความหนาแน่นของดิน หรือ ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยเมื่อนำเบนโทไนท์มาผสมดินทรายตัวอย่างและทำการบ่มไว้ 1 วัน พบว่าค่าความนำชลศาสตร์มีค่า 0.81, 0.42, 0.18 mm/day ที่ความหนาแน่น 2.01-2.08 g/cm<sup>3</sup> ด้วยอัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ การศึกษาวิจัยครั้งนี้ยังพบว่าดินทรายผสมเบนโทไนท์ที่ทำการทดสอบทุกกรณีมีค่าความนำชลศาสตร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการนำไปใช้คาดสระเก็บน้ำ ยกเว้นดินที่มีอัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ร้อยละ 5 และ 7 โดยน้ำหนักซึ่งไม่ได้ทำการบ่มและไม่ได้ทำการบดอัดก่อนการนำไปใช้งาน งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอสมการสำหรับใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจใช้เบนโทไนท์เป็นส่วนผสมในดินทรายสำหรับกรณีอื่น

**คำสำคัญ:** ความนำชลศาสตร์, เบนโทไนท์, ดินทรายที่มีขนาดละเอียด, การรั่วซึม

### ABSTRACT

The main focus of this research is a study of the hydraulic conductivity of poorly graded sand by mixing with bentonite. The poorly graded sand found in the Pachi Basin are characterized by a high degree of leakage. The laboratory tests of the poorly graded sand samples resulted in

a hydraulic conductivity of 119.2 mm/day and 23.16 mm/day at the bulk density of 1.69 g/cm<sup>3</sup> and 2.25 g/cm<sup>3</sup>, respectively. The results also show that as bentonite ratios, bulk density, and curing period increase, the hydraulic conductivity is decreased. When bentonite was mixed with poorly graded sand and cured for 1 day, the hydraulic conductivity was 0.81, 0.42, 0.18 mm/day at bulk density 2.01-2.08 g/cm<sup>3</sup> with bentonite content of 5%, 7%, and 9%, respectively. The study also found that all tested samples of bentonite poorly graded sand have acceptable hydraulic conductivity to be used in ponds. Except for soil with 5% and 7% bentonite content by weight, this is not cured and not compacted before use. This research also presents the equation for design of the bentonite ratio as an ingredient in sandy soils for another case.

**Keyword:** Hydraulic conductivity, Bentonite, Poorly graded sand, Seepage.

## 1. บทนำ

ประเทศไทยถือว่าเป็นหนึ่งในประเทศเกษตรกรรมที่มีพื้นที่ถือครองทางการเกษตรคิดเป็นร้อยละ 46.53 ของพื้นที่ทั้งหมด แต่กลับมีพื้นที่การเกษตรที่อยู่ในเขตชลประทานเพียง 23.8 ล้านไร่ [1] คิดเป็นร้อยละ 21.7 ของพื้นที่การเกษตร ดังนั้นการทำการเกษตรกรรมในพื้นที่นอกเขตชลประทานจึงต้องอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก จากการวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนในประเทศไทยพบว่า ค่าเฉลี่ยรายปีของปริมาณฝนมีแนวโน้มลดลงประมาณ 129 มิลลิเมตร [2] จากข้อมูลดังกล่าวกระทรวงเกษตรและสหกรณ์จึงได้มอบหมายให้กรมพัฒนาที่ดินดำเนินการจัดหาแหล่งน้ำ เพื่อสนับสนุนการทำการเกษตรนอกเขตชลประทาน [3] ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 โดยส่งเสริมให้มีการขุดสระน้ำขนาด 1,260 m<sup>3</sup> เพื่อบรรเทาสภาพปัญหาภัยแล้ง การขาดแคลนน้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกักน้ำในพื้นที่ของการเกษตร ซึ่งเกษตรกรเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายเพียง 2,500 บาท จำนวน 47,500 สระ ซึ่งโครงการข้างต้นได้รับความสนใจจากเกษตรกรเป็นอย่างมาก สระเก็บน้ำในโครงการดังกล่าวมีกระจายอยู่ทั่วประเทศ ซึ่งบางพื้นที่ไม่เหมาะสมที่จะทำการขุดสระเก็บน้ำเนื่องจากสภาพดินไม่เหมาะสม จากรายงานของสำนักเศรษฐกิจการเกษตร พบว่ามีสระเก็บน้ำนอกเขตชลประทานร้อยละ

18 ไม่สามารถขังน้ำไว้ใช้ได้ตามที่ออกแบบไว้เนื่องจากมีการรั่วซึมสูงมากสาเหตุจากสภาพดินที่ไม่เหมาะสมดังเช่นในพื้นที่ลุ่มน้ำลำภาชี แนวทางการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพทางหนึ่งคือการปรับปรุงดินบริเวณพื้นผิวสระให้มีค่าความชื้นได้ลดลงจนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

การลดอัตราการรั่วซึมของดินสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้วัสดุป้องกัน การปูด้วยแผ่นพลาสติก การดาดด้วยคอนกรีต การดาดด้วยดินซีเมนต์ [4] การดาดด้วยดินโคลน [5] การดาดด้วยผ้าใบคอนกรีต [6] การใช้ยางธรรมชาติ [7] และการปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติในการเพิ่มประสิทธิภาพการลดอัตราการรั่วซึมของน้ำ ได้แก่ การบดอัดดิน [5,8] การผสมวัสดุบางชนิดเข้าไปในดิน เช่น ปุ๋ยคอก [9] แคลเซียมคาร์บอเนต [10] ผงซีเมนต์ [4,11] เบนโทไนท์ [12,13] เป็นต้น อย่างไรก็ตามวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป เบนโทไนท์นับว่าเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความนิยม เนื่องจากเบนโทไนท์เป็นดินที่เกิดจากเถ้าภูเขาไฟที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติเป็นระยะเวลานาน จนเกิดเป็นดินที่มีคุณสมบัติพองตัวสูง ซึ่งมีองค์ประกอบของมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวหลัก รองลงมาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ [14,15] ทำให้มีค่าความนำไฮดรอลิก (Hydraulic conductivity) น้อยมาก โดย Ahn และ Jo [16] ได้

ทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ของโซเดียมเบนโทไนท์ และแคลเซียมเบนโทไนท์จากจังหวัด Gyeongsang ประเทศเกาหลีใต้ พบว่ามีค่า  $3.3 \times 10^{-11}$  และ  $6.2 \times 10^{-11}$  m/s ตามลำดับ ในขณะที่ Komine [17] (อ้างอิงจาก Ahn and Jo [16]) พบว่าค่าความนำชลศาสตร์ของ แคลเซียมเบนโทไนท์จากแหล่งอื่นมีค่า  $6.0 \times 10^{-11}$  m/s Xu et al. [18] พบว่าเบนโทไนท์จากจังหวัด Hebei ประเทศจีนมีค่าความนำชลศาสตร์  $6.3 \times 10^{-12}$  m/s ดังนั้น การลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินโดยการผสมเบนโทไนท์ในปริมาณที่เหมาะสมเป็นวิธีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการรั่วซึมได้เป็นอย่างดี เช่น Gleason et al. [12] ได้ศึกษาการใช้ทรายผสมเบนโทไนท์เพื่อลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายโดยใช้เบนโทไนท์ 5% โดยน้ำหนัก ผสมกับทรายแล้วทำการบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor (ASTM D698) ทำให้ความนำชลศาสตร์มีค่าน้อยกว่า  $1 \times 10^{-9}$  m/s ในขณะที่ โกวิท [19] ได้ทำการทดลองโดยใช้เบนโทไนท์ที่อัตราส่วน 5, 10, 15% โดยน้ำหนัก ผสมกับทรายภายใต้แรงกดทับ 150 kPa พบว่ามีค่าความนำชลศาสตร์ เท่ากับ  $3 \times 10^{-8}$ ,  $2 \times 10^{-10}$ ,  $5 \times 10^{-12}$  m/s ตามลำดับ Malusis et al. [13] ได้ทำการหาความนำชลศาสตร์ของทรายผสมโซเดียมเบนโทไนท์ โดยมีส่วนผสมของเบนโทไนท์ 5.8% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำชลศาสตร์มีค่าโดยเฉลี่ย  $1 \times 10^{-6}$  ถึง  $2.8 \times 10^{-10}$  m/s ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับความพรุน, น้ำหนักจำเพาะและการทรุดตัวของดิน Guler et al. [20] ได้นำเบนโทไนท์ผสมดินประเภทก้อนกลมที่มีขนาดเฉลี่ย 1 mm โดยใช้ส่วนผสมของเบนโทไนท์ 8, 10, 12 และ 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ค่าความนำชลศาสตร์มีค่า  $1 \times 10^{-7}$ ,  $8 \times 10^{-8}$ ,  $4 \times 10^{-8}$  และ  $7 \times 10^{-9}$  m/s ตามลำดับ ดังจะเห็นได้ว่าเบนโทไนท์มีประสิทธิภาพในการลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินที่นำมาผสม อย่างไรก็ตามผลการศึกษามีความแตกต่างกันเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อค่าความนำชลศาสตร์ ได้แก่ ชนิดดินและคุณสมบัติของดิน อุณหภูมิ [21] ชนิดคุณสมบัติของเบนโท

ไนท์ [18] ปริมาณส่วนผสมของเบนโทไนท์ในดิน [16] ความเป็นกรดต่าง [22] การบดอัด [23] เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความสามารถในการลดอัตราส่วนการรั่วซึมของเบนโทไนท์ที่นำมาผสมกับดินทราย โดยพิจารณาค่าความนำชลศาสตร์กับอัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์ การทดลองในครั้งนี้จะใช้โซเดียมเบนโทไนท์ซึ่งมีขายตามท้องตลาดทั่วไปผสมกับดินทรายที่พบในพื้นที่ลุ่มน้ำลุ่มน้ำภาคใต้ซึ่งมีปัญหาการรั่วซึมสูง นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้วิธีความดันคงที่ และยังได้นำเสนอสมการที่เหมาะสมกับดินทรายผสมเบนโทไนท์ที่อัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์ต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลของนักวิจัยท่านอื่นมาพิจารณาด้วย เพื่อนำค่าที่ได้ไปเป็นเกณฑ์ตัดสินใจในการเลือกใช้อัตราส่วนผสมเบนโทไนท์สำหรับใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึม ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานกับสระเก็บน้ำในไร่นาต่อไป

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

ดินที่นำมาใช้ทดสอบในการทดลองครั้งนี้จะใช้ดินทราย เมื่อทำการจำแนกดินตามระบบ unified พบว่าดินทรายที่นำมาทดลองนั้นเป็นดินเนื้อหยาบที่อยู่ในกลุ่มของดิน SP (Poorly graded sand) ซึ่งดินที่นำมาทดลองนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับดินทรายที่พบในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคใต้ ซึ่งเป็นดินที่มีค่าความนำชลศาสตร์สูง เมื่อขุดสระเก็บน้ำในพื้นที่ดังกล่าวก็มักมีการรั่วซึมจนบางครั้งไม่สามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ จากการเก็บตัวอย่างดินทรายในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคใต้ ซึ่งการเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บแบบตัวอย่างเปลี่ยนสภาพ (disturbed sample) แล้วจึงนำมาจำแนกประเภทของดิน (Soil classification) โดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) และวิธีไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer analysis) พบว่าดินทรายตัวอย่างเป็นดินทรายที่มีขนาดละเอียด (Poorly graded soil) มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (Uniform graded) โดยมีค่า Coefficient of Uniformity (Cu) เท่ากับ 2.75 มีค่า Coefficient of Curvature (Cc) เท่ากับ 0.59 เมื่อทำการการจำแนกดินด้วยระบบ Unified Soil

Classification System (USCS) พบว่าเป็นดินเม็ดหยาบในกลุ่ม SP (Poorly graded sand) สำหรับเบนโทไนท์ที่ใช้เป็นโซเดียมเบนโทไนท์ธรรมชาติชนิดผงซึ่งมีขายทั่วไปตามท้องตลาด ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมมีค่าความชื้นร้อยละ 10 และมีคุณสมบัติพื้นฐานอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของโซเดียมเบนโทไนท์

| Measurement             | Sodium Bentonite |
|-------------------------|------------------|
| Methylene blue (g/100g) | 32               |
| Colloid value (mL/15g)  | 100              |
| Swollen value (mL/g)    | 20               |
| pH                      | 8.0-9.5          |
| Residue (<0.075 mm)     | 5%               |

ที่มา : บริษัทเทพเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด. [24]

## 2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ในการศึกษานี้ได้จำลองสถานการณ์ของการนำดินทรายผสมเบนโทไนท์ไปใช้ในสภาวะต่าง ๆ โดยแบ่งกรณีศึกษาและออกแบบการทดลองดังนี้

1) กรณีที่ 1 (T1): กรณีที่ใช้ดินทรายอย่างเดียวไม่ทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำโดยไม่ทำการบดอัด โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำดินทรายตัวอย่างบรรจุเข้าไปใน Mold สแตนเลส

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 cm. (6 in.) สูง 17.78 cm. (7 in.) ทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่างและนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความนำคลศาสตร์ทันทีด้วยวิธีความดันคงที่ (Constant Head) โดยใช้ความดันที่ 250 kPa

2) กรณีที่ 2 (T2): กรณีที่ใช้ดินทรายและทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำและทำการบดอัด โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำดินทรายตัวอย่างบรรจุเข้าไปใน Mold ทำการบดอัดด้วย

วิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 Standard Proctor Test ซึ่งเป็นการบดอัดดินในกระบอกบดอัดมาตรฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.24 cm. (6 in.) โดยทำการแบ่งการบดอัดดินออกเป็น 3 ชั้น ในแต่ละชั้นจะทำการบดอัดจำนวน 56 ครั้ง ด้วยค้อนมาตรฐานที่มีตัมน้ำหนักขนาด 2.5 kg. (5.5 lb.) และมีระยะตกกระทบ 30 cm. (12 in.) จากนั้นทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่าง และนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความนำคลศาสตร์ทันที ด้วยวิธีความดันคงที่ โดยใช้ความดันที่ 250 kPa

3) กรณีที่ 3 (T3): กรณีที่ใช้ดินทรายผสมเบนโทไนท์ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยไม่ทำการบ่ม และไม่ทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำโดยใช้ทรายผสมเบนโทไนท์ โดยทำการคาดพื้นผิวสระเก็บน้ำทันทีที่ผสมเสร็จและไม่ทำการบดอัด โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำทรายตัวอย่างผสมเบนโทไนท์ด้วยอัตราส่วนของเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ บรรจุเข้าไปใน Mold ทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่างและนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความนำคลศาสตร์ทันทีด้วยวิธีความดันคงที่ โดยใช้ความดันที่ 500 kPa

4) กรณีที่ 4 (T4): กรณีที่ใช้ดินทรายผสมเบนโทไนท์ในอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วทำการบ่มแต่ไม่ทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำโดยใช้ทรายผสมเบนโทไนท์โดยทำการบ่มเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นค่อยนำไปคาดพื้นผิวสระเก็บน้ำโดยไม่ทำการบดอัด โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำทรายตัวอย่างผสมเบนโทไนท์ด้วยอัตราส่วนของเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ บรรจุเข้าไปใน Mold ทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่างและทำการบ่มตัวอย่างด้วยการจัดเก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เบนโทไนท์ดูดซับความชื้นและเป็นการปรับสภาพให้ตัวอย่างมีความชื้นที่สม่ำเสมอ จากนั้นนำตัวอย่างไปบรรจุลง Mold โดยไม่ทำการบดอัด หาความหนาแน่น

ของตัวอย่างและทำการทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ ด้วยวิธีความดันคงที่โดยใช้ความดันที่ 500 kPa

5) กรณีที่ 5 (T5): กรณีที่ใช้ดินทรายผสมเบนโทไนท์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยทำการบ่มและทำการบดอัด ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรขุดสระเก็บน้ำโดยใช้ทรายผสมเบนโทไนท์ ทำการบ่มเป็นเวลา 1 วัน หลังจากบ่มเสร็จ จากนั้นนำไปตัดพื้นผิวสระเก็บน้ำ โดยวิธีการบดอัด มีวิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำทรายตัวอย่างผสมเบนโทไนท์ด้วยอัตราส่วนของเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ทำการบ่มตัวอย่างด้วยการจัดเก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบรรจุลง Mold หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างและบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 Standard Proctor Test หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง และนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ โดยวัดค่าความนำชลศาสตร์ที่ 1 วันและ 7 วัน ด้วยวิธีความดันคงที่โดยใช้ความดันที่ 500 kPa

สยามและคณะ[34] ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดผลแตกต่างกัน พบว่าค่าความหนาแน่นของดินเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความนำชลศาสตร์ของดิน ดังนั้นการทดลองในครั้งนี้จึงควบคุมค่าความหนาแน่นของตัวอย่างการทดลองที่มีสภาวะการทดลองเหมือนกันให้มีค่าความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 โดยตัวอย่างให้ที่ไม่มี การบดอัดดินจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.68 – 1.72 g/cm<sup>3</sup> ส่วนตัวอย่างที่มีการบดอัดดินจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2.21 – 2.27 g/cm<sup>3</sup>

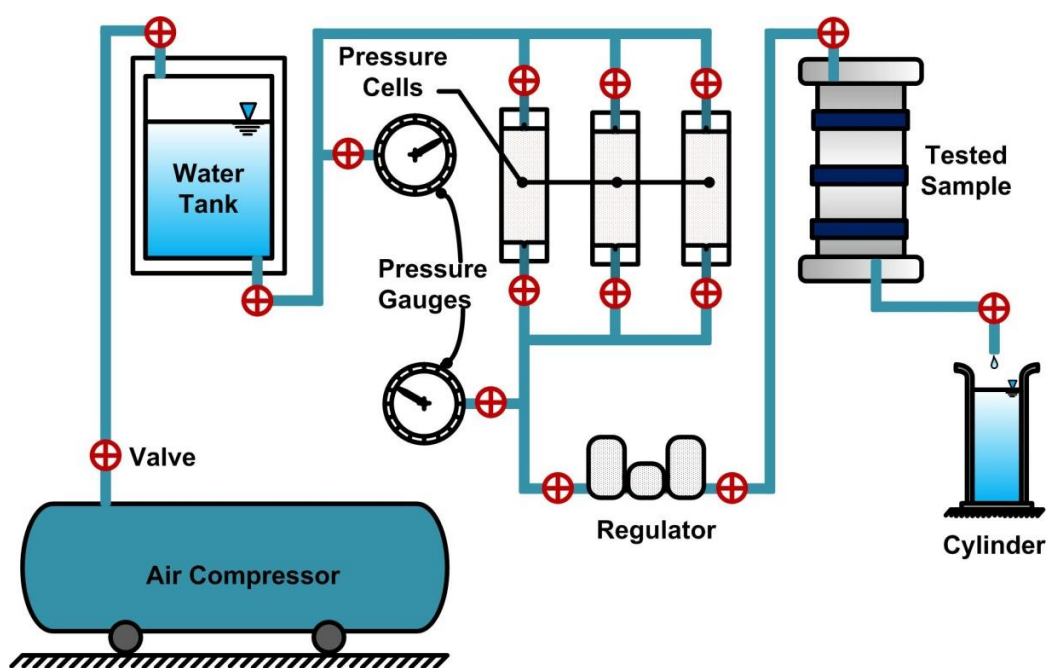
## 2.2 การทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์

การทดสอบด้วยการวัดค่าความนำชลศาสตร์ จะทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 2434 สำหรับการทดลองในครั้งนี้จะทำการทดลองแบบความดันคงที่ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่าความนำชลศาสตร์ (ภาพที่ 1) ประกอบไปด้วย ปัมลม (Air compressor) จะทำหน้าที่ในการเพิ่มแรงดัน, วาล์วควบคุมแรงดัน, ถังควบคุมแรงดันน้ำ (Water tank) จะทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันน้ำในการทดสอบ, เกจวัดความดัน (Pressure gauge), เครื่อง de-aired water จะทำหน้าที่ในการแยกฟองอากาศออกจากน้ำ, แบบหล่อสำหรับทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบบดอัด (Compacted Permeability Mold)

การหาค่าความนำชลศาสตร์สามารถหาได้จากสมการที่ 1 [25] โดยมีนักวิจัยหลายท่านได้ใช้วิธีนี้ในการหาค่าความนำชลศาสตร์ [26] สมการดังกล่าวนี้มีที่มาจากกฎของดาร์ซี (Darcy 's Law) ซึ่งดาร์ซีได้ศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหล (V) กับความแตกต่างของระดับน้ำ 2 จุด (Pressure) นั้นแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรง แต่ค่าความนำชลศาสตร์ (K) นั้นจะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นการทดลองในครั้งนี้จึงใช้ค่าความนำชลศาสตร์ในการเปรียบเทียบความสามารถในการลดอัตราการซึมของน้ำ แทนค่าความเร็วในการไหล (V)

$$K = \frac{Q \times L}{A \times h \times t} \quad (1)$$

เมื่อ K คือค่าความนำชลศาสตร์ (cm/s) Q คือปริมาณน้ำไหลผ่านตัวอย่างในช่วงเวลาการวัด (cm<sup>3</sup>) L คือ ความสูงของตัวอย่าง (cm) A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (cm<sup>2</sup>) h คือ ผลต่างของระดับน้ำ (cm) และ t คือ ช่วงเวลาในการวัด (s)



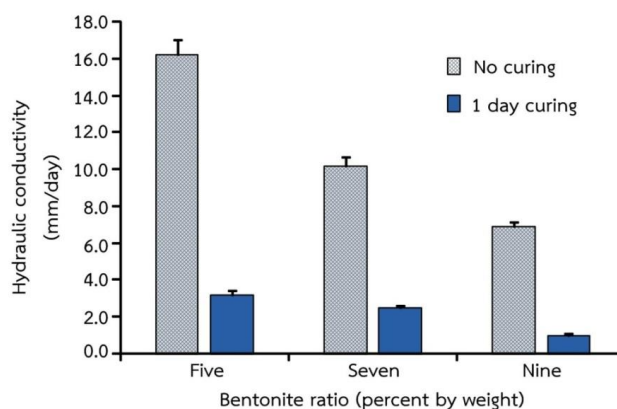
รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับทดสอบค่าความนำชลศาสตร์

### 3. ผลการทดลอง

การศึกษาค้นหาความสามารถในการลดการรั่วซึมของเบนโทไนท์สำหรับใช้นำมาผสมกับทรายได้ดำเนินการในห้องปฏิบัติการ พบว่าดินทรายที่นำมาทดลองในครั้งนี้มีขนาดละเอียด และจัดอยู่ในทรายประเภท SP (จำแนกโดยระบบ Unified) มีความถ่วงจำเพาะ 2.71 ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายที่พบในพื้นที่ลุ่มน้ำลำภาชี พบว่าดินทรายตัวอย่างกรณีไม่ทำการบดอัดมีค่าความนำชลศาสตร์ เท่ากับ  $119.2 \text{ mm/day}$  ( $1.38 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ) ที่ความหนาแน่น

$1.69 \text{ g/cm}^3$  และเมื่อทำการบดอัดพบว่าค่าความนำชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ  $23.16 \text{ mm/day}$  ( $2.68 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ) ที่ความหนาแน่น  $2.25 \text{ g/cm}^3$  โดยทำการบดอัดที่ความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบหาปริมาณอัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์เพื่อใช้ลดค่าความนำชลศาสตร์ของดินทราย โดยใช้เบนโทไนท์มาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนัก สำหรับการศึกษากรณีที่ T3 และ T4 โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2

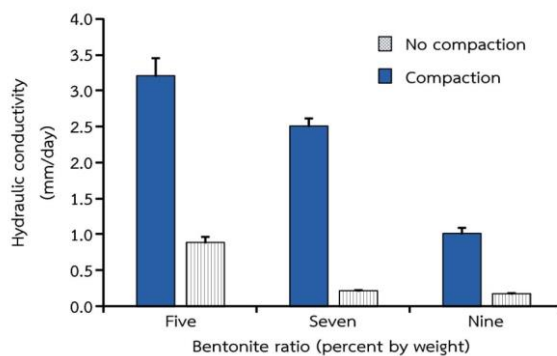


รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความนำชลศาสตร์ระหว่างกรณีที่ไม่มีการบ่มและกรณีที่มีการบ่มทรายผสมเบนโทไนท์

หมายเหตุ : แกนด้านบนของกราฟ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากรูปที่ 2 เมื่อนำเบนโทไนท์มาผสมดินทรายโดยไม่ทำการบดอัด กรณีที่ไม่ทำการบดตัวอย่างพบค่าความนำคลศาสตร์เท่ากับ 16.2, 10.2 และ 6.9 mm/day ในขณะที่เมื่อบดตัวอย่างทิ้งไว้ 1 วันจะทำให้ค่าความนำคลศาสตร์ลดลงเหลือ 3.2, 2.5 และ 1.0 mm/day สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเบนโทไนท์มีประสิทธิภาพสูงมากในการช่วยลดค่าความนำคลศาสตร์ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับดินทรายที่ไม่ผสมเบนโท

ไนท์พบว่าสามารถทำให้ค่าความนำคลศาสตร์ลดลงได้ 7.4, 11.7 และ 17.3 เท่า กรณีที่ไม่ทำการบดตัวอย่างและลดลงได้ 37.1, 47.5 และ 116.9 เท่า กรณีที่ทำการบดตัวอย่าง สำหรับเบนโทไนท์ที่ใช้ผสมทรายร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความนำคลศาสตร์ของดินทรายที่ผสมและไม่ผสมเบนโทไนท์กรณีทำการบด แสดงดัง รูปที่ 3

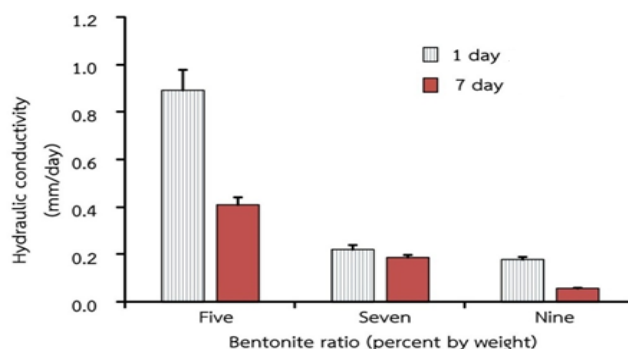


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าความนำคลศาสตร์เมื่อทำการบดอัดตัวอย่าง

หมายเหตุ : แกนด้านบนของกราฟ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จาก รูปที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบค่าความนำคลศาสตร์ของดินทรายผสมเบนโทไนท์กรณีทำการบดอัด เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ทำการบดอัด ซึ่งดินตัวอย่างจะถูกบดก่อนนำมาทำการทดลอง 1 วัน พบว่ากรณีทำการบดอัดจะทำให้ค่าความนำคลศาสตร์มีค่า 0.89, 0.22 และ 0.18 mm/day และสามารถลดค่าความนำคลศาสตร์ลงได้ 4.81, 5.98 และ 5.67 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่

ทำการบดอัด สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความนำคลศาสตร์ของดินทรายผสมเบนโทไนท์ที่ทำการบดอัดเมื่อเวลาผ่านไป โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง 1 วันกับ 7 วันผลการศึกษาดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความนำคลศาสตร์ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ : แกนด้านบนของกราฟ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

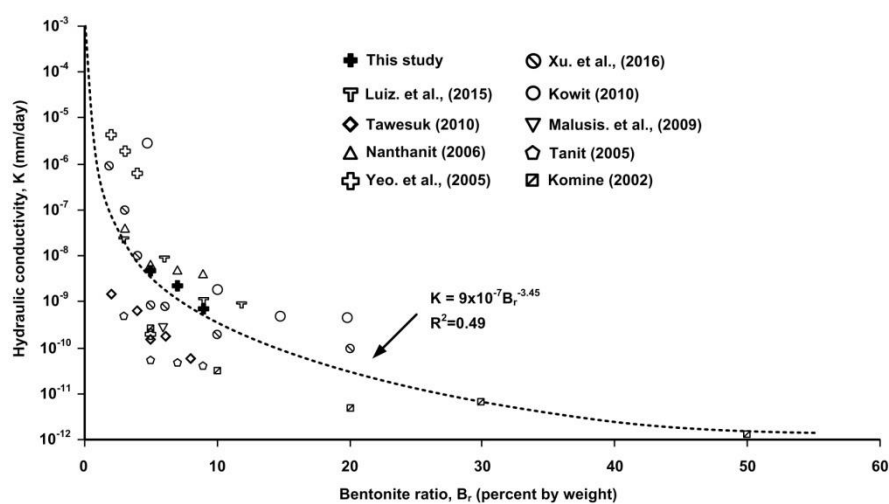
จาก รูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายผสมเบนโทไนท์เมื่อเวลาผ่านไป โดยทำการวัดที่ 1 วัน กับ 7 วัน จากการทดลองพบว่าค่าความนำชลศาสตร์ลดลงจาก 0.81 mm/day เมื่อวัดที่ 1 วัน เหลือ 0.4 mm/day เมื่อทำการวัดที่ 7 วัน สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและลดลงประมาณ 2.2 และ 3.0 เท่า สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ

### 3.1 ความสัมพันธ์ของค่าความนำชลศาสตร์กับอัตรา

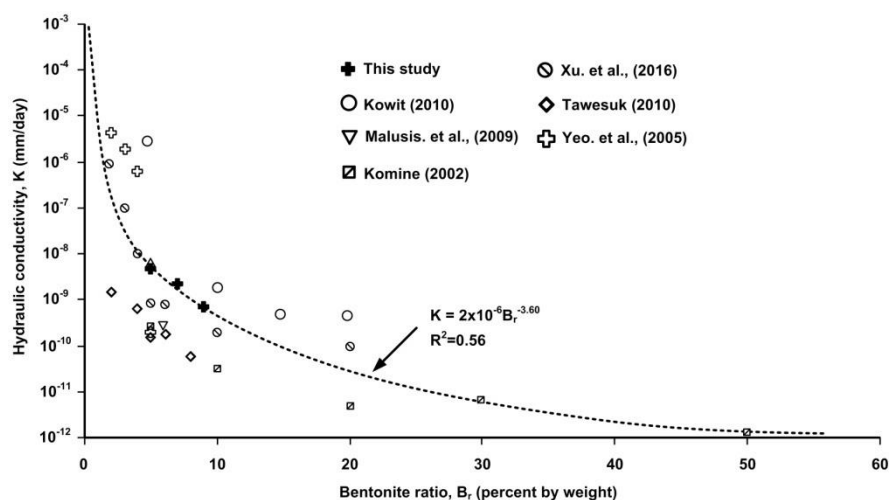
#### ส่วนผสมของเบนโทไนท์

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าเบนโทไนท์มีประสิทธิภาพสูงในการลดค่าความนำชลศาสตร์ซึ่งจะส่งผลให้ การรั่วซึม

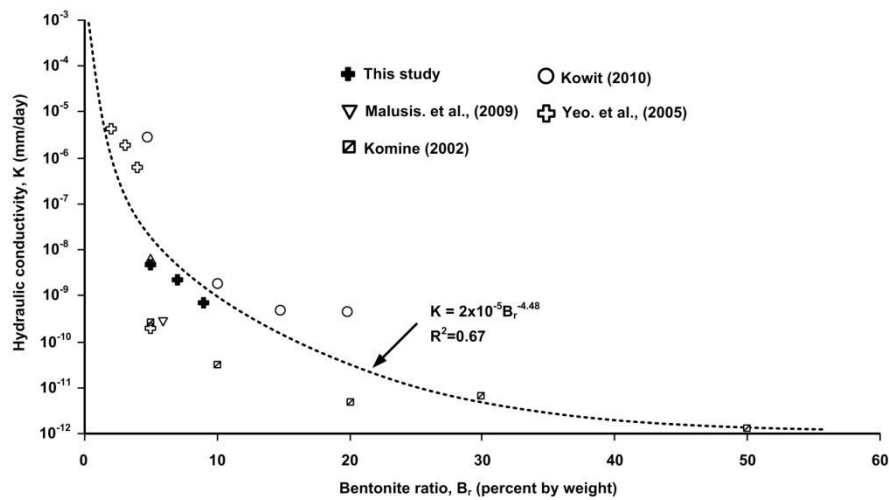
ของดินทรายนลดลงไปด้วย อย่างไรก็ตามผลการวิจัยครั้งนี้ อาจไม่เหมาะสมกับดินทรายในพื้นที่อื่นที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากนักวิจัยหลายท่าน [13, 17-19, 26-30] ที่ทำการศึกษาค่าความนำชลศาสตร์ของดินทรายผสมเบนโทไนท์ และนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำชลศาสตร์และอัตราส่วนผสมของทรายผสมเบนโทไนท์ ผลที่ได้แสดงดัง รูปที่ 5



a) ดินกลุ่ม Sandy Soil



b) ดินกลุ่ม Sandy Soil ที่มีค่า Cu = 1.5-5.5



c) ดินกลุ่ม Sandy Soil ที่มีค่า  $C_u = 1.5-3.0$

รูปที่ 5 ค่าความนำคลศาสตร์ของทรายผสมเบนโทไนต์ในอัตราส่วนต่าง

จาก รูปที่ 5 พบว่าเมื่อจำนวนอัตราส่วนเบนโทไนท์ที่นำมาผสมทรายเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความนำคลศาสตร์ลดลง โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ  $K = 9 \times 10^{-7} B_r^{-3.45}$  (รูปที่ 5a) เมื่อ  $K$  คือค่าความนำคลศาสตร์ (m/s) และ  $B_r$  คืออัตราส่วนผสมเบนโทไนท์โดยน้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์) อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2=0.49$ ) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ต่ำ [31, 32] ทำให้ไม่ควรที่จะนำมาใช้ในการตัดสินใจออกแบบส่วนผสมของเบนโทไนท์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการตรวจสอบข้อมูลของดินทรายของนักวิจัยดังกล่าวพบว่าหากพิจารณาใช้ค่า Coefficient of uniform ( $C_u$ ) มาเป็นเกณฑ์ในการสร้างสมการ จะทำให้สามารถตัดข้อมูลของ นันทนต์ [28] และ Luiz et al. [26] เนื่องจากไม่ทราบค่า  $C_u$  และ ข้อมูลของ Tanit [29] เนื่องจากมีค่า  $C_u$  เท่ากับ 15 ซึ่งมากกว่าของนักวิจัยท่านอื่นมาก จากนั้นสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ใหม่ดังสมการ  $K = 2 \times 10^{-6} B_r^{-3.69}$  (รูปที่ 5b) ค่า  $R^2=0.56$  ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตัดสินใจปานกลาง [31, 32] สมการดังกล่าวสามารถใช้ได้กับดินทรายที่มีค่า  $C_u$  ตั้งแต่ 1.5 ถึง 5.5 อย่างไรก็ตามหากตัดข้อมูลของ Xu et al [18] และ ทวีศักดิ์ [27] ซึ่งมีค่า  $C_u$  มากกว่า 3 ออก จะทำให้สมการมีค่า  $R^2$  เพิ่มขึ้นเป็น 0.67 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตัดสินใจปาน

กลาง [31, 32] และได้ความสัมพันธ์ดังสมการ  $K = 2 \times 10^{-5} B_r^{-4.48}$  (รูปที่ 5c) โดยสามารถใช้ได้กับดินทรายที่มีค่า  $C_u$  ตั้งแต่ 1.5 ถึง 3.00

#### 4. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การลดค่าความนำคลศาสตร์ของดินทรายโดยการผสมเบนโทไนท์นั้นว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ โดยการศึกษาครั้งนี้พบว่า ค่าความนำคลศาสตร์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเบนโทไนท์เพิ่มขึ้น โดยหากนำดินทรายมาผสมเบนโทไนท์กรณีที่ไม่ทำการบดอัดพบว่า เมื่อทำการบ่มตัวอย่างค่าความนำคลศาสตร์มีค่า 3.2, 2.5 และ 1.0 mm/day และ 16.2, 10.2 และ 6.9 mm/day เมื่อไม่บ่มตัวอย่าง สำหรับกรณีบดอัดตัวอย่างพบว่าค่าความนำคลศาสตร์ลดลงเหลือ 0.89, 0.22 และ 0.18 mm/day สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความนำคลศาสตร์มีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไปโดยมีค่า 0.81, 0.42 และ 0.18 mm/day เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน และ 0.41, 0.19 และ 0.06 mm/day เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน สำหรับอัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักตามลำดับ งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถของเบนโทไนท์ในการลดค่าความนำคลศาสตร์พบว่า

สามารถลดค่าความนำคลศาสตร์ลงได้ 29, 55 และ 129 เท่า กรณีทำการบดอัดตัวอย่างและ 31, 48 และ 117 เท่า กรณีที่ไม่ทำการบดอัดตัวอย่าง สำหรับอัตราส่วนเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

สุวณีและคณะ [33] ได้เสนอแนะว่าดินที่มีความเหมาะสมที่จะทำการขุดสระไว้สำหรับกักเก็บน้ำ ควรจะมีค่าความนำคลศาสตร์ไม่มากกว่า 8.6 mm/day ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้พบว่า ทราบผลสมเบนโทไนท์ที่ทำการทดสอบทุกกรณีมีค่าความนำคลศาสตร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ยกเว้นทราบผลสมเบนโทไนท์ที่มีอัตราส่วนสมเบนโทไนท์ร้อยละ 5 และ 7 ที่ไม่ได้ทำการบ่มและไม่ทำการบดอัดก่อนการนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจใช้เบนโทไนท์เป็นส่วนผสมในดินทรายสำหรับกรณีอื่น ๆ เช่น การใช้รองพื้นบ่อขยะ ซึ่งจะต้องมีค่าความทึบน้ำสูงกว่าสระน้ำ งานวิจัยนี้จึงได้สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์ที่นำมาผสมดินทราย โดยได้สมการดังนี้  $K = 9 \times 10^{-7} B_r^{-3.45}$  ( $R^2=0.49$ ) ใช้ได้กับดินทรายทั่วไป และ  $K = 2 \times 10^{-6} B_r^{-3.69}$  ( $R^2=0.56$ ) ใช้ได้กับดินทรายทั่วไปที่มีค่า  $C_u$  1.5 - 5.5 และ  $K = 2 \times 10^{-5} B_r^{-4.48}$  ( $R^2=0.67$ ) ใช้ได้กับดินทรายทั่วไปที่มีค่า  $C_u$  1.5 - 3.0 เมื่อ  $K$  คือค่าความนำคลศาสตร์ (m/s) และ  $B_r$  คืออัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ (เปอร์เซ็นต์)

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ให้ทุนสนับสนุนสำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2559, กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2559.

- [2] จิรสรณ์ สันติสิริสมบุรณ์, การลดขนาดแบบจำลองภูมิอากาศโลกเพื่อการศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศต่อการผลิตข้าวของประเทศ ไทย งานวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ, กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2559.
- [3] กรมพัฒนาที่ดิน. (สืบค้นเมื่อ 28 พฤษภาคม 2561) . โครงการแหล่งน้ำในไร่นานอกเขตชลประทาน [online]. Available: [http://www.ddd.go.th/WEB\\_Water/index.html](http://www.ddd.go.th/WEB_Water/index.html)
- [4] Jin L., Song W., Shu X., and Huang B., “Use of water reducer to enhance the mechanical and durability properties of cement-treated soil,” Construction and Building Materials. vol.159, pp. 690-694, Jan. 2018.
- [5] Bouwer, H., Ludke, J., Rice R.C., “Sealing pond bottoms with muddy water,” Ecological Engineering, vol.18, pp. 233-238, Dec. 2001.
- [6] สมชาย ดอนเจดีย์, วราวุธ วุฒิวิชัย และนิธิรัชต์ สงวนเดือน, “การประยุกต์ใช้ผ้าใบคอนกรีตสำหรับการชลประทาน,” ใน *ชลกร ฉบับวันพุธชาติ 4 มกราคม 2560*, กรุงเทพฯ : สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2560, หน้า 157-166.
- [7] เจริญ นาคะสรรค์, อาชีชัน แกสมาน และอดิศักดิ์ รุ่งวิชาณวัฒน์, “ต้นแบบการทำยางปูสระน้ำจากน้ำยางธรรมชาติ,” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, 15 กุมภาพันธ์ 2550.
- [8] J. Kolawole, M. Osinubi, M. O. Charles and A. M. Nwaiwu, “Hydraulic conductivity of compacted Lateritic soil,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.131, no.8, pp. 1034-1041, Aug. 2005.

- [9] A. Shahid, M. Aslam and M. Shafiq, "Reducing water seepage from earthen ponds," *Agricultural Water Management*, vol.30, pp. 69-76, Mar. 1996.
- [10] ศราวุธ ไกวเครือ และประทีป ดวงเดือน, (2552). "การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือใช้จากโรงงาน," ใน *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 281-286.
- [11] ชัชชัย พิรมล, "การประยุกต์ใช้ดินซีเมนต์เพื่อการดาดคูส่งน้ำชลประทาน," *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 2545.
- [12] M. H. Gleason, D. E. Daniel and G. R. Eykholt, "Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.123, no.5, pp. 438-445, May 1997.
- [13] M. A. Malusis, E. J. Barben and J. C. Evans, "Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.135, no.5, pp. 664-672, May 2009.
- [14] A. Norris, G. D. Emidio, M. A. Malusis and M. Replogle, "Modified bentonites for soil-bentonite cutoff wall applications with hard mix water," *Applied Clay Science*, vol.158, pp. 226-235, June 2018.
- [15] J. Lin, B. Jiang and Y. Zhan, "Effect of pre-treatment of bentonite with sodium and calcium ions on phosphate adsorption onto zirconium-modified bentonite," *Journal of Environmental Management*, vol.217, pp. 183-195, Jul. 2018.
- [16] H. S. Ahn and H. Y. Jo, "Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of compacted bentonite," *Applied Clay Science*, vol.44, pp. 144-150, Apr. 2009.
- [17] H. Komine, "Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite-based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.134, no.4, pp. 497-508, Apr. 2008.
- [18] H. Xu, W. Zhu, X. Qian, S. Wang and X. Fan, "Studies on hydraulic conductivity and compressibility of backfills for soil-bentonite cutoff walls," *Applied Clay Science*, vol.132-133, pp. 326-335, Nov. 2016.
- [19] โกวิทย์ ทศศิริ, "คุณสมบัติการไหลซึมของของไหลที่มีสารปนเปื้อนผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนท์บดอัด," *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2544
- [20] E. Guler, H. O. Ozhan and S. Karaoglu, "Hydraulic performance of anionic polymer-treated bentonite-granular soil mixtures," *Applied Clay Science*, vol.157, pp. 139-147, Jun. 2018.
- [21] W. J. Cho, J. O. Lee and K. S. Chun, "The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite," *Applied Clay Science*, vol.14, pp. 47-58, Feb. 1999.

- [22] W. M. Ye, Z. J. Zheng, B. Chen, Y. G. Chen, Y. J. Cui and J. Wang, "Effects of pH and temperature on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite," *Applied Clay Science*, vol.101, pp. 192-198, Nov. 2014.
- [23] C. S. Hong, C. D. Shackelford and M. A. Malusis, "Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite-amended soil-bentonite backfill," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 138, no.1, pp. 15-25, Jan. 2012.
- [24] บริษัทเทพเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด, "รายงานผลการทดสอบโซเดียมเบนโทไนด์" สำนักวิเคราะห์วิจัยทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพฯ, สิงหาคม 2560.
- [25] T. W. Lambe, *Soil Testing for Engineers*, New York: John Wiley & Sons Publishing, 1951.
- [26] T. L. C. Morandini and A. D. L. Leite, "Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes," *Engineering Geology*, vol.196, pp. 251-267, Sep. 2015.
- [27] ทวีศักดิ์ วงศ์ไพศาล และ นท แสงเทียน, "คุณสมบัติของดินทรายปนทรายแป้งผสมเบนโทไนด์สำหรับก่อสร้างชั้นกันซึม," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, ปีที่12 ฉบับที่1, หน้า 19-29, มกราคม-เมษายน 2553.
- [28] นันทินิตย์ เจริญไธสง, "ศักยภาพของการใช้ทรายผสมเบนโทไนด์และดินเหนียวสงขลาเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย" ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2549.
- [29] T. Chalermyanont and S. Arrykul, "Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners," *Songklanakarin journal of science and technology*, vol.27, no.2, pp. 313-323, 2005.
- [30] S. S. Yeo, C. D. Shackelford and J. C. Evans, "Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.131, no.10, pp. 1189-1198, Oct. 2005.
- [31] J. S. Cramer, *Mean and Variance of  $R^2$  in Small and Moderate Samples*, *Journal of Econometrics*, vol.35, pp. 253-266, Jul. 1987.
- [32] Darlington, R., *Regression and Linear Models*, New York: McGraw-Hill, 1990.
- [33] สุวณี ศรีธวัช ณ อยู่ธยา, สมปอง นิลพันธ์, สมพงษ์ อ้นท้วม และ นฤมล จันทวีชรากร, "การประเมินค่าการสูญเสียน้ำโดยการรั่วซึมของสระน้ำที่ขุดในชุดดินต่างๆ บนพื้นที่ดินดอน," กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, กันยายน 2542.
- [34] สยาม แกมขุนทด, พานิช วุฒิพฤกษ์, สันชัย อินทพิชัย และพิทยา แจ่มสว่าง, "ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดผลแตกต่างกัน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 25 ฉบับที่ 1, หน้า 11-19, มกราคม - เมษายน 2558.

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2563) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- |                                                  |                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล         | สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง                             |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.วาทีต ภัคดี                 | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต                                           |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ             | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                                                            |
| 4. อาจารย์ ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว                 | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต                                           |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง       | ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ                                    |
| 6. อาจารย์มนัสชนก บริสุทธิญาณิ                   | สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์ และซัพพลายเชน<br>คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยรังสิต                                            |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.सानิต์ดา เตียวต้อย      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                                                                      |
| 8. อาจารย์ ดร.ยุทธนา ตาละลักษมณ์                 | ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                                                    |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยา แก้วอาษา         | คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร                                              |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ ศรีชาติ        | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี                                                       |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ หวังนิพานโต          | สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน<br>เทคโนโลยีปทุมวัน                                                            |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์     | ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม คณะวิทยาลัย<br>เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า<br>พระนครเหนือ      |
| 13. อาจารย์ ดร.กวีวัชร ทัตติวงศ์                 | ภาควิชาวิศวกรรมอัตโนมัติและหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ                               |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณศ พันธุ์สวัสดิ์      | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม<br>มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เหมือนหมาย อภินทนาพงศ์ | คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย                                                                         |
| 16. อาจารย์ ดร.ธนัท อ้วนอ่อน                     | ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร วิทยา<br>เขตบางเขน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                                       |

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2563) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- |                                           |                                                                          |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 17. รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์      | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ     |
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 19. อาจารย์ ร้อยโท ดร.รัฐวุฒิ วงษ์วิทย์   | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |

**คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์**  
**วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

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

**1. การเตรียมต้นฉบับ**

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

**รูปแบบการเขียนบทความ** ควรมีหัวข้อเรียงเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

**ชื่อเรื่อง** ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

**ชื่อผู้เขียน** ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

**บทคัดย่อ** บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

**คำสำคัญ (Keyword)** คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

**บทนำ** กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

**ตัวเนื้อหา** อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

**สรุป** บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

**กิตติกรรมประกาศ** ขอขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

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

## 2. วิธีการส่งบทความ

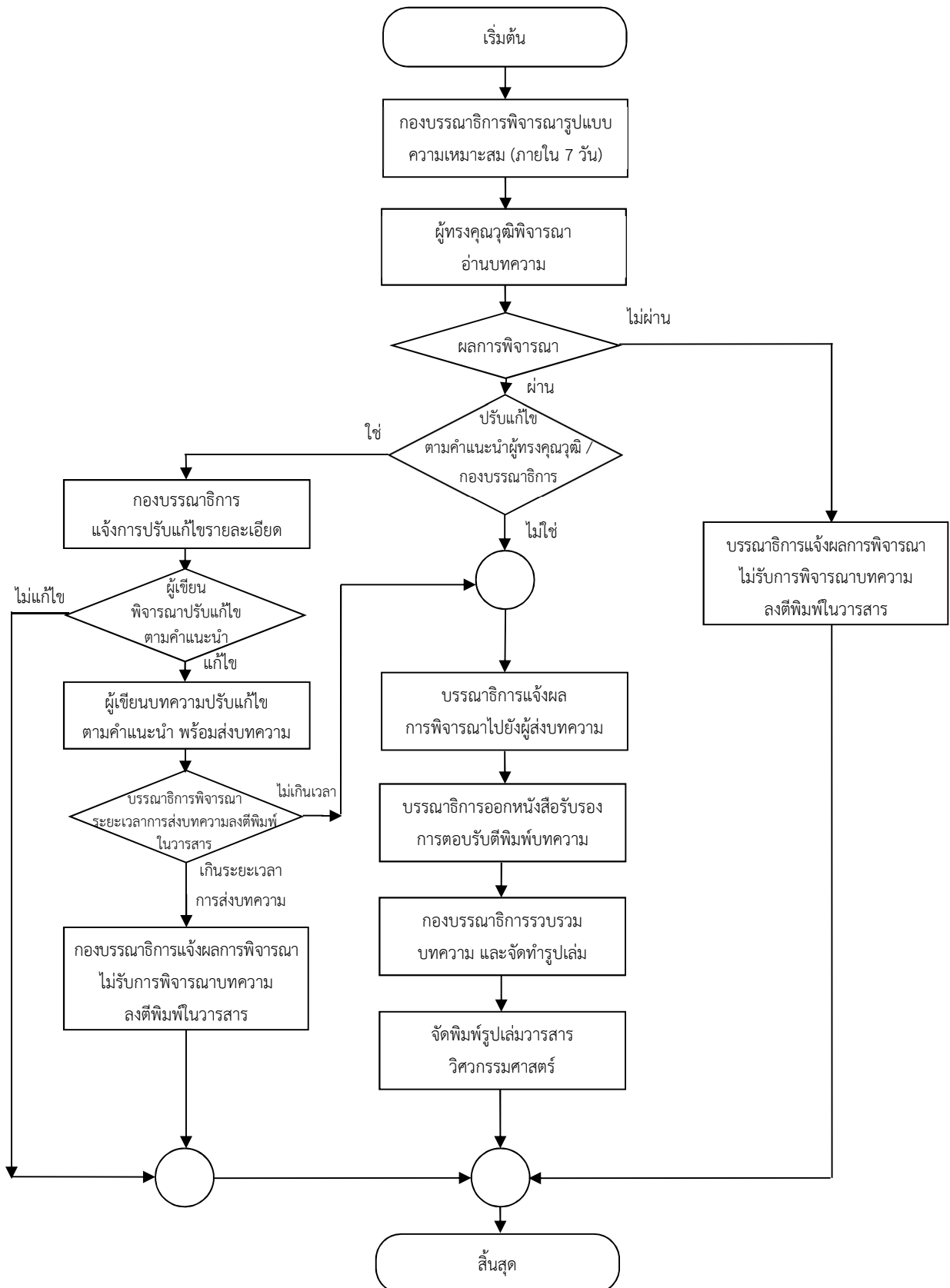
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่  
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม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

## 3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

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

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

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

## บทความวิจัย

- การอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคสเปาต์ดีดเบตทำงานร่วมกับฟลูอิดไคซ์เบต  
Pepper Drying Used Spouted Bed Combined with Fluidized Bed Technique  
โดย กิตติ สถาพรประสาธน์ กรณัฐ ทวีเจริญธรรม กรวิชญ์ ตลับทอง และ ฉัตรนิดา พรหมมาโอณ
- การแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงคโดยใช้วิธีเมตาฮิวริสติก  
Solving Many-objective Cockpit Crew Pairing Problem of Low-cost Airline using Metaheuristic  
โดย นิชา กฤษณพันธุ์ และ ปารเมศ ชูติมา
- สมการออกแบบสำหรับค่าเกนของตัวควบคุมสัดส่วนเรโซแนนซ์ไม่อุดมคติที่ใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริดเฟสเดียว  
The Design Equation for Gains of Non-ideal Proportional-Resonant Controller used in Control of Single-Phase Grid-Connected Inverter  
โดย เจษฎา พันธุ์ออน และ วิโรจน์ แสงธทอง
- การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกและประเมินผู้ให้บริการด้านการจัดซื้อและผลิตเครื่องจักรด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์  
PRIORITIZATION OF FACTORS AFFECTING SELECTION AND EVALUATION SERVICE PROVIDERS IN  
MACHINE PROCUREMENT AND FABRICATION BY USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS  
โดย ฌณัชชนม์ มณีธรรม และ วงษ์ระพี กาญจนะ
- การวิเคราะห์กระบวนการเพื่อปรับปรุงวิธีการตรวจสอบวัดชิ้นส่วนตู้เซิร์ฟเวอร์  
Process Analysis for Measured Method Improvement of Server Cabinet Part  
โดย เริงฤทัย ศิริรักษ์ กฤษณา คำชา และ วรพจน์ ศิริรักษ์
- การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์เพื่อเลือกสถานประกอบการปฏิบัติสหกิจศึกษาของนักศึกษา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก  
The application of the Analysis Hierarch Process to select the industry in the Cooperative Learning program, Faculty of Engineering, Rajamangala university of Technology Lanna Tak  
โดย ปรีดา จีวปัญญา สุทธิณี อาชนรากิจ และ อัมพิกา บุญกิจ
- จลนศาสตร์การปลดปล่อยของวิตามินบี 2 จากเม็ดเจลอัลจินตร่วมกับเวย์โปรตีนหรือแซนแทนกัน  
Release Kinetic of Riboflavin from Composite Gel Beads Consisting of Alginate Incorporated with Whey Protein or Xanthan Gum  
โดย สวรรักษ์ จันทระเทพนิมากุล และ สุภัฏญา วิชชุกิจ
- การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นตีสี่ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกานานกัน  
Stability Analysis of AC-DC Power System Feeding Paralleled Buck-Converter  
โดย จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม เทพพนม โสภาเพิ่ม และ กองพัน อาริรักษ์
- การศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและปริมาณน้ำร้อนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์  
A Study of Discharge Heads Affecting the Temperature and Amount of Hot Water Using Mathematical Modeling of a Solar Water Heating System  
โดย จิรวัฒน์ สิตรานนท์ กิตติวุฒิ สุทธิวิโรจน์ และ ณัฐพล รุ่งประแสง
- การลดค่าความนำหลศาสตร์ของดินทรายที่มีขนาดละเอียดด้วยเบนโทไนท์  
Hydraulic conductivity reduction of poorly graded sand by bentonite  
โดย สหสชัย ปรีวัตรพันธ์ สมชาย ดอนเจดีย์ และ นิมิตร เติตอันทพิพัฒน์