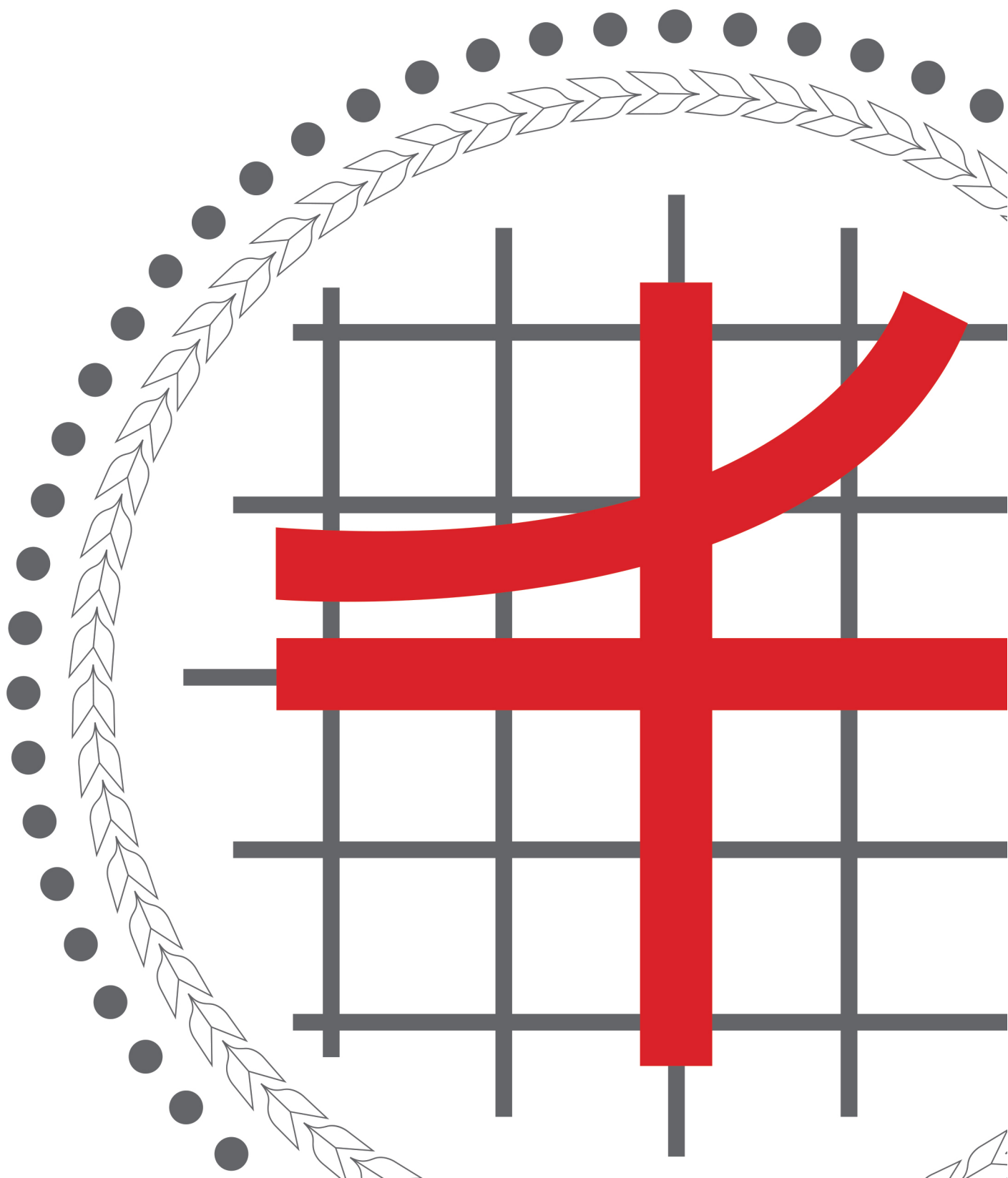


# Srinakharinwirot University Engineering Journal

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Vol. 18 No.1 (October 2022 - March 2023)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)



## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี วารสารตีพิมพ์ 2 ครั้งต่อปี (ทุก 6 เดือน) ในเดือน มีนาคม และ กันยายน ฉบับที่ 1 ช่วงเดือน ตุลาคม – มีนาคม ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนเมษายน – กันยายน ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

## วัตถุประสงค์

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

## เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลองครักษ์ อำเภองครักษ์

จังหวัดนครนายก 26120

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560

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

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

## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

### ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติ สถาพรประสาน

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

### รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

|                                                      |                                                |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์            | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน                 | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤษ                         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด                   | สถาบันสิรินธรวิทยเมธี                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช                   | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย                    | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง                     | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี                         |
| ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ                       | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                         |
| ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์                        | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมคูสีด                       | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ              | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์                      | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร                | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์                    | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร                     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์     | มหาวิทยาลัยมหิดล                               |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ขลิท ขาสีรักษ์ตระกูล               | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์             | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล                       | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร                   | มหาวิทยาลัยศิลปากร                             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์             | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี             |
| พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนิงค์ ณ อยุธยา | โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า                  |

### บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช

### หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวนิชกุล

## กองบรรณาธิการ

|                                                       |                                                |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์               | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์                    | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์                   | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ                        | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์                | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| รองศาสตราจารย์ธนยศ อริสริยวงศ์                        | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา ตันติสถิระพงษ์           | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์                  | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ              | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| อาจารย์ ดร.สุธิดา ทิพย์ภักษ์พันธุ์                    | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| อาจารย์นาวิ รุจิตามพ์                                 | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์             | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน                  | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤกษ์                        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด                    | สถาบันสิริวิทยเมธี                             |
| ศาสตราจารย์ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช                     | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จ่านไทย                       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง                      | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี                         |
| ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ                        | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                         |
| ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์                         | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมดุสิต                        | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ               | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์                       | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร                 | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภานแดง                    | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร                      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร                     |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์      | มหาวิทยาลัยมหิดล                               |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ชาลิต ชาลรักษ์ตระกูล                | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เดือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์              | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล                        | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร                    | มหาวิทยาลัยศิลปากร                             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์              | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี             |
| พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา | โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า                  |

### ฝ่ายการเงิน

นางสาวลินดา นิลพัท

### ฝ่ายประชาสัมพันธ์

นายณัฐกาญจน์ ไชยสมบูรณ์

นางธิดา ศรีกังพาน

### ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์



## บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลากว่า 15 ปี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณากลั่นกรองและประเมินคุณภาพตามกระบวนการจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับนี้ ได้นำเสนอบทความจำนวนทั้งสิ้น 8 บทความ เป็นบทความวิจัยจำนวน 8 บทความ โดยบทความทั้งหมดเป็นผลงานวิจัยพื้นฐานและผลงานวิจัยประยุกต์ในสาขาต่างๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งผลงานที่เผยแพร่ในครั้งนี้เป็นผลงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานและการแก้ปัญหาเชิงปฏิบัติการที่เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน

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

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

บรรณาธิการวารสาร

## สารบัญ

### บทความวิจัย

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| การประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่คุณภาพสำหรับการวางแผนการออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้<br>Application of Quality Function Deployment for Fruit and Vegetable Washing Machine Design Planning<br>ณัฐฐา วสุสิปปกร พิรภาพ จอมทอง                                                                                                                                  | 1  |
| การจำลองสถานการณ์การให้บริการของรถสองแถวที่เหมาะสมในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน เพื่อรองรับระบบขนส่งมวลชน<br>จังหวัดนครราชสีมา<br>A Suitable Minibus Services Simulation in Rush Hour to Support the Public Transport System in Nakhon Ratchasima Province<br>ศุภกฤต พรวิโรธสง สวงวน วงษ์ชวลิตกุล มารุต โคตรพันธ์                                                        | 15 |
| วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลระยะยาวของปริมาณยอดขายการจำหน่ายรถยนต์ในประเทศด้วยอนุกรมเวลา; กรณีศึกษา ปี พ.ศ.2554-2564<br>Long Term Trend Analysis of Domestic Car Sales Volume Using Time Series; 2011-2021 Case Study<br>สุนันรินทร์ เพชรรัตน์ รุ่งอรุณ บุญถ่าน รุ่งโรจน์ ฤกษ์หรรษา                                                                      | 31 |
| การพัฒนาระบบเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มสำหรับพื้นที่ปลูกทุเรียน จังหวัดนนทบุรี<br>ศิริชัย สารมนัส วรินทร์ บุญยะโรจน์                                                                                                                                                                                                                                          | 42 |
| การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่ติดตั้งแผ่นปีกสามเหลี่ยมกับแผ่นปีกสามเหลี่ยมพรุน<br>Comparison of Heat Transfer and Pressure loss between Circular Tube Heat Exchanger Installed the Delta-Winglet Tapes and Perforated Delta-Winglet Tapes<br>นิวัฒน์ เกตุชาติ นพรัตน์ อมัตริรัตน์ บัณฑิต กฤดาคม | 54 |
| การออกแบบและสร้างรถเข็นไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบความเร็ว 3 ระดับ ที่ควบคุมด้วยมือโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์<br>The Design and Construction of 3 Speed Levels Electric Wheelchair for Disabilities Controlled with Hand by using Microcontroller<br>ชัยพร อัดโตดดร นิตติคม อริยพิมพ์ ธนัช เอกเกื้อกุล พงศกร ชิตชอบ จิรวัดน์ วรณโรจน์<br>ธนกร ศิริมงคลกานต์               | 70 |

## สารบัญ (ต่อ)

### บทความวิจัย

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Customer Satisfaction with Service Quality of the Bangkok Mass Rapid Transit System<br>Dussadee Satirasetthavee <sup>1</sup> Isrrah Malabanan Songyot Kitthamkasorn Jiranan Panpaksorn              | 83  |
| การกำหนดวิธีปฏิบัติการบินเข้าและออกของอากาศยานภายในเขตประชิดสนามบิน ระหว่างสนามบินเชียงใหม่<br>ปัจจุบัน และสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน<br>พันศักดิ์ เนินทราย ณกร อินทรพยุง | 103 |

## การประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่คุณภาพสำหรับการวางแผน

### การออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้

## Application of Quality Function Deployment for Fruit and Vegetable

### Washing Machine Design Planning

ณัฐฐา วสุลิปิกอร์<sup>1\*</sup> พีรภพ จอมทอง<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยคริสเตียน นครปฐม 73000

Natta Wasulipigorn<sup>1\*</sup> Peerapop Jomtong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Engineering Management Program, Faculty of Engineering and Industrial Technology,  
Silpakorn University, Nakhon Pathom

<sup>2</sup> Department of Biomedical Engineering, Faculty of Health Sciences, Christian University,  
Nakhon Pathom, 73000

Email: wasulipigorn\_n@silpakorn.edu

(Received: February 17, 2022; Revised: October 19, 2022; Accepted: November 21, 2022)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อวางแผนการออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ตามความต้องการของลูกค้า โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่คุณภาพ และแบบจำลองธุรกิจ เพื่อช่วยในการหาความต้องการ ซึ่งจะเริ่มจากการเก็บรวบรวมข้อมูลความต้องการของลูกค้าในกลุ่มร้านอาหารและโรงแรมที่ขึ้นทะเบียนกับการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทยและกรมการปกครองแล้วในภาคใต้ นำมาเรียบเรียงเป็นข้อมูลระบุในช่องกำหนดกลุ่มเป้าหมายของแบบจำลองธุรกิจ ก่อนนำข้อมูลที่ได้ไปจัดทำแบบสอบถามเพื่อหาระดับความสำคัญในแต่ละปัจจัยจากนั้นนำข้อมูลไปวิเคราะห์ในเทคนิคการกระจายหน้าที่คุณภาพ ระยะที่ 1 การวางแผนออกแบบผลิตภัณฑ์ในบ้านแห่งคุณภาพ พบว่า ระดับความสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้จากความต้องการของลูกค้า 12 อันดับแรก ได้แก่ ใช้วัสดุที่ปลอดภัย สามารถล้างทำความสะอาดผักผลไม้ได้ดี ใช้วัสดุที่ได้มาตรฐาน ราคามีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ สามารถหยิบผักผลไม้มาสะดวก ลักษณะของเครื่องต้องไม่ก่อให้เกิดอันตราย มีความแข็งแรง ดูแลรักษาง่าย ติดตั้งระบบสายดิน ปริมาณการล้างต่อรอบ ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย ขนาดเครื่องมีความเหมาะสมต่อบริเวณจัดตั้ง ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** เทคนิคการกระจายหน้าที่คุณภาพ แบบจำลองธุรกิจ บ้านแห่งคุณภาพ เครื่องล้างผักและผลไม้

#### ABSTRACT

This research aims to plan the design of a vegetable and fruit washing machine according to customer requirements. By applying the Quality Function Deployment (QFD) and the Business Model Canvas (BMC)

to help find needs. This will begin by collecting information on customer demand in restaurants and hotels registered with the Tourism Authority of Thailand and the Department of Provincial Administration in the southern region to compile into information in the BMC target audience field the data obtained were used to create a questionnaire to determine the importance of each factor before analyzing the data in QFD Phase 1 product design planning in quality homes. It was found that priorities affect the design of fruit and vegetable washing machines respectively. Top 12, use safe materials, can wash vegetables and fruits well, use standard materials, reasonable price, easy to pick up vegetables and fruits, the appearance of the machine must not cause any harm, strong, easy to care, installed grounding system, the amount of washing per cycle, easy to move, the size of the machine is suitable for the space set up accordingly.

**Keyword:** QFD, BMC, home of quality, fruit and vegetable washing machine.

## 1. บทนำ

การตกค้างของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาอย่างยาวนาน ทั้งในประเทศและต่างประเทศมีความเสี่ยงพอ ๆ กัน แม้จะมีการประกาศให้หยุดใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่เป็นอันตรายร้ายแรงแต่ก็ยังมีสารเคมีตัวอื่น ๆ ที่ผู้คนนำมาใช้ทดแทนและใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งวิธีการลดปัญหาจากการตกค้างของสารเคมีอาจมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการแก้ปัญหา เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น

เพื่อให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของยุคสมัยอุตสาหกรรมการทำความสะอาดและการฆ่าเชื้อจึงมีการเติบโตขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน จากการที่มีเครื่องใช้ไฟฟ้าและเครื่องจักรหลากหลายชนิดถูกผลิตขึ้นมาในหลายประเทศ เช่นเดียวกับเครื่องล้างผักและผลไม้ที่มีการพูดถึงมากขึ้น โดยมีการจดสิทธิบัตรรวม 1,300 ใบ ใน 30 ประเทศทั่วโลก [1] นั่นจึงเป็นตัวบ่งชี้ความต้องการเครื่องล้างผักและผลไม้ของผู้คนในปัจจุบันที่มีความสนใจเรื่องของการทำความสะอาดดังรูปที่ 1 เป็นเครื่องล้างผักผลไม้ใช้ที่ในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางถึงใหญ่ ซึ่งส่วนมากมีการใช้งานภายในโรงงานมากกว่า



รูปที่ 1 เครื่องล้างผักผลไม้

ที่มา: ASIA ENGINEERING PAC

โดยบริษัทตัวอย่างเริ่มต้นจากการเป็นผู้ผลิตและจำหน่ายน้ำยาซักฟอกที่ใช้กับเครื่องซักผ้าขนาดใหญ่ ซึ่งต้องใช้ น้ำยาซักฟอกที่มีคุณสมบัติพิเศษแตกต่างจากการซักผ้าด้วยมือหรือเครื่องซักผ้าขนาดเล็กทั่วไป การทำการตลาดช่วงแรกจึงเน้นกลุ่มลูกค้าประเภทโรงแรมและโรงพยาบาลที่มีการซักผ้าปริมาณมากและใช้เครื่องซักผ้าขนาดใหญ่ ต่อมาด้วยวิสัยทัศน์ของทีมผู้บริหารในการขยายตลาดได้มีการพัฒนาน้ำยาฆ่าเชื้อ น้ำยาล้างหลากหลายชนิดและนำเข้าเครื่องจักรอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการขายน้ำยา ดังนั้นบริษัทจึงมีแผนที่จะผลิตเครื่องล้างผักและผลไม้ออกสู่ตลาดเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่

เป็นลูกค้าขนาดกลางหรือร้านอาหารและโรงแรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาความต้องการของลูกค้าที่มีต่อเครื่องล้างผักและผลไม้ เพื่อออกแบบเครื่องตามความต้องการของลูกค้าโดยใช้เทคนิค Business Model Canvas มาประยุกต์ใช้กับฟังก์ชัน Quality Function Deployment ตั้งแต่การระบุลูกค้า การแปลงความต้องการนั้นเป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรม และกำหนดเป็นข้อกำหนดทั่วไปของเครื่อง

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เทคนิคการกระจายหน้าที่คุณภาพ (Quality Function Deployment)

วิธีการปรับใช้ฟังก์ชันคุณภาพได้รับการพัฒนาโดยวิศวกรชาวญี่ปุ่น เพื่อให้แน่ใจว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์แล้ว [2] โดยขั้นตอนการทำ QFD มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สำรวจความต้องการของลูกค้า จากการสำรวจ สัมภาษณ์ และรวบรวมข้อมูล

- 1) ระบุกลุ่มของลูกค้าและพฤติกรรมของกลุ่มลูกค้า
- 2) จัดกลุ่มลูกค้าและเรียงลำดับความสำคัญ

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดความต้องการเชิงเทคนิค และแปลความต้องการของลูกค้าให้เป็นความต้องการด้านเทคนิค (Capturing and Analyzing The voices)

- 1) ทำความเข้าใจในเสียงของลูกค้าที่ได้รับ
- 2) แปลงความต้องการของลูกค้าที่ได้เหล่านั้นให้เป็นความต้องการเชิงเทคนิคซึ่งต้องสามารถวัดได้ และเข้าใจได้

ขั้นตอนที่ 3 การแปลงความต้องการทางด้านเทคนิคให้เป็นความต้องการหรือคุณสมบัติ ทางด้านส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ (Translating Demanded Quality Into Performance Measure)

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการกำหนดความต้องการหรือคุณสมบัติทางด้านกระบวนการ (Choosing The Best Concept) และดำเนินการแปลงความต้องการหรือ

คุณสมบัติทางด้านส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ให้เป็นความต้องการหรือคุณสมบัติทางด้านกระบวนการ

1) กำหนดแนวทาง (Concept) และทำการเปรียบเทียบเพื่อหาแนวทางที่เหมาะสม

2) อาศัยเป้าหมายทางด้านต้นทุน (Target Costs) เป็นองค์ประกอบในการพิจารณา

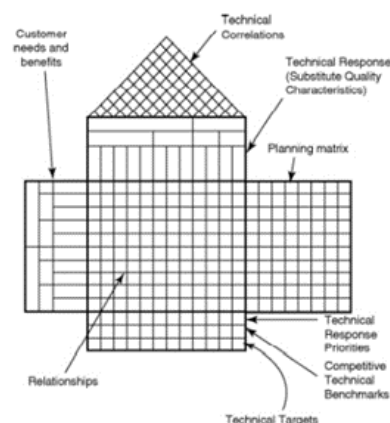
3) เลือกแนวทางที่ดีที่สุด และทำการกำหนดคุณสมบัติทางด้านส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับกระบวนการผลิต

ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนที่ความต้องการหรือคุณสมบัติทางด้านกระบวนการจะถูกนำมาวางแผน และกำหนดวิธีการในการควบคุม

1) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางด้านส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์กับคุณสมบัติทางด้านกระบวนการผลิต โดยอาศัยความรู้ในกระบวนการผลิต

2) ผลลัพธ์ที่ได้อาจอยู่ในรูปของ ระบบการควบคุมคุณภาพ (Quality Control System), ขั้นตอน (Procedures) เป็นต้น [3]

เมื่อรวบรวมข้อมูลได้แล้วจึงทำการวิเคราะห์ด้วย บ้านแห่งคุณภาพ (House of Quality: HOQ) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 บ้านแห่งคุณภาพ

ที่มา: เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บ้านแห่งคุณภาพ (House of Quality) เป็นการแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในบ้าน ซึ่งมีขั้นตอนในการสร้างอยู่ 7 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้าง ความต้องการและผลประโยชน์ของลูกค้า (Customer needs and Benefits) โดยทำการรวบรวมข้อมูลความต้องการของลูกค้าจากการสำรวจ สอบถาม หรืออื่น ๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ จัดเรียงลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยจากความต้องการของลูกค้า ก่อนนำลงในบ้านแห่งคุณภาพ

ขั้นตอนที่ 2 สร้าง “Planning Matrix” โดยเริ่มจากการกำหนดเป้าหมายหลังจากได้ ข้อมูลความต้องการของลูกค้า โดยต้องตอบคำถามทั้ง 5 ข้อก่อนการลงมือวางแผน เพื่อช่วยให้สามารถทำงานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

1) ความสำคัญของความต้องการแต่ละความต้องการของลูกค้า

2) ปัจจุบันสินค้าชนิดนั้นได้ตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากน้อยเพียงใด โดยสินค้าที่มีขายตอบสนองกับลูกค้าบางกลุ่มเท่านั้น

3) ปัจจุบันสินค้าชนิดนั้นมีคู่แข่งหรือไม่ และคู่แข่งตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากน้อยเพียงใด ซึ่งในปัจจุบันมีบริษัทนำเข้าสินค้าแค่เพียงไม่กี่รายและไม่ได้มีการผลิตสินค้าเอง

4) บริษัทมีความต้องการที่จะตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้ามากน้อยเพียงใด ซึ่งบริษัทมีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนไปตามความต้องการของลูกค้า

5) จุดขายที่เป็นจุดในการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าคืออะไร โดยปกติบริษัทมีการขายสัญญาบริการเพื่อดึงดูดใจลูกค้า

เมื่อได้คำตอบของคำถามทั้ง 5 ข้อแล้ว ให้รวบรวมคำตอบทั้งหมดแล้วจัดลำดับความสำคัญ เรียงไว้ในบ้านแห่งคุณภาพ

ขั้นตอนที่ 3 ทำในส่วนของ “Technical Response Priorities” โดยระบุสิ่งที่จำเป็นหรือความต้องการของการผลิตสินค้านั้น ๆ คือ ความต้องการทางด้านเทคนิคจากฝ่ายผลิต (Voice of the Developer: VOD) โดยความต้องการด้านเทคนิค ต้องมีการกำหนดทิศทางในการพัฒนา (Movement of Target Level) หรือการเคลื่อนไหวของข้อกำหนดมีทั้งหมด 3 ลักษณะดังนี้

↓ แนวโน้มค่าเป้าหมายปรับลดลง หมายถึง หากสามารถลดค่าได้จะดี

○ แนวโน้มค่าเป้าหมายคงที่ หมายถึง เป้าหมายที่ตั้งไว้ดีอยู่แล้ว หากสามารถทำได้ตามเป้าหมายนี้ก็สามารถที่จะตอบสนองต่อความต้องการผู้ใช้งานได้ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและเพียงพอ

↑ แนวโน้มต้องปรับค่าเป้าหมายเพิ่มขึ้น หมายถึง หากสามารถเพิ่มค่าได้จะดี

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ในส่วนของ “Relationship Matrix” หรือบริเวณส่วนกลางของบ้าน โดยการหาค่าของตัวเลขที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ ระหว่าง Voice of Customer (ด้านซ้ายมือของบ้าน) และ Voice of Developer (ด้านบนของบ้าน) หลังจากนั้นจะทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้าและความต้องการด้านเทคนิค โดยมีสัญลักษณ์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ คือ

◎ เลข 9 หรือ Strong relationship หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมาก

○ เลข 3 หรือ Moderate relationship หมายถึง มีความสัมพันธ์ปานกลาง

△ เลข 1 หรือ Weak relationship หมายถึง มีความสัมพันธ์น้อย

ช่องว่าง หรือ No relationship หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน [4]

ขั้นตอนที่ 5 และขั้นตอนที่ 6 เป็นการเริ่มทำในส่วนของฐานบ้านคือ “Competitive Benchmarking” โดย

ใช้ความต้องการทางด้านเทคนิค จากขั้นตอนก่อนหน้ามาเปรียบเทียบสมรรถนะ และ “Target Setting” โดยใช้ผลจากการเปรียบเทียบสมรรถนะมาตั้งเป้าหมายในการผลิตและการบริการ

ขั้นตอนที่ 7 ทำในส่วนของหลังคา คือ “Technical Correlations” โดยการสำรวจปัจจัยทางเทคนิค และความต้องการทางด้านเทคนิค สำหรับใช้ในการผลิตสินค้า นั้น ๆ แต่ละตัวมีความสัมพันธ์กันหรือไม่อย่างไร และเช็คการเกิดข้อขัดข้องในกระบวนการโดยมีการวิเคราะห์

ความสัมพันธ์ของความต้องการเชิงเทคนิคด้วยตนเอง โดยมีสัญลักษณ์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ดังนี้

+ มีความสัมพันธ์แบบเสริมกัน

- มีความสัมพันธ์แบบขัดแย้ง

O หรือ Strong แสดงว่าข้อกำหนดทั้งสองมีความสัมพันธ์กันมาก

X หรือ Weak แสดงว่าข้อกำหนดทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อย [3]

โดยการประยุกต์ใช้ฟังก์ชัน QFD โดยปกตินิยมใช้กันอยู่ 3 รูปแบบ นั่นคือ

1. แบบสี่ช่วง คือการใช้อนุกรมของเมตริกซ์ 4 ชั้น เพื่อครอบคลุมช่วงของการดำเนินการทั้งหมด 4 ช่วงที่สำคัญของการออกแบบและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2. แบบ Matrix Approach เป็นฟังก์ชันที่มีรูปแบบดั้งเดิมของญี่ปุ่น ซึ่งคิดค้นโดย Yoji Akao ตัวโมเดลมีขนาดใหญ่ ทำให้เข้าใจได้ยากจึงต้องมีการเชื่อมโยงกับโมเดลอื่น ๆ เช่น Value Engineer Failure Model and Effect Analysis และ Tree Analysis Production Operation ส่วนมากจึงเน้นใช้งานในลักษณะของระบบเมตริกซ์ 30 เมตริกซ์

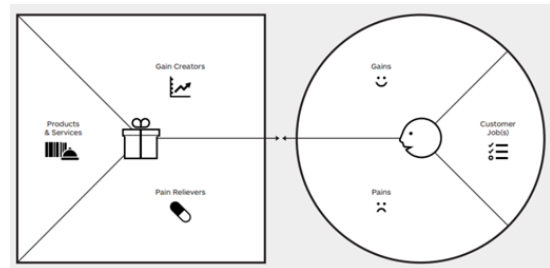
3. แบบ Integrated QFD Approach โมเดลนี้สร้างขึ้นตามขั้นตอนของการพัฒนาสินค้าและผลิตภัณฑ์ใหม่ มีระเบียบวิธีการและขั้นตอนที่ชัดเจน ซึ่งมีการรวมกันของกิจกรรมการดำเนินงาน กิจกรรมทางธุรกิจ และการ Re-Engineering ไว้ภายใน 1 โมเดล โดยเริ่มจากการแปลง

ความต้องการของลูกค้า เข้าสู่ขั้นตอนการพัฒนา วางแผนปฏิบัติการ กำหนดเป้าหมาย จนถึงการรวมข้อมูลความต้องการด้านโรงงานผลิตและการปฏิบัติในการดำเนินงาน

จาก 3 รูปแบบที่ได้กล่าวมาทั้งหมดส่วนใหญ่จะมีการประยุกต์ใช้ QFD แบบสี่ช่วงมากที่สุด เนื่องจากมีการใช้งานที่ง่ายและคล่องตัวมากกว่าแบบอื่น [5]

## 2.2 แผนภาพการสร้างคุณค่า (The Value Proposition Canvas)

ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญที่นำมาจากแผนผังโครงสร้างทางธุรกิจ Business Model Canvas คือ ข้อเสนอที่มีค่า (Value Proposition) และ กลุ่มลูกค้า (Customer Segment) โดยมี จุดประสงค์ที่จะช่วยให้นักออกแบบธุรกิจสามารถใส่รายละเอียดเพิ่มมากขึ้น เพื่อสร้างความสัมพันธ์ ของ 2 ส่วนดังกล่าวอย่างเป็นรูปธรรม และจับต้องได้ ซึ่งใช้คำว่า Fit ไม่ว่าจะเป็น Product-Market Fit หรือ Problem-Solution Fit [6]



รูปที่ 3 BMC ในการกำหนดข้อมูลความต้องการ  
ของลูกค้า

ที่มา: Journal of Business Models (2015)

โดยอธิบายในส่วนของ Customer Segment หรือ วงกลมทางขวาของรูปที่ 3 ซึ่งมีทั้งหมด 3 ส่วนที่ต้องทำความเข้าใจ คือ

1. งานที่ต้องทำ (Customer Jobs) ให้ระบุสิ่งที่ลูกค้าต้องการหรืออยากได้ ทั้งในแง่ของฟีเจอร์ ฟังก์ชัน หรือแม้กระทั่งอารมณ์ความรู้สึก หรือประสบการณ์ในการใช้งานที่ลูกค้าอยากได้



2. พึงพอใจ (Gains) ระบุสิ่งที่เพิ่มเข้าไปเพื่อสนองความต้องการของลูกค้าในงานที่ต้องทำ ที่จะยิ่งเติมเต็มความชอบ ความพอใจ ความอยากใช้ผลิตภัณฑ์หรือบริการของเรามากยิ่งขึ้น

3. ปัญหา (Pains) ระบุสิ่งที่ pain point สิ่งที่คุณลูกค้าไม่ชอบได้ ไม่ชอบ หรืออะไรที่จะสร้างประสบการณ์ใช้งานแย่ ๆ แก่ลูกค้า

ในส่วนของ ข้อเสนอที่มีค่า (Value Proposition) หรือวงจรบัสที่เหลี่ยมทางซ้ายของรูปที่ 2 คือ คุณค่าของผลิตภัณฑ์หรือบริการที่เราจะเสิร์ฟให้ลูกค้า โดยจะต้องอิงการทำแผน (mapping) กับ กลุ่มลูกค้าที่ได้ทำไปแล้วเสมอ ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน

1) สินค้าและบริการ (Products & Services) ให้ระบุคุณค่า (Value) ของสินค้าและบริการที่เป็นจุดเด่นจุดแข็ง สามารถตอบโจทย์งานที่ต้องทำแต่ละรายการได้

2) สร้างความพึงพอใจ (Gain Creators) ระบุคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์/การบริการ ที่จะทำให้ลูกค้าชอบ ประทับใจ อยากใช้งานของเรามากกว่าของคู่แข่ง โดยคิดให้ตอบโต้กับพึงพอใจที่ลูกค้าต้องการจริง ๆ

3) ช่วยแก้ปัญหา (Pain Relievers) ระบุคุณสมบัติผลิตภัณฑ์/การบริการ ของเราที่จะไปหักล้างกับ pain point ของลูกค้า

โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้ฟังก์ชัน QFD ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่หรือปรับปรุงคุณภาพสินค้า แต่ Dieck, et al. (2019) ทำวิจัยด้วยการแปลข้อกำหนดของนักท่องเที่ยวเป็นแอปพลิเคชัน AR บนมือถือผ่าน QFD เพื่อช่วยในการแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวรวมถึงระบุตำแหน่งได้ [7] หรือ Iwan, et al. (2017) ที่ประยุกต์ใช้แบบจำลองการปรับใช้ฟังก์ชันคุณภาพแบบหลายฐานเพื่อปรับปรุงอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ฮาลาลเพื่อเสริมสร้างประสิทธิภาพการปฏิบัติงานและความปลอดภัยของอาหาร [8]

ทั้งนี้การล้างทำความสะอาดผักผลไม้ มีวิธีมากมายในปัจจุบัน เช่น การล้างด้วยน้ำเปล่า สารละลายต่าง

ทับทิม (KMnO<sub>4</sub>) สารละลายเกลือ (NaCl) สารละลายกรดน้ำส้ม (น้ำส้มสายชู) acetic acid และสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบคกิ้งโซดาหรือผงฟู) (NaHCO<sub>3</sub>) ซึ่งเป็นวิธีที่คนส่วนมากใช้ในการล้างสิ่งสกปรกบนผิวของผักผลไม้ ในขณะที่ผู้บริโภครู้สึกว่าควรทราบด้วยว่าวิธีการล้างหลากหลายวิธีนั้นมีข้อจำกัดอะไรบ้าง และสารชนิดใดที่ไม่สามารถลดการตกค้างโดยวิธีการล้าง ซึ่งจะทำให้ผู้บริโภคสามารถหาทางออกในการบริโภคผักและผลไม้ได้อย่างปลอดภัยทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ซึ่งรวมถึงการมีส่วนร่วมในการขับเคลื่อนทางนโยบายเกี่ยวกับการจัดการเรื่องสารเคมีกำจัดศัตรูพืชด้วย [9]

### 3. ระเบียบและวิธีการวิจัย

#### 3.1 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลของลูกค้า

ดำเนินการวิจัยโดยศึกษาความต้องการจากลูกค้าซึ่งเป็นลูกค้ากลุ่มร้านอาหารและโรงแรมที่เป็นกลุ่มธุรกิจขนาดกลางและพบมากในประเทศไทย ซึ่งได้กำหนดกลุ่มประชากรที่ใช้ในการวิจัย คือ ลูกค้ากลุ่มร้านอาหารทางภาคใต้ที่ขึ้นทะเบียนกับการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย จำนวน 1,217 ราย ลูกค้ากลุ่มโรงแรมทางภาคใต้ที่ขึ้นทะเบียนกับกรมการปกครอง จำนวน 1,887 ราย และพนักงานซ่อมบำรุงของบริษัทตัวอย่าง สืบค้นข้อมูลวันที่ 15 ตุลาคม 2564

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ ลูกค้ากลุ่มร้านอาหารทางภาคใต้ที่ขึ้นทะเบียนกับการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย จำนวน 92 ราย ลูกค้ากลุ่มโรงแรมทางภาคใต้ที่ขึ้นทะเบียนกับกรมการปกครอง จำนวน 77 ราย จากการคำนวณในสูตรของ ทาโร ยามาเน่ (Taro Yamane) ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% ใช้ความคลาดเคลื่อนในการสุ่ม 10% ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในการยอมรับของบริษัทตัวอย่างที่ทำการศึกษา

#### 3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ซึ่งการเก็บข้อมูลในการศึกษานี้ใช้วิธี สัมภาษณ์ และการสังเกตพฤติกรรมจากพนักงานซ่อมบำรุงรวมถึง

การทบทวนวรรณกรรม ก่อนที่จะให้ฝ่ายการตลาดช่วย  
เรียบเรียงเป็นข้อมูลระบุในช่องกำหนดกลุ่มเป้าหมายของ  
BMC ก่อนนำข้อมูลที่ได้ไปจัดทำแบบสอบถามเพื่อหา  
คะแนนความสำคัญในแต่ละปัจจัย

### 3.3 การสร้างแบบสอบถาม

ได้ดำเนินการนำข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม  
สัมภาษณ์แบบไม่มีโครงสร้างกับลูกค้าและพนักงาน  
บำรุงรักษา ซึ่งจะใช้คำถามปลายปิดเป็นหลักและเพิ่มเติม  
ในส่วนแนะนำไว้ท้ายสุดของแบบสอบถามสำหรับผู้  
กรอกแบบสอบถามได้แสดงความคิดเห็นเพิ่มเติม [10]  
โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องล้างผัก  
และผลไม้ตามความต้องการของลูกค้าจากการวัดระดับ  
ปัจจัยความสำคัญจากการประยุกต์ใช้ BMC ในเบื้องต้น  
ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 ส่วน คือ 1.ข้อมูลทั่วไป 2.  
ระดับความสำคัญในการพัฒนาเครื่องล้างผักและผลไม้ 3.  
ข้อเสนอแนะ

โดยจะใช้ดัชนีความสอดคล้องระหว่างคำถามรายข้อ  
กับวัตถุประสงค์หรือจุดประสงค์ที่ต้องการวัดด้วยวิธี IOC  
(Index of Item-Objective Congruence) [11] นำ  
เครื่องมือรวบรวมข้อมูลกับวัตถุประสงค์ให้ผู้เชี่ยวชาญทั้ง  
3 ด้าน ได้แก่ หัวหน้าฝ่ายการตลาด หัวหน้าฝ่ายซ่อมบำรุง  
หัวหน้าฝ่ายวิศวกรรม ด้วยการนำคะแนนของผู้เชี่ยวชาญ  
แต่ละคนมาคำนวณจากสูตร

$$IOC = \frac{\sum R}{n} \quad (1)$$

เมื่อ IOC แทน ดัชนีความสอดคล้องระหว่างเครื่องมือ  
นั้นกับวัตถุประสงค์

R แทน ผลรวมของคะแนนความคิดเห็นจาก  
ผู้เชี่ยวชาญ

n แทน จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

จากนั้นใช้มาตรเจตคติตามวิธีของลิเคิร์ต (Likert  
Scale) ในการวัดระดับคะแนนความสำคัญ ด้วยการสร้างค่า

ที่ใช้บอกคุณค่ามีความต่อเนื่องกันและให้ค่าน้ำหนักของ  
มาตรฐานเป็น 1-5 โดย 1 มีความสำคัญน้อยที่สุด และ 5 มี  
ความสำคัญมากที่สุด ซึ่งแบบทดสอบจะผ่านการตรวจจาก  
ผู้จัดการหรือหัวหน้างานแผนกซ่อมบำรุง และฝ่ายการตลาด  
ของบริษัทตัวอย่าง หลังจากนั้นทดลองสำรวจความต้องการ  
ลูกค้าจำนวน 30 คน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความ  
เชื่อมั่นของแบบสอบถามโดยวิธีหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา  
ของครอนบาค (Cronbach)

### 3.4 การจัดเรียงระดับความสำคัญของความต้องการ ลูกค้า

นำผลที่ได้มาจัดเรียงระดับความสำคัญของแต่ละปัจจัย  
ด้วยการนำไปวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยเพื่อหาความต้องการที่  
สำคัญที่สุดของลูกค้า โดยความต้องการแต่ละข้อหาได้จาก  
การนำค่าเฉลี่ยโดยน้ำหนักมาคิด (Weighted Average)

### 3.5 การระบุความต้องการของลูกค้าในตาราง QFD

นำค่าที่ผ่านการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยและเรียงลำดับ  
เรียบร้อยแล้ว มารระบุในตารางการวางแผน QFD ตรงส่วนที่  
เป็นความต้องการของลูกค้า เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หา  
ความสัมพันธ์กับความต้องการด้านเทคนิคต่อไป

### 3.6 การรวบรวมข้อกำหนดทางเทคนิค

1) การสืบค้นข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต เช่น เอกสาร  
สิทธิบัตรย้อนหลัง 10 - 15 ปี, งานวิจัยที่เกี่ยวกับการ  
ออกแบบพัฒนาเครื่อง

2) ประสพการณ์จากผู้ชำนาญการ เช่น ผู้จัดการหรือ  
หัวหน้างานแผนกซ่อมบำรุงเครื่องของบริษัทตัวอย่าง,  
พนักงานซ่อมบำรุงที่ปฏิบัติงาน 10 ปีขึ้นไป

3) ผลิตภัณฑ์ของคู่แข่ง บริษัทที่นำเข้าเครื่องของ  
ประเทศไทย 2 บริษัท

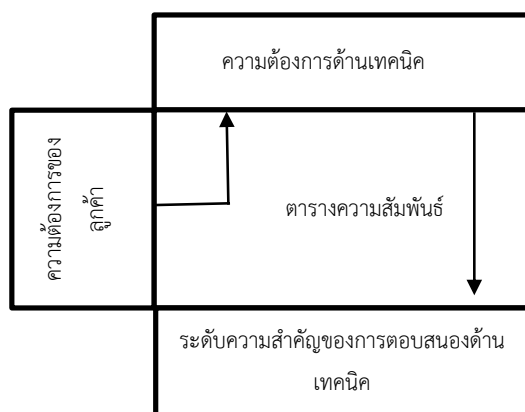
### 3.7 ระบุข้อมูลทางเทคนิคในตาราง QFD

โดยจัดประชุมร่วมกับฝ่ายวิศวกรรม ฝ่ายซ่อมบำรุง  
ฝ่ายการตลาด นำข้อมูลทางเทคนิคที่ได้จากการทำ BMC  
ร่วมกับการทบทวนจากงานวิจัย อินเทอร์เน็ต ประสพการณ์  
จากผู้ชำนาญการ และผลิตภัณฑ์ของคู่แข่งเพื่อเสนอ

ข้อคิดเห็นและหาข้อกำหนดร่วมกัน ก่อนระบุในตารางการวางแผน QFD ตรงส่วนที่เป็นความต้องการด้านเทคนิค

### 3.8 วิเคราะห์ข้อมูลความต้องการของลูกค้ากับข้อมูลทางเทคนิคด้วยฟังก์ชัน QFD

การวิเคราะห์ข้อมูลเกิดจากการนำข้อมูลความต้องการของลูกค้าที่ได้จากการทำแบบสอบถาม การสัมภาษณ์ และการสังเกตมาใช้ ด้วยการแปลงข้อมูลความต้องการนั้นเป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรม จากนั้นจะได้ระดับความสำคัญของการตอบสนองด้านเทคนิคเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของข้อมูลความต้องการทั้ง 2 ด้าน

### 3.9 แผนผังขั้นตอนการวิจัย

แผนผังขั้นตอนการวิจัย สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 5

## 4. ผลการวิจัย

### 4.1 ผลการวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า

ผลของความต้องการของลูกค้าจากการสัมภาษณ์ และการสังเกตพฤติกรรมจากพนักงานซ่อมบำรุงทำให้

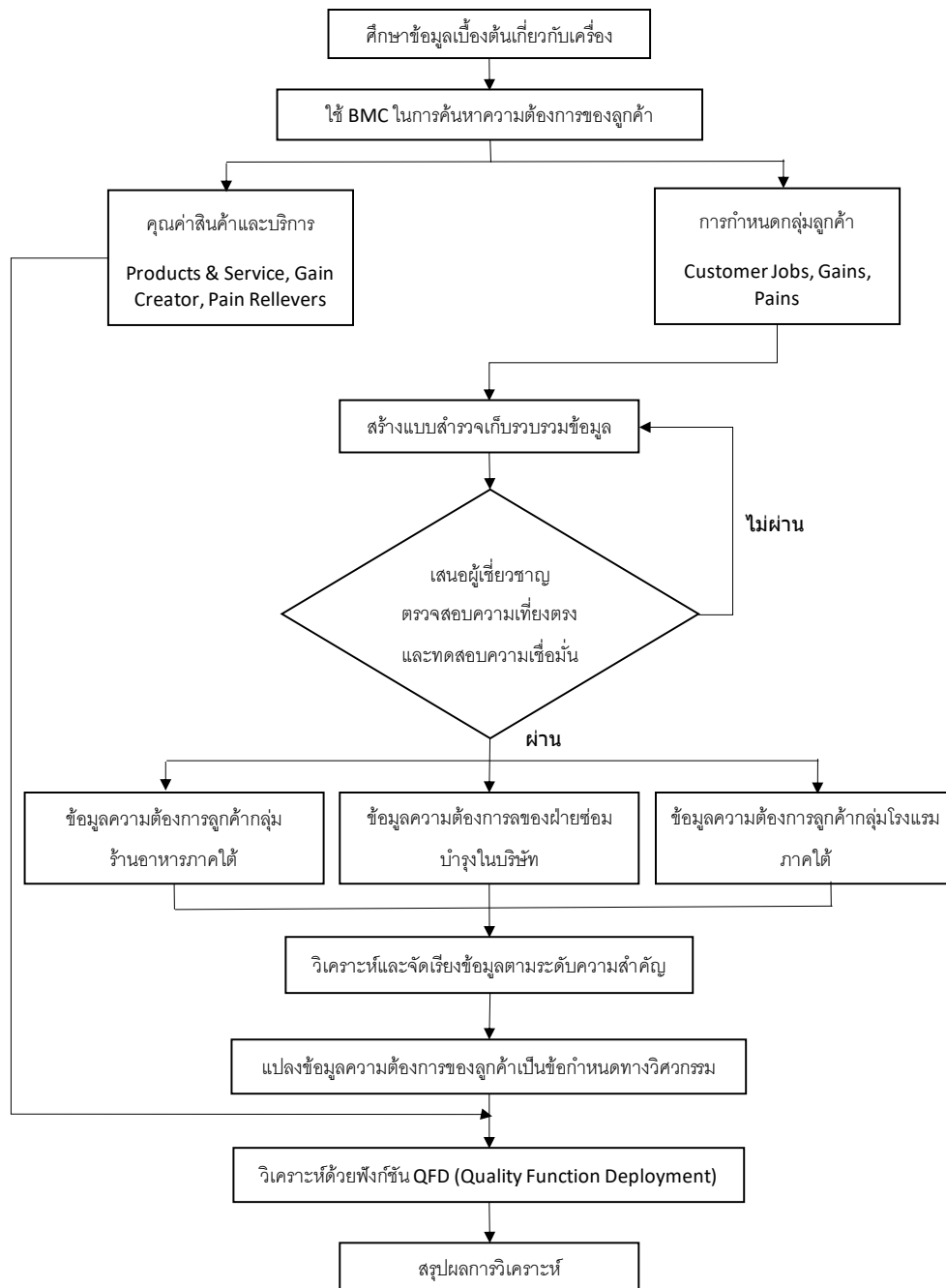
สามารถกำหนดกลุ่มความต้องการของลูกค้าและข้อกำหนดทางเทคนิคเบื้องต้นได้

โดยได้กำหนดกลุ่มเป้าหมายตามเทคนิค BMC ด้วยกระบวนการ Problem Solving Fit เพื่อให้สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าด้วยฟังก์ชัน QFD ได้ผลตามรูปที่ 6 ซึ่งจากกระบวนการ Problem Solving Fit สามารถแปลงออกมาเป็นปัจจัยความต้องการของลูกค้าเพื่อนำไปสู่การจัดทำแบบสอบถามได้ตามตารางที่ 1

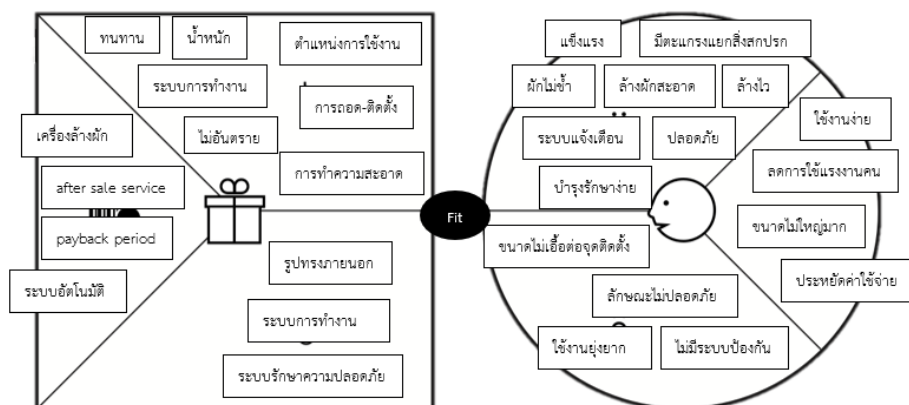
จากผลวิเคราะห์ปัจจัยความต้องการของลูกค้าทำให้สามารถสร้างแบบสอบถามเพื่อหาระดับคะแนนปัจจัยที่มีผลต่อความสำคัญในการออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ โดยจะผ่านการหาค่าความเที่ยงตรงจากผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 3 ด้าน ได้แก่

- 1) หัวหน้าฝ่ายการตลาด ที่มีประสบการณ์การทำงานด้านการวางแผนการตลาด วิเคราะห์ตลาด
- 2) หัวหน้าฝ่ายซ่อมบำรุง มีประสบการณ์การทำงานด้านการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักร ตรวจสอบเครื่อง
- 3) หัวหน้าฝ่ายวิศวกรรม มีประสบการณ์การทำงานด้านการวางแผนการจัดการเครื่องจักร ทำงานร่วมกับฝ่ายการตลาด

ด้วยการคำนวณจากสูตร IOC ผลออกมาเท่ากับ 0.7 และหาค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถามจากกลุ่มลูกค้าจำนวน 30 คน พบว่ามีค่าความเชื่อมั่นอยู่ที่ 0.92 จากการหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา ของครอนบาค (Cronbach) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำแบบสอบถามส่งให้กลุ่มตัวอย่างที่เป็นลูกค้าร้านอาหารและลูกค้าโรงแรมทางภาคใต้ของและประเทศไทย ตามจำนวนที่ได้คำนวณในสูตรของทาโร ยามาเน่



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำวิจัย



รูปที่ 6 กระบวนการ Problem Solving Fit

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์ปัจจัยความต้องการของลูกค้า

| ปัจจัย             | ความต้องการของลูกค้า                     |
|--------------------|------------------------------------------|
| ประสิทธิภาพเครื่อง | สามารถล้างทำความสะอาดผักผลไม้ได้ดี       |
|                    | สามารถลดปริมาณสารตกค้างได้               |
|                    | สามารถฆ่าเชื้อโรคได้                     |
|                    | สามารถเช็คปริมาณสารตกค้างได้             |
| ความสะดวก          | ดูแลรักษาง่าย                            |
|                    | มีระบบแจ้งเตือนหลังเสร็จสิ้นการทำงาน     |
|                    | ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย                    |
|                    | สามารถหยิบผักผลไม้มาสะดวก                |
| กายภาพ             | ลักษณะของเครื่องต้องไม่ก่อให้เกิดอันตราย |
|                    | ขนาดเครื่องมีความเหมาะสมต่อบริเวณจัดตั้ง |
|                    | รูปทรง (การออกแบบ)                       |
| วัสดุ              | ใช้วัสดุที่ได้มาตรฐาน                    |
|                    | มีความแข็งแรง                            |
|                    | ใช้วัสดุที่ปลอดภัย                       |
| อื่นๆ              | ราคา (มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์)         |
|                    | ปริมาณการล้างต่อรอบ                      |
|                    | เวลาในการล้างต่อรอบ                      |
|                    | ติดตั้งระบบสายดิน                        |

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ระดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยจากความต้องการของลูกค้า

จากการเก็บแบบสอบถามมีลูกค้ากลุ่มร้านอาหารตอบแบบสอบถามทั้งหมด 56 ราย คิดเป็น 60% ของกลุ่ม

ตัวอย่างที่ได้คำนวณไว้ และลูกค้ากลุ่มโรงแรมมีการตอบแบบสอบถามทั้งหมด 60 ราย คิดเป็น 63% ของกลุ่มตัวอย่างที่ได้คำนวณไว้ และพนักงานฝ่ายซ่อมบำรุงของบริษัทตัวอย่างจำนวน 12 ราย รวมทั้งสิ้น 128 ราย ที่มีการตอบแบบสอบถาม เมื่อวิเคราะห์แบบสอบถามของลูกค้าร้านอาหารและโรงแรมในประเทศไทย ทำให้ได้ข้อสรุปข้อมูลในส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นประชากรเพศชาย คิดเป็นร้อยละ 56 และส่วนมากมีอายุในช่วง 21-30 ปี คิดเป็นร้อยละ 35 มีผู้ที่รู้จักเครื่องล้างผักและผลไม้ คิดเป็นร้อยละ 46 และเคยได้ยินเกี่ยวกับเครื่อง ร้อยละ 54

จากการคำนวณค่าความสำคัญระดับความสำคัญระดับคะแนนปัจจัยที่มีผลต่อความสำคัญในการออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ จากความต้องการของลูกค้าโดยเปรียบเทียบมากที่สุดตามการวิเคราะห์ด้วยกราฟพาเรโตได้จากตารางที่ 2 ที่ 70:30 ซึ่งได้ผลทั้งหมด 12 อันดับ คือ ใช้วัสดุที่ปลอดภัย(3.54) สามารถล้างทำความสะอาดผักผลไม้ได้ดี(3.49) ใช้วัสดุที่ได้มาตรฐาน(3.47) ราคาเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์(3.41) สามารถหยิบผักผลไม้มาสะดวก(3.41) ลักษณะของเครื่องต้องไม่ก่อให้เกิดอันตราย (3.38) มีความแข็งแรง(3.37) ดูแลรักษาง่าย(3.37) ติดตั้งระบบสายดิน(3.34) ปริมาณการล้างต่อรอบ(3.30) ง่ายต่อ

การเคลื่อนย้าย(3.30) ขนาดเครื่องมีความเหมาะสมต่อบริเวณจัดตั้ง(3.27) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ระดับคะแนนความสำคัญของแต่ละปัจจัย

| ความต้องการของลูกค้า<br>(Customer need) |                                          | ค่าความสำคัญ<br>IMP |
|-----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|
| ปัจจัยทาง<br>ประสิทธิภาพ<br>เครื่องจักร | สามารถล้างทำความสะอาดผักผลไม้ได้ดี       | 3.49                |
|                                         | สามารถลดปริมาณสารตกค้างได้               | 3.18                |
|                                         | สามารถฆ่าเชื้อโรคได้                     | 3.21                |
|                                         | สามารถเก็บปริมาณสารตกค้างได้             | 2.96                |
| ปัจจัยด้าน<br>ความ<br>สะดวก             | ดูแลรักษาง่าย                            | 3.37                |
|                                         | มีระบบแจ้งเตือนหลังเสร็จสิ้นการทำงาน     | 3.20                |
|                                         | ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย                    | 3.30                |
|                                         | สามารถหยิบผักผลไม้สะดวก                  | 3.41                |
| ปัจจัยทาง<br>กายภาพ                     | ลักษณะของเครื่องต้องไม่ก่อให้เกิดอันตราย | 3.38                |
|                                         | ขนาดเครื่องมีความเหมาะสมต่อบริเวณจัดตั้ง | 3.27                |
|                                         | รูปทรง (การออกแบบ)                       | 3.26                |
| ปัจจัยด้าน<br>วัสดุ                     | ใช้วัสดุที่ได้มาตรฐาน                    | 3.47                |
|                                         | มีความแข็งแรง                            | 3.37                |
|                                         | ใช้วัสดุปลอดภัย                          | 3.54                |
| ปัจจัยด้าน<br>อื่นๆ                     | ราคา (มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์)         | 3.41                |
|                                         | ปริมาณการล้างต่อรอบ                      | 3.30                |
|                                         | เวลาในการล้างต่อรอบ                      | 3.25                |
|                                         | ติดตั้งระบบสายดิน                        | 3.34                |

โดยทางผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญของบริษัทตัวอย่างมีการปรึกษากันก่อนเลือกสัดส่วน 70:30 ในการดำเนินการวิเคราะห์เนื่องจากพบว่าระดับคะแนนความสำคัญของแต่ละปัจจัยมีค่าใกล้เคียงกันมากรวมถึงความต้องการของ

ลูกค้าบางประการที่เล็งเห็นว่ายังไม่จำเป็นต้องนำมาเพื่อออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้

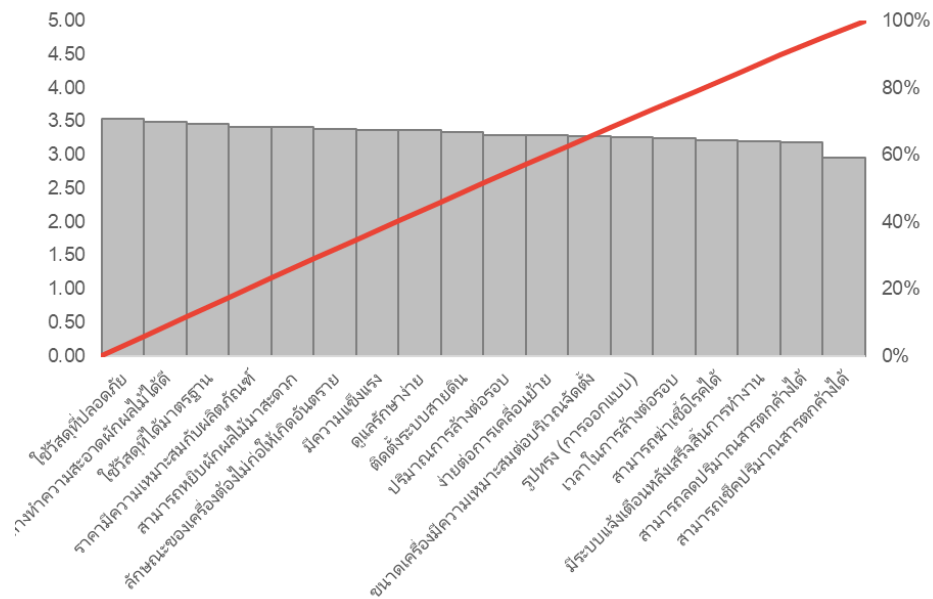
#### 4.3 การวิเคราะห์เมตริกการวางแผนผลิตภัณฑ์

จากข้อมูลระดับคะแนนความสำคัญของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการตอบแบบสอบถามของลูกค้าทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์หาความต้องการทางด้านเทคนิคได้ โดยการประชุมร่วมกับผู้เชี่ยวชาญ เพื่อกำหนดทิศทางการออกแบบเครื่องซึ่งแสดงดังรูปที่ 8 ระดับน้ำหนักของความต้องการด้านเทคนิคมีน้ำหนักที่แตกต่างกัน โดยได้ยกตัวอย่างการคำนวณระดับความสำคัญ คือ รูปทรงภายนอก ดังนี้

$$\begin{aligned}
 &\text{ระดับน้ำหนักของความต้องการด้านเทคนิครายการ} \\
 &\text{“รูปทรงภายนอก”} = \sum (\text{คะแนนความสัมพันธระหว่าง} \\
 &\text{ความต้องการของลูกค้ากับความต้องการด้านเทคนิค} \times \\
 &\text{คะแนนความสำคัญ}) \quad (2) \\
 &= (3.37 \times 3) + (3.3 \times 9) + (3.38 \times 9) + (3.27 \times 9) \\
 &+ (3.26 \times 9) + (3.47 \times 3) + (3.37 \times 3) + (3.54 \times 3) + \\
 &(3.41 \times 1) + (3.30 \times 3) \\
 &= 173
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{จากนั้นนำไปหาเปอร์เซ็นต์ของระดับน้ำหนักของ} \\
 &\text{ความต้องการด้านเทคนิครายการ “รูปทรงภายนอก”} = \\
 &(\text{ระดับน้ำหนักของความต้องการด้านเทคนิค/ผลรวมของ} \\
 &\text{ระดับน้ำหนักของความต้องการด้านเทคนิค}) \times 100\% \quad (3) \\
 &= \frac{173}{1058.1} \times 100\% \\
 &= 16.4
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณทำให้ทราบความต้องการทางด้านเทคนิคที่มีระดับความสำคัญของความต้องการด้านเทคนิครูปที่ 9 โดยเปรียบเทียบมากที่สุดตามการวิเคราะห์ด้วยกราฟพาราเรโต้ที่ 70:30 ซึ่งได้ผลทั้งหมด 5 อันดับ คือ รูปทรงภายนอก (16.4) ความกว้างของเครื่อง (13.4) ความยาวของเครื่อง (13.4) ความสูงของเครื่อง (11.4) ระบบการทำงาน (9.5) ตามลำดับ



รูปที่ 8 ผลวิเคราะห์กราฟฟาเรโต้

|                                          | ความต้องการด้านเทคนิค | รูปทรงภายนอก | ความกว้างของเครื่อง | ความยาวของเครื่อง | ความสูงของเครื่อง | น้ำหนักของเครื่อง | ความทนทาน | การถอด-ติดตั้ง | การทำปฏิกิริยากับวัสดุ | ระบบไฟฟ้า | ระบบการทำงาน | ระบบรักษาความปลอดภัย | อายุการใช้งาน |
|------------------------------------------|-----------------------|--------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|----------------|------------------------|-----------|--------------|----------------------|---------------|
| ความต้องการของผู้ใช้อุปกรณ์              | IMP                   | ○            | ○                   | ↓                 | ↓                 | ↓                 | ↑         | ○              | ↑                      | ○         | ○            | ↑                    | ○             |
| สามารถสร้างความสะดวกแก่ผู้ใช้ได้         | 3.49                  |              |                     |                   |                   |                   |           |                |                        |           | 9            |                      |               |
| สามารถลดปริมาณสารตกค้างได้               | 3.18                  |              |                     |                   |                   |                   |           |                |                        |           | 9            |                      |               |
| สามารถฆ่าเชื้อโรคได้                     | 3.21                  |              |                     |                   |                   |                   |           |                |                        |           | 9            |                      |               |
| สามารถเก็บปริมาณสารตกค้างได้             | 2.96                  |              |                     |                   |                   |                   |           | 3              |                        |           | 3            |                      |               |
| ดูแลรักษาง่าย                            | 3.37                  | 3            | 3                   | 3                 | 3                 | 1                 |           |                | 3                      |           |              |                      | 9             |
| มีระบบแจ้งเตือนหลังเสร็จสิ้นการทำงาน     | 3.2                   |              |                     |                   |                   |                   |           |                |                        | 9         |              | 3                    |               |
| ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย                    | 3.3                   | 9            | 9                   | 9                 | 9                 | 9                 |           | 9              |                        |           |              |                      |               |
| สามารถหิ้วพกพาได้สะดวก                   | 3.41                  |              |                     |                   | 3                 |                   |           |                |                        |           |              |                      |               |
| ลักษณะของเครื่องต้องไม่ก่อให้เกิดอันตราย | 3.38                  | 9            | 3                   | 3                 | 3                 | 3                 |           |                |                        |           |              |                      |               |
| ขนาดเครื่องมีความเหมาะสมต่อบริเวณติดตั้ง | 3.27                  | 9            | 9                   | 9                 | 9                 | 3                 |           |                |                        |           |              |                      |               |
| รูปทรง (การออกแบบ)                       | 3.26                  | 9            | 9                   | 9                 | 9                 | 9                 |           | 3              |                        |           |              |                      | 3             |
| ใช้วัสดุที่ได้มาตรฐาน                    | 3.47                  | 3            |                     |                   |                   |                   | 9         |                |                        |           |              |                      | 1             |
| มีความแข็งแรง                            | 3.37                  | 3            |                     |                   |                   |                   | 9         |                |                        |           |              |                      | 1             |
| ใช้วัสดุที่ปลอดภัย                       | 3.54                  | 3            |                     |                   |                   |                   | 3         | 1              |                        |           |              |                      |               |
| ราคา (มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์)         | 3.41                  | 1            | 1                   | 1                 | 1                 | 1                 |           |                |                        |           | 1            |                      |               |
| ปริมาณการปล่อยรอบ                        | 3.3                   | 3            | 9                   | 9                 | 1                 | 1                 |           |                |                        |           |              |                      |               |
| เวลาในการปล่อยรอบ                        | 3.25                  |              |                     |                   |                   |                   |           |                |                        | 9         |              |                      |               |
| ติดตั้งระบบสายดิน                        | 3.34                  |              |                     |                   |                   |                   |           |                |                        | 3         |              | 9                    |               |
| ระดับน้ำหนัก (Raw score)                 |                       | 173          | 142                 | 142               | 122               | 89                | 72        | 52             | 10                     | 68        | 101          | 40                   | 47            |
| ระดับความสำคัญ (%Relative)               |                       | 16.4         | 13.4                | 13.4              | 11.5              | 8.4               | 6.8       | 4.9            | 1.0                    | 6.4       | 9.6          | 3.7                  | 4.4           |
| ลำดับ (Rank)                             |                       | 1            | 2                   | 3                 | 4                 | 6                 | 7         | 9              | 12                     | 8         | 5            | 11                   | 10            |

รูปที่ 9 เมตริกการวางแผนผลิตภัณฑ์

ผลจากการวิเคราะห์ทั้งหมด 5 อันดับ นั่นคือ 1. รูปทรงภายนอก 2.ความกว้างของเครื่อง 3.ความยาวของเครื่อง 4.ความสูงของเครื่อง 5.ระบบการทำงาน หลังจากการระบุความต้องการของลูกค้าใน QFD ระยะที่ 1 ทำให้ทราบข้อมูลความสำคัญของปัจจัยที่ควรตั้งให้อยู่ในอันดับแรก ๆ เพื่อนำไปออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์ ซึ่งระบบการทำงานในเบื้องต้นที่จะสามารถล้างทำความสะอาด ลดสารตกค้าง และฆ่าเชื้อ ของเครื่องมีการวางระบบไว้ทั้งหมด 3 แบบ นั่นคือ ระบบแรงดันน้ำ ระบบโอโซน และ น้ำยาเคมี (PAA)

ตารางที่ 3 ระบบการทำงานต่อความต้องการของผู้ใช้ อุปกรณ์

| ความต้องการของผู้ใช้ อุปกรณ์       | ระบบการทำงาน    | ค่าควบคุม |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| สามารถล้างทำความสะอาดผักผลไม้ได้ดี | ระบบแรงดันน้ำ   | 2-4 bar   |
| สามารถลดปริมาณสารตกค้างได้         | ระบบโอโซน       | ≥200 mg/h |
| สามารถฆ่าเชื้อโรคได้               | น้ำยาเคมี (PAA) | >80 ppm   |

โดยระบบแรงดันน้ำจะตอบโจทย์ในส่วนของการล้างพื้นผิวภายนอกของผักผลไม้ได้ดีจากการศึกษาควมมีค่าแรงดันอยู่ที่ 2-4 bar ระบบโอโซนมีผลทำให้สามารถลดปริมาณสารตกค้างจากสารจำพวกยาฆ่าแมลงได้ดีซึ่งควมมีการใช้ปริมาณโอโซนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 200 mg/h และในส่วนของน้ำยาเคมีชนิด PAA ที่มีผลทำให้ลดการเกิดเชื้อโรคได้ ซึ่งค่าปริมาณที่เหมาะสมต่อการใช้คือต่ำกว่า 80 ppm

จากที่กล่าวมาจะต้องมีการออกแบบเครื่องให้สามารถนำระบบทั้ง 3 แบบ ไปใช้งานร่วมกันได้รวมถึงข้อมูลที่มีต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนอื่น ๆ ของเครื่องล้างผักและผลไม้ใน QFD ระยะที่ 2 ต่อไป

## 5. สรุป

เรื่องของการทำความสะอาดส่วนใหญ่เป็นเรื่องปกติที่ผู้คนปฏิบัติกันมาอย่างเนิ่นนาน แต่ในปัจจุบันเกิดโรคระบาดโควิด-19 ขึ้น จึงเป็นสิ่งที่กระตุ้นให้ผู้คนหันมาสนใจการทำความสะอาดมากกว่าเมื่อก่อน ทั้งการทำความสะอาดร่างกาย สิ่งของ รวมถึงอาหารการกิน ถึงแม้ว่าการล้างผักและผลไม้ในบ้านเรือนจะเป็นเรื่องที่ไม่ได้เป็นเช่นนั้น เมื่อต้องล้างทำความสะอาดในปริมาณที่เยอะเพื่อรองรับกับการทำอาหารในแต่ละวัน ซึ่งเครื่องมือเครื่องใช้ส่วนใหญ่ที่จะช่วยแบ่งเบาภาระนี้จะถูกเน้นไปที่กลุ่มอุตสาหกรรมมากกว่า ดังนั้นจึงได้เสนอแนะแนวทางการประยุกต์ใช้ฟังก์ชัน QFD เชื่อมโยงกับเทคนิค BMC ที่สามารถแปลงความต้องการจากลูกค้าโดยตรงให้เป็นคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ และคุณลักษณะทางวิศวกรรม เพื่อออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ อีกทั้งยังสามารถลดการนำเข้าของกระบวนการออกแบบและช่วยวิเคราะห์ความเสี่ยงในกระบวนการผลิตได้

ผลการประยุกต์ใช้ฟังก์ชัน QFD และ BMC กับกรณีศึกษา ในการออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้ พบว่าปัจจัยที่สำคัญจากการตอบแบบสอบถามของลูกค้า คือ ใช้วัสดุที่ปลอดภัย ใช้วัสดุที่ได้มาตรฐาน มีความแข็งแรง ลักษณะของเครื่องต้องไม่ก่อให้เกิดอันตราย ติดตั้งระบบสายดิน มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ ขนาดเครื่องมีความเหมาะสมต่อบริเวณจัดตั้ง สามารถหยิบผักผลไม้สะดวก ปริมาณการล้างต่อรอบ สามารถล้างทำความสะอาดผักผลไม้ได้ดี ดูแลรักษาง่าย มีระบบแจ้งเตือนหลังเสร็จสิ้นการทำงาน และจากปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดทำให้แปลงมาเป็นคุณสมบัติด้านวิศวกรรม คือ รูปทรงภายนอก ความกว้างของเครื่อง ความยาวของเครื่อง ความสูงของเครื่อง ระบบการทำงาน ที่จะสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าครอบคลุมเกือบทั้งหมด



โดยทางผู้วิจัยและบริษัทตัวอย่างจะมีการทำการศึกษาและวิเคราะห์เพิ่มเติมจากข้อมูลจำเพาะของเครื่องรวมถึงเปรียบเทียบกับสินค้าและเครื่องจักรที่มีอยู่ในท้องตลาดเพื่อวิเคราะห์จุดเด่นของเครื่องใหม่และสร้าง HOQ ที่สมบูรณ์ต่อความต้องการของลูกค้า เพื่อสามารถออกแบบเครื่องได้อย่างครอบคลุม รวมถึงการวิเคราะห์ข้อกำหนดทางเทคนิคด้านตัวแปรเพื่อให้สามารถวัดค่าในเชิงปริมาณได้และนำไปสร้างเป็นข้อกำหนดได้อย่างชัดเจนขึ้นและกำหนดข้อกำหนดของคุณลักษณะทางวิศวกรรมเพื่อลดความผิดพลาดในการออกแบบจากข้อมูลทางด้านเทคนิคที่ไม่เพียงพอ รวมถึงการออกแบบชิ้นส่วนที่จะนำมาผลิตเครื่องล้างผักและผลไม้ใน OFD ระยะที่ 2 เพื่อดำเนินการสร้างเครื่องต้นแบบที่เป็นเครื่องล้างผักและผลไม้ต่อไป

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. H. Minh, B. V. Phuong, P. V. Binh and N. V. Duc, "Design, development and performance evaluation of a new- type fruit vegetable washer," *J. Mechanical Eng.*, ser. D, vol. 43, pp. 265-274, 2020.
- [2] R. Wolniak, "The history of the QFD method," *Sci. Univ. Tech. Memo*, vol.100, pp. 553-564, Jan. 2017.
- [3] W. Nakkiew, Quality function deployment, Handout, Industrial Eng., Univ. Chiang Mai, 2021.
- [4] A. Makme, "Hot pressing process improvement by QFD and FMEA techniques," M.Eng. dissertation, Mgmt. Eng., Univ. Silpakorn, 2019.
- [5] U. Janpratad, "The analysis and quality development of a relay for motor cycles by using quality function deployment," M. S. dissertation, Mgmt. Eng., Univ. Srinakharinwirot, 2012.
- [6] K. Chittrakool, "Product design based on business model canvas and quality function deployment case study: a design mobile dental," M.Eng. dissertation, Industrial Eng., Univ. Suranaree, 2017.
- [7] D. Han, T. Jung and T. Dieck, "Translating Tourist Requirements into Mobile AR Application Engineering through QFD," *Inter. J. Human-Com.*, vol 35, pp. 1842-1858, Mar. 2019.
- [8] V. Iwan, M. G and S. J. mei, "Application of multi- based Quality Function Deployment ( QFD) model to improve halal meat industry," *J. Isla. Mkt.*, vol 10, pp. 97-124, Oct. 2017.
- [9] P. K. Author, "Knowledge of vegetable washing pesticide contamination situation and review of proper washing of vegetable and fruits," Pesticide Warning Conf., Bangkok., 2015, pp. 1-12.
- [10] Labor Research Division, "summary of the survey research process", 2010.
- [11] M. Pattanasombatsuk, "Quality monitoring of research tools in nursing and social sciences," *J. M.N.S.*, vol 8, pp. 332-340, May-Aug. 2021.

## การจำลองสถานการณ์การให้บริการของรถสองแถวที่เหมาะสมในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน เพื่อรองรับระบบขนส่งมวลชนจังหวัดนครราชสีมา

### A Suitable Minibus Services Simulation in Rush Hour to Support the Public Transport System in Nakhon Ratchasima Province

ศุภกฤต พรวิธสง\* สงวน วงษ์ชวลิตกุล มาร์ต โคตรพันธ์

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

84 หมู่ 4 ตำบลบ้านเกาะ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Supagrit Prewthaisong\* Sanguan Vongchavalitkul Marut Khodphan

Department of Engineering Management, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University

84 Moo 4, Baankoh, Mueang District, Nakhon Ratchasima 30000

\*Corresponding author Email: chon\_ok@hotmail.com

(Received: October 1, 2022; Revised: November 1, 2022 ; Accepted: November 21, 2022)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงแนวทางการปรับปรุงคุณภาพการให้บริการของรถสองแถวโดยการบริหารจัดการเดินรถให้มีจำนวนรถสอดคล้องกับช่วงเวลาการให้บริการที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ เนื่องจากปัจจุบันการให้บริการยังขาดระบบที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้บริการ ส่งผลให้เกิดปัญหาในเรื่องความแออัด เบียดเสียดกันบนรถโดยสาร และความไม่ปลอดภัยในการเดินทาง ผู้วิจัยได้ศึกษาและเก็บข้อมูลในพื้นที่เมืองนครราชสีมาที่สำคัญ 2 จุดคือ บริเวณจุดจอดรถหน้าวัดพายัพและหน้าห้างสรรพสินค้าคลังพลาซ่าใหม่ จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาช่วงเวลาการให้บริการและผู้รับบริการรถสองแถว และใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์หาจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยที่รออยู่บริเวณจุดจอดรถในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ 1 ถึงระบบที่ 4 พร้อมทั้งหาช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลการวิจัยพบว่า หน่วยผู้ให้บริการที่เหมาะสมที่สุดในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า โดยการพิจารณาเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของสาย 1, 4, 5, 6, 8, 15 และ 4287 อีกสายละ 1 หน่วย ส่วนสาย 7 มีผู้มารับบริการมากที่สุดจึงพิจารณาเพิ่มเป็น 2 หน่วย และหน่วยผู้ให้บริการที่เหมาะสมที่สุดในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น โดยพิจารณาเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของสาย 2, 4, 5, 8, 10, 11 และ 14 อีกสายละ 1 หน่วย ในส่วนสาย 6 และ 7 มีผู้มารับบริการมากที่สุดจึงพิจารณาเพิ่มเป็น 2 หน่วย

**คำสำคัญ:** การจำลองสถานการณ์ ระบบขนส่งสาธารณะ รถสองแถว การบริหารจัดการเดินรถ

#### ABSTRACT

This research is a study of the approach to improve service quality of minibuses by managing the number of buses in accordance with the appropriate service intervals and efficiency. Because at present, the service providers still lack a system that meet the needs of service users that may result in the problem of congestion and overcrowding on minibuses and unsafe trips. The researcher studied and collected data in 2 important areas at the bus stop in front of Payup Temple and New Klang Plaza

Department Store. Then, the data was analyzed for service intervals and service users of minibuses and used simulation techniques to find the average number of people waiting in the parking area during rush hour to compare the efficiency of System 1 to System 4 at the same time, find a 95 percent confidence interval. The results showed that the most suitable service unit during the morning rush hour by considering to increase the number of minibus trips of Line 1, 4, 5, 6, 8, 15 and 4287 by one server unit each as for the Line 7 has the most service users, so consider adding by two server units. The most suitable service unit during the evening rush hour by considering to increase the number of minibus trips of Line 2, 4, 5, 8, 10, 11 and 14 by one server unit each as for the Line 6 and 7 has the most service users, so consider adding by two server units.

**Keywords:** Simulation, Public transport system, Minibus, Bus schedule management.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันสภาพการจราจรในเขตเมืองของจังหวัดนครราชสีมาประสบปัญหาความแออัดคับคั่ง การเดินทางมีความล่าช้าในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนและมีแนวโน้มทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น ก่อเกิดความเสียหายด้านเศรษฐกิจโดยรวม อีกทั้งยังส่งผลต่อภาพลักษณ์ของเมืองต้นแบบอัจฉริยะของชาวโคราชอีกด้วย การจัดให้มีระบบขนส่งมวลชนที่มีประสิทธิภาพของรัฐบาลได้ให้ความสำคัญและส่งเสริมรูปแบบการขนส่งระบบรางมากขึ้น เนื่องจากมีต้นทุนการเดินทางที่ต่ำและปลอดภัยกว่า โดยเฉพาะแนวคิดการพัฒนากระบวนรถไฟฟ้ามหานคร (Light Rail Transit-LRT) ซึ่งน่าจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการตอบโต้ภัย ความต้องการในด้านค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการเดินทางของผู้โดยสารได้มากกว่าทางเลือกหนึ่ง อย่างไรก็ตามการขนส่งด้วยรถโดยสารสาธารณะของรถสองแถวยังคงมีความจำเป็นต่อการขนส่งผู้โดยสารในเมืองนครราชสีมาอยู่และได้รับความนิยมมาเป็นเวลานาน ปัจจุบันยังไม่สามารถที่จะหาระบบขนส่งสาธารณะประเภทอื่นๆ ที่ดีกว่ามารับรองความต้องการในการเดินทางของประชาชนในเมืองได้ จากการสำรวจรถสองแถวที่ให้บริการเดินรถเฉพาะในเขตเทศบาล โดย สนข. โครงการศึกษาแผนแม่บทจราจรฯ [1] แบ่งออกเป็น 19 สาย มีจำนวนประมาณ 300 คัน และเดินรถนอกเขตเทศบาลเข้า

มาในตัวเมืองอีก 11 สายจำนวน 100 คัน ระยะเวลาที่เริ่มให้บริการตั้งแต่ 06.00 น. ถึง 20.00 น. ปัจจุบันได้พบปัญหาด้านการให้บริการขนส่งผู้โดยสารของรถสองแถวในบางพื้นที่ไม่สามารถให้บริการได้ดีเท่าที่ควร โดยเฉพาะในเขตเมืองชั้นในรอบอนุสาวรีย์ย่าโมซึ่งมีจำนวนผู้มาใช้บริการเยอะมากในเวลาชั่วโมงเร่งด่วนที่มีความต้องการการเดินทางมากกว่าความสามารถของระบบขนส่งที่มีอยู่จะรองรับได้ จากการศึกษาเรื่องความสามารถให้บริการรถสองแถวต่อความต้องการของประชาชนในพื้นที่บริเวณสถานีรถไฟฟ้ามหานครในอนาคต ของศุภกฤต พรวิโรธ [2] พบว่าตรงบริเวณหน้าสถานีรถไฟฟ้ามหานครราชสีมา การให้บริการของรถสองแถวในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนทั้งเที่ยวขาเข้าเมืองและออกนอกเมือง มีปริมาณผู้ใช้บริการรถสองแถวเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดปัญหาเรื่องประสิทธิภาพในการให้บริการและความปลอดภัยในการเดินทางเพราะมีจำนวนผู้โดยสารบางส่วนจำเป็นต้องยืนหรือห้อยโหนตรึงบันไดทางขึ้นรถซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ กรณ์พิทักษ์ อาสน์สุวรรณ [3] ได้ศึกษาถึงสภาพการให้บริการของรถสองแถวในเมืองพัทยา พบปัญหาในลักษณะคล้ายๆ กันคือ มีรถมากเกินไปในเวลากลางวัน(ช่วงเวลาปกติ) แต่ไม่เพียงพอในเวลาเร่งด่วน อีกทั้งยังพบข้อร้องเรียนในด้านการให้บริการที่แจ้งไปที่สำนักงานขนส่งจังหวัดชลบุรีเป็น

ประจำ และงานวิจัยของ ปิติ จันทุไทย [4] ได้การศึกษาพฤติกรรมผู้โดยสารในการเลือกใช้บริการขนส่งสาธารณะในเขตเมือง: กรณีศึกษาเทศบาลนครนครศรีธรรมราช ผลการศึกษาพบว่าเส้นทางเดินรถไม่ครอบคลุมพื้นที่ความต้องการ ปัญหาตารางเวลาในการเดินรถที่ไม่แน่นอน การให้บริการที่ไม่ได้มาตรฐาน รวมถึงระบบการให้บริการที่ดำเนินการโดยเอกชนซึ่งมุ่งเน้นผลกำไรมากกว่าการให้บริการเชิงสังคม และผลการสัมภาษณ์ผู้ขับรถสองแถวยอมรับว่ามีการจอดรถซ้อนคันและให้มีการโหนท้ายรถโดยสาร ด้วยเหตุนี้คนจึงไม่ค่อยให้ความเชื่อมั่นในการให้บริการรถสองแถวจึงได้หันมาใช้รถส่วนตัวมากขึ้น และในอนาคตเมื่อมีระบบขนส่งมวลชนนครราชสีมาเข้ามาให้บริการ ก็อาจส่งผลกระทบต่อจำนวนผู้โดยสารของรถสองแถวได้ เนื่องจากแนวเส้นทางเดินรถของระบบขนส่งมวลชนกับรถสองแถวหลายสายมีความทับซ้อนเส้นทางเกิดขึ้น

ดังนั้นการวิจัยนี้ จึงมีความสนใจที่จะศึกษาวิธีการจัดการเดินรถสองแถวให้มีประสิทธิภาพ สร้างความพึงพอใจให้กับผู้มารับบริการ ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์ (Simulation) หาจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยที่รออยู่บริเวณจุดจอดรถในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็น ภายใต้ทฤษฎีแถวคอย (Queuing Theory) เพื่อมาวิเคราะห์หาจำนวนรถให้บริการที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการเข้ามาใช้บริการของลูกค้า อีกทั้งการศึกษานี้จะมีส่วนร่วมในการสร้างแนวทางการจัดการเดินรถสองแถวที่สามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุงการจัดการเดินรถสองแถวในเขตเทศบาลเมืองนครราชสีมาได้ในอนาคต

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 รูปแบบการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ค่าทางสถิติช่วงเวลาการมาถึงของผู้ให้บริการและผู้รับบริการครั้งนี้ ได้ใช้รูปแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal distribution) ซึ่งมีฟังก์ชันการแจกแจง 2 แบบคือ ฟังก์ชันความหนาแน่น

ความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [5]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1)$$

$$F(x) = \phi[(x-\mu)/\sigma] \quad (2)$$

เมื่อ  $\phi(\cdot)$ ,  $\mu$  และ  $\sigma$  คือ ค่าฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามลำดับ

สำหรับการแจกแจงที่ใช้เพื่อพิจารณาการเข้ารูปสนธิของข้อมูลโดยการเปลี่ยนรูปฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม (CDF) หรือ  $F(x)$  ให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (3) และการแจกแจงแบบปกติสามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (4)

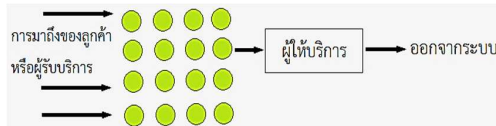
$$y = ax + b \quad (3)$$

$$\phi^{-1}(F(x)) = \frac{1}{\sigma}x - \frac{\mu}{\sigma} \quad (4)$$

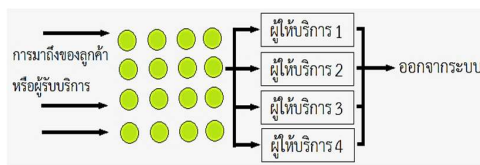
### 2.2 การจำลองสถานการณ์ (Simulation)

Shannon, Robert E. [6] ได้กล่าวว่า การจำลองสถานการณ์ คือ กระบวนการออกแบบจำลอง (Model) ของระบบงานจริง (Real system) แล้วดำเนินการทดลองใช้แบบจำลองนั้นเพื่อการเรียนรู้พฤติกรรมของระบบงานจริงภายใต้ข้อกำหนดที่วางไว้ เพื่อประเมินผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองก่อนนำไปใช้แก้ปัญหาในสถานการณ์จริงต่อไป สำหรับการจำลองแบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Event Simulation) จากทฤษฎีแถวคอย เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาจำนวนหน่วยให้บริการที่เหมาะสมที่สุด ตามโครงสร้างแถวคอยเป็นแบบ M/M/1 คือระบบหนึ่งช่องให้บริการและมีหลายแถวคอย และแบบ M/M/S คือระบบหลายช่องให้บริการและมีหลาย

แถวคอย ลักษณะการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ซึ่งเป็นระบบการให้บริการของรถโดยสารสาธารณะแบบมีผู้ให้บริการหนึ่งช่องทาง-ขั้นตอนเดียวและแบบมีผู้ให้บริการหลายช่องทาง-ขั้นตอนเดียว ที่สามารถเพิ่มหน่วยให้บริการตามอัตราการเข้ามาของผู้รับบริการได้



รูปที่ 1 โครงสร้างแบบ M/M/1



รูปที่ 2 โครงสร้างแบบ M/M/S

โดยปกติแล้วการมาของผู้มารับบริการเป็นสิ่งที่ไม่แน่นอนมีอัตราการเข้ามารับบริการเป็นแบบสุ่มและเป็นการยากที่จะบอกว่าผู้มารับบริการจะมาถึงเวลาใด และมีจำนวนเท่าใด การเข้ามาไม่ได้จำกัดจำนวนแถวหรือความยาวแถวคอย ดังนั้นการกล่าวถึงการมาของผู้มารับบริการจะเป็นแบบของการแจกแจงความน่าจะเป็นของจำนวนผู้รับบริการที่เข้ามาในช่วงเวลาหนึ่ง ในส่วนระยะเวลาในการให้บริการกับลูกค้าก็เป็นสิ่งที่ไม่แน่นอนมีอัตราการเข้ามารับบริการเป็นแบบสุ่มอีกเช่นกันเพราะโดยทั่วไปนั้นผู้ให้บริการรถสองแถวแต่ละสายมีช่วงระยะเวลาการมาถึงที่บริเวณจุดจอดรถไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามอาจกล่าวได้ในรูปแบบของการแจกแจงความน่าจะเป็นของช่วงระยะเวลาในการให้บริการในช่วงเวลาหนึ่ง

สำหรับจำนวนครั้ง (n) ในการจำลองแสดงในสมการด้านล่างคือ

$$n = \left( \frac{\sigma Z_{\alpha/2}}{E} \right)^2 \quad (5)$$

เมื่อ  $Z_{\alpha/2}$  คือขอบเขตบนที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha$   
E คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

### 2.3 การสร้างเลขสุ่ม (Random Number)

ในการจำลองสถานการณ์นั้นต้องสร้างตัวแปรสุ่ม (Random Variables) แทนการเข้ามาของผู้รับบริการและการให้บริการของหน่วยผู้ให้บริการ ตัวเลขแบบสุ่มที่ได้อาจได้มาจากตารางเลขสุ่ม (Random number table) หรือซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ [7] ซึ่งสามารถสร้างตัวเลขที่มีลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform)

### 2.4 ขอบเขตของการวิจัย

1) การเก็บข้อมูลตรงบริเวณจุดจอดรถสองแถว 2 จุดคือที่ถนนด้านหน้าวัดพายัพ มีจำนวนรถสองแถว 11 สาย ประกอบด้วยสาย 5, 7, 8, 11, 15, 20, 1307, 4140, 4234, 4287, 4416 และหน้าห้างสรรพสินค้าคลังพลาซ่าใหม่ (P2) มีจำนวนรถสองแถว 19 สายประกอบด้วยสาย 1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 1307, 4140, 4234, 4287, 4416 ซึ่งทั้งสองจุดนี้มีจำนวนรถสองแถวแต่ละสายมารวมกันเป็นจำนวนมากเนื่องจากเป็นจุดศูนย์กลางเมืองและการเดินทางจะมีลักษณะเป็นแบบเดินทางทางเดียว (One way) รอบอนุสาวรีย์ท้าวสุรนารี [8] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 จุดสำรวจข้อมูล

2) ศึกษาเฉพาะในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็น ซึ่งมีผู้มาใช้บริการเป็นจำนวนมากในแต่ละวันคือเวลา 7.00 น. ถึง 8.30 น. และเวลา 16.00 น. ถึง 18.00 น. ระยะเวลาหนึ่งสัปดาห์ตั้งแต่วันที่ 12-18 พฤศจิกายน 2563 เก็บข้อมูลในวันทำงานปกติและวันหยุดเสาร์

อาทิตย์ เพื่อให้ได้ข้อมูลครอบคลุมถึงความต้องการในการเดินทางด้วยรถสองแถวสาธารณะของประชาชนในเขตเทศบาลเมืองนครราชสีมา ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เพียงพอสำหรับนำข้อมูลมาวิเคราะห์เบื้องต้นของการให้บริการและผู้มารับบริการ สอดคล้องกับงานวิจัยของกฤษฎา นามฉิมพลี [9] ที่เก็บข้อมูลในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าโดยใช้ระยะเวลาหนึ่งสัปดาห์ และในช่วงที่ศึกษานี้มีการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 จังหวัดนครราชสีมายังไม่มีมาตรการล็อกดาวน์ แต่ให้ประชาชนสวมหน้ากากตลอดเวลาทำให้ผู้ใช้บริการแตกต่างไปจากก่อนหน้านี้ แต่ถึงอย่างไรก็ตามในชั่วโมงเร่งด่วนผู้คนยังมีความจำเป็นต้องเดินทางไปทำธุระด้วยรถโดยสารสาธารณะเช่นเดิม

3) การให้บริการเป็นแบบ FIFO (First In First Out) รถคันไหนมาก่อนได้รับการบริการก่อนคันไหนมาทีหลังได้รับการบริการทีหลัง รถจะวิ่งเข้ามาในระบบทีละหนึ่งคันของแต่ละสาย และจะต้องรับบริการในระบบจนเสร็จไม่สามารถออกจากระบบก่อนที่จะสิ้นสุดการบริการได้

4) ระบบกำหนดให้จำนวนผู้โดยสารบนรถสามารถนั่งได้ 10 คนพอดีกับความจุของรถสองแถวในแต่ละเที่ยวของการเดินรถ

5) ระบบจะสิ้นสุดเมื่อผู้มาใช้บริการได้ขึ้นไปบนรถหรือมีคนลงจากรถเรียบร้อยแล้ว

6) ระบบแถวคอยที่ศึกษาเป็นแบบมีผู้ให้บริการหนึ่งช่องทาง-ขั้นตอนเดียว (Single channel, Single phase system) และแบบมีผู้ให้บริการหลายช่องทาง-ขั้นตอนเดียว (Multiple channels, Single phase system)

## 2.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

### ขั้นตอนการดำเนินงานมีดังนี้

1) บันทึกจำนวนผู้มารับบริการ ช่วงเวลาผู้ให้บริการจำนวนคนบนรถ และจำนวนคนลงรถ เพื่อหาอัตราและรูปแบบการแจกแจงของทั้งสี่ตัวแปร สำหรับการแจกแจงที่ใช้เพื่อพิจารณาเข้ารูปสัณฐาน (Goodness of fit test) ของข้อมูลมีทั้งหมด 6 รูปแบบได้แก่ การแจกแจง Exponential, Weibull, Normal, Log Normal, Maximum Extreme Value และ Minimum Extreme Value โดยปรับให้อยู่ใน

รูปแบบสมการที่ (3) ตัวอย่างผลการทดสอบการแจกแจงของจำนวนคนบนรถสองแถวสาย 5 ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าหน้าวัดพายัพ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบจำนวนคนบนรถทั้ง 6 รูปแบบ

| การแจกแจง | A      | b       | ค่าสหสัมพันธ์ $R^2$ |
|-----------|--------|---------|---------------------|
| Expo.     | 0.399  | -2.484  | 0.861               |
| Wei.      | 4.603  | -10.338 | 0.961               |
| Nor.      | 0.446  | -3.949  | 0.966               |
| Log Nor.  | 0.933  | 0.142   | 0.959               |
| Max. Ex.  | -0.551 | 4.202   | 0.946               |
| Min. Ex.  | 0.539  | -5.213  | 0.908               |

เมื่อพิจารณาค่า  $R^2$  ของสมการเชิงเส้นจากการแจกแจงทั้ง 6 รูปแบบจากตารางที่ 1 พบว่าการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุดคือ 0.966 จึงใช้รูปแบบนี้ในการวิเคราะห์หาโอกาสของเวลาในการหาจำนวนคนบนรถในแต่ละวันได้ และผลการทดสอบการแจกแจงอื่นๆ เช่น จำนวนผู้มารับบริการ ช่วงเวลาผู้ให้บริการและจำนวนคนลงรถ ก็อธิบายได้ในลักษณะเดียวกันซึ่งพบว่าการแจกแจงแบบปกติมีความเหมาะสมมากที่สุด

2) จำลองการทำงานของระบบด้วยวิธีมอนติคาร์โล ทำการสร้างข้อมูลตัวเลขแบบสุ่มโดยใช้คำสั่ง rand() จากไมโครซอฟท์เอ็กเซลและค่าตัวแปรสุ่ม  $x$  ที่ได้จากการนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากสมการ (4) มาทำการอินเวอร์สเพื่อหาค่า  $x$  [10] ดังสมการที่ (6) การจำลองระบบกำหนดให้มีจำนวนหน่วยผู้ให้บริการตั้งแต่ 1 หน่วยไปจนถึงหน่วยให้บริการสูงสุดที่ศึกษาคือ 4 หน่วย

$$x = \sigma \phi^{-1}(F(x)) + \mu \quad (6)$$

2.1) การให้บริการหรือการปฏิบัติงานในหน่วยผู้ให้บริการถือว่าไม่มีข้อผิดพลาด ไม่มีการย้อนกลับไปทำงานใหม่ ผู้ที่เข้ามาในระบบต้องได้รับการบริการทุกคน

2.2) เวลาเริ่มต้นของระบบที่ 7.00 น. ทำการปล่อยรถสองแถวคันแรกเข้าสู่ระบบและกำหนดให้ยังไม่มี

ผู้รับบริการอยู่ในระบบ ซึ่งจะใช้ตัวเลขสุ่มแทนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ เพื่อหาคำตอบของเวลาที่รถมาถึง จำนวนคนบนรถ จำนวนคนที่ขึ้นรถ และจำนวนคนลงรถในแต่ละช่วงเวลา

2.3) ผู้มารับบริการสามารถขึ้นไปบนรถได้ ถ้าบนรถสองแถวมีที่นั่งว่างแต่ต้องขึ้นได้ไม่เกินความจุของรถ (ความจุมาตรฐานของรถนั่งได้ 10 คนไม่มีการยืนบนรถ) และถ้ามีผู้โดยสารมากับรถเต็มพอดีหรือมากกว่าความจุรถ ผู้มารับบริการไม่สามารถขึ้นไปบนรถ แต่ถ้ามีจำนวนคนลงที่ป้ายนี้แล้วทำให้มีที่นั่งว่าง ผู้มารับบริการสามารถขึ้นไปบนรถได้

2.4) ผู้มารับบริการต้องคอยรถคันถัดไปเมื่อมีจำนวนผู้โดยสารมากับรถเต็มพอดีหรือมากกว่าความจุรถ ถึงแม้จะมีคนลงป้ายนี้แต่ยังไม่มีผู้โดยสารบนรถมากกว่าหรือเท่ากับความจุของรถอยู่จึงไม่สามารถขึ้นไปบนรถได้ ซึ่งการทำงานของระบบแสดงตามรูปที่ 4 และรูปที่ 5

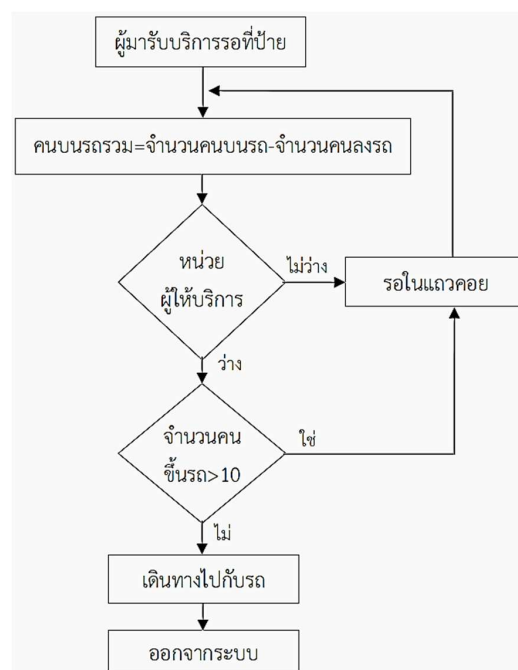
3) จำลองแบบที่สร้างขึ้นอย่างเป็นอิสระกัน กำหนดจำนวนรอบของการประมวลผล (number of replication) ด้วยสมการที่ (5) สำหรับการแจกแจงแบบปกติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.05 หรือประมาณ 0.443 ดังนั้นจะได้จำนวนครั้งของการจำลองสถานการณ์ (n) เท่ากับ 98.53 หรือประมาณ 100 ครั้ง ในแต่ละครั้งคำนวณค่าสถิติที่ใช้วัดประสิทธิภาพของระบบที่ได้คือ จำนวนผู้มารับบริการของรถสองแถวเฉลี่ยในแถวคอยที่ป้าย ที่รอรับบริการอยู่ในหน่วยบริการที่ 1, 2, 3 และ 4 ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้าและเย็นโดยแสดงแบบจำลองดังรูปที่ 6 ถ้าให้ค่าเฉลี่ยของค่าวัดประสิทธิภาพของระบบแทนด้วย  $\mu$  ดังนั้นหากจำลองระบบอย่างเป็นอิสระกัน 100 ครั้ง โดยใช้ขนาดตัวอย่าง 100 รายการ จะได้  $\bar{X}$  เป็นข้อมูลหรือผลจากการจำลองระบบ สามารถหาช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval)  $(1-\alpha)100\%$  ของค่า  $\mu$  [11] ได้จากสมการ (7)

$$\bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

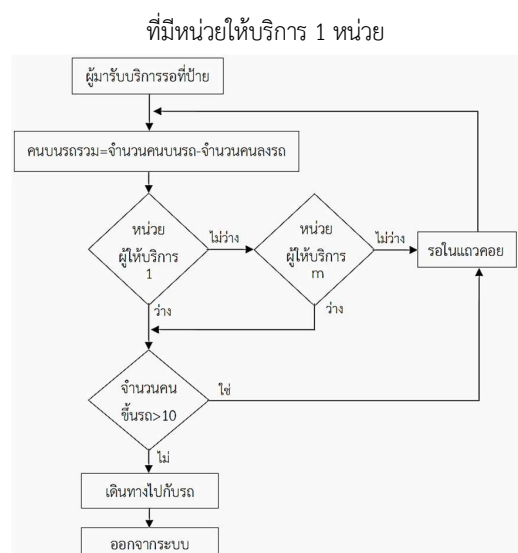
เมื่อ  $\bar{X}$  แทนค่าเฉลี่ย

$S$  เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ประมาณจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร

$Z_{\alpha/2}$  เป็นค่าของตัวแปรสุ่มแบบปกติมาตรฐานที่มีพื้นที่ทางด้านขวาเป็น  $\alpha/2$



รูปที่ 4 แผนผังการจำลองระบบการทำงาน



รูปที่ 5 แผนผังการจำลองระบบการทำงาน

ที่มีหน่วยให้บริการมากกว่า 1 หน่วย

4) ประเมินประสิทธิภาพของระบบจากค่าสถิติและการประมาณค่าแบบช่วงที่ได้ พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจากการทดสอบด้วย ANOVA

| เวลาที่ยอมรับ | เวลาเฉลี่ย | เวลาที่ให้บริการ | จำนวนคนบนรถ | จำนวนคนที่ขึ้นรถ | จำนวนที่ลงจากรถ | รวมคนบนรถ | ที่นั่งว่าง | คน-ความจุ | จำนวนคนโดยสาร |
|---------------|------------|------------------|-------------|------------------|-----------------|-----------|-------------|-----------|---------------|
| 07:00:00      | 10.69      | 00:10:41         |             |                  |                 |           |             |           |               |
| 1 07:10:41    | 9.49       | 00:09:29         | 7.32        | 2.90             | 1.25            | 8.97      | 1.03        | 0.00      | 0.00          |
| 2 07:20:11    | 11.03      | 00:11:02         | 9.76        | 2.07             | 0.00            | 10.00     | 0.00        | 1.83      | 1.83          |
| 3 07:31:13    | 12.17      | 00:12:10         | 13.95       | 2.90             | 0.62            | 13.33     | 0.00        | 2.90      | 4.73          |
| 4 07:43:23    | 10.39      | 00:10:23         | 7.36        | 0.56             | 2.02            | 5.90      | 4.10        | 0.00      | 0.63          |
| 5 07:53:46    | 16.43      | 00:16:26         | 9.88        | 0.00             | 2.20            | 7.68      | 2.32        | 0.00      | 0.00          |
| 6 08:10:12    | 12.14      | 00:12:08         | 9.25        | 1.16             | 1.00            | 9.41      | 0.59        | 0.00      | 0.00          |
| 7 08:22:20    | 11.57      | 00:11:34         | 8.19        | 2.21             | 2.93            | 7.47      | 2.53        | 0.00      | 0.00          |
| 8 08:33:55    | 10.17      | 00:10:10         | 10.00       | 0.54             | 0.28            | 10.00     | 0.00        | 0.26      | 0.26          |
| 9 08:44:05    | 8.67       | 00:08:40         | 8.66        | 2.04             | 1.75            | 8.95      | 1.05        | 0.00      | 0.00          |
| 10 08:52:45   | 8.83       | 00:08:50         | 7.38        | 2.20             | 2.73            | 6.85      | 3.15        | 0.00      | 0.00          |

รูปที่ 6 แบบจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์  
การให้บริการของรถสองแถว

### 2.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เมื่อสร้างแบบจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Verification) โดยทำการทดสอบการทำงานการให้บริการและผู้เข้ามาใช้บริการ ว่ามีลักษณะการทำงานเหมือนระบบการทำงานจริงหรือไม่ เช่น รถสองแถวเข้ามาให้บริการได้ทีละคันและรับคนได้ไม่เกินความจุของรถ ผู้มารับบริการต้องรอคอยคันถัดไปเมื่อไม่มีที่นั่งว่างบนรถซึ่งเป็นไปตามระบบงานจริง ดังในรูปที่ 4 และ 5 แสดงว่าแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองการให้บริการรถสองแถวมีความถูกต้อง

### 2.5.2 การตรวจสอบความเหมือนจริงของแบบจำลอง

ทำการตรวจสอบความเหมือนจริงของแบบจำลอง (Validation) เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถเป็นตัวแทนของระบบการทำงานจริงได้หรือไม่ ถ้าผลที่ได้จากการรันแบบจำลองกับผลที่ได้จากระบบงานจริงมีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติจึงถือว่าการจำลองมีความถูกต้อง สามารถใช้วิเคราะห์ระบบงานจริงได้ ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการทดสอบการรันแบบจำลองของช่วงเวลารถให้บริการ จำนวนคนบนรถ จำนวนคนขึ้นรถ และจำนวนคนลงรถ ของรถสองแถวสาย 5 ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าหน้าวัดพายุพ จำนวน 100 รอบและใช้การทดสอบแบบที โดยการตั้งสมมติฐาน  $H_0: m_1 = m_2$

และ  $H_1: m_1 \neq m_2$  ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความเหมือนจริงแบบจำลอง

| ค่าที่ต้องการทดสอบ                        | t    | df | Sig. (2-tailed) |
|-------------------------------------------|------|----|-----------------|
| ช่วงเวลารถให้บริการ<br>Test Value = 10.40 | .135 | 99 | .893            |
| คนบนรถ<br>Test Value = 7.69               | .430 | 99 | .668            |
| คนขึ้นรถ<br>Test Value = 1.72             | 1.09 | 99 | .277            |
| คนลงรถ<br>Test Value = 1.23               | 1.   | 99 | .272            |

ผลการทดสอบปรากฏว่า Sig. มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ .05 ของทุกช่วงเวลา แสดงว่าผลที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลที่ได้จากระบบงานจริงมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถทดแทนระบบงานจริงได้

## 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

### 3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการเดินทางรถสองแถว

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการให้บริการและผู้มารับบริการของรถสองแถว โดยพิจารณาจากสี่ตัวแปรคือ ช่วงเวลาที่รถมาเฉลี่ย (Arrival Time: AT) คนบนรถเฉลี่ย (On Minibus: OM) คนขึ้นรถเฉลี่ย (Get On: GO) และคนลงรถเฉลี่ย (Get Off: GOF) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ของแต่ละตัวแปร มีดังนี้

#### 1) บริเวณจุดจอดรถหน้าวัดพายุพ

จากตารางที่ 3 ภาพรวมเวลาการให้บริการของรถสองแถวในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้าพบว่า มีช่วงเวลากการให้บริการของรถไม่เท่ากัน โดยที่รถสาย 7 มีความถี่การให้บริการเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=7.95$ , S.D=1.41) ลำดับรองลงมาคือรถสาย 8 ( $\bar{X}=9.14$ , S.D=2.56) ส่วนรถที่วิ่งให้บริการมีความถี่น้อยสุดคือรถสาย 4416 ( $\bar{X}=$



14.02, S.D=2.06) เนื่องจากการเดินทางจากต่าง  
อำเภอในเขตรอบนอกและมีจำนวนรถไม่มาก ภาพรวม  
ของคนบนรถที่มากับรถสองแถวพบว่า รถสาย 7 มีจำนวน  
คนบนรถโดยเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=8.95$ , S.D=2.21)  
รองลงมาคือรถสาย 8 ( $\bar{X}=8.69$ , S.D=2.79) ส่วนรถที่มี  
จำนวนคนบนรถน้อยสุดคือรถสาย 20 ( $\bar{X}=6.09$ ,  
S.D=2.01) ภาพรวมของคนขึ้นรถสองแถวพบว่า มีจำนวน  
คนที่แตกต่างกัน โดยที่รถสาย 1307 มีจำนวนคนขึ้นรถ

โดยเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=1.77$ , S.D=1.56) รองลงมาคือรถ  
สาย 8 ( $\bar{X}=1.74$ , S.D=1.82) ส่วนรถสองแถวที่มีจำนวน  
คนขึ้นน้อยสุดคือ รถสาย 20 ( $\bar{X}=1.15$ , S.D=1.35) และ  
ภาพรวมของคนลงรถสองแถว พบว่ามีจำนวนคนที่  
แตกต่างกันโดยที่รถสาย 7 มีจำนวนคนลงรถโดยเฉลี่ยมาก  
สุด ( $\bar{X}=1.40$ , S.D=1.30) รองลงมาคือรถสาย 11 ( $\bar{X}=1.26$ , S.D=1.16) ส่วนรถสองแถวที่มีจำนวนคนลงรถน้อย  
สุดคือ รถสาย 4234 ( $\bar{X}=0.84$ , S.D=0.96)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการให้บริการและผู้มารับบริการหน้าวัดพ่ายพ

| รถ<br>สาย | ช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า |       |      |       |      |       |      |        | ช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น |       |      |       |      |       |      |        |
|-----------|-----------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-----------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|
|           | AT                          | SD_AT | OM   | SD_OM | GO   | SD_GO | GOF  | SD_GOF | AT                          | SD_AT | OM   | SD_OM | GO   | SD_GO | GOF  | SD_GOF |
| 5         | 10.40                       | 2.85  | 7.69 | 1.97  | 1.72 | 1.56  | 1.23 | 1.21   | 11.25                       | 3.31  | 8.37 | 2.06  | 1.40 | 1.04  | 1.14 | 1.05   |
| 7         | 7.95                        | 1.41  | 8.95 | 2.21  | 1.52 | 1.59  | 1.40 | 1.30   | 9.52                        | 2.26  | 9.59 | 2.11  | 1.51 | 1.58  | 1.24 | 1.28   |
| 8         | 9.14                        | 2.56  | 7.77 | 2.79  | 1.74 | 1.82  | 1.03 | 1.08   | 10.55                       | 3.06  | 8.72 | 2.45  | 1.64 | 1.82  | 1.78 | 1.43   |
| 11        | 9.76                        | 3.12  | 6.84 | 1.92  | 1.47 | 1.48  | 1.26 | 1.16   | 10.79                       | 2.91  | 7.85 | 1.82  | 1.41 | 1.36  | 1.53 | 1.35   |
| 15        | 11.92                       | 2.52  | 6.90 | 2.02  | 1.50 | 1.47  | 1.12 | 1.02   | 12.53                       | 2.38  | 7.34 | 2.18  | 1.45 | 1.50  | 1.25 | 1.25   |
| 20        | 11.72                       | 2.37  | 6.09 | 2.01  | 1.15 | 1.35  | 0.94 | 0.84   | 12.94                       | 2.42  | 7.15 | 1.96  | 1.13 | 1.21  | 1.16 | 1.09   |
| 1307      | 13.04                       | 2.01  | 6.53 | 2.05  | 1.77 | 1.56  | 1.19 | 1.19   | 13.62                       | 2.24  | 6.48 | 2.47  | 1.18 | 1.25  | 1.08 | 1.36   |
| 4140      | 12.40                       | 2.46  | 6.29 | 2.01  | 1.46 | 1.57  | 0.96 | 0.94   | 12.78                       | 2.21  | 7.46 | 1.95  | 2.06 | 1.78  | 1.40 | 1.31   |
| 4234      | 12.18                       | 2.18  | 6.62 | 1.83  | 1.36 | 1.43  | 0.84 | 0.96   | 12.94                       | 2.15  | 6.66 | 2.28  | 1.16 | 1.40  | 0.74 | 1.05   |
| 4287      | 12.45                       | 2.52  | 7.12 | 1.80  | 1.53 | 1.43  | 1.00 | 1.02   | 13.03                       | 2.43  | 7.16 | 2.11  | 1.74 | 1.68  | 1.10 | 1.26   |
| 4416      | 14.02                       | 2.06  | 5.86 | 1.82  | 1.56 | 1.47  | 1.05 | 1.19   | 14.98                       | 1.90  | 6.70 | 1.73  | 1.56 | 1.66  | 0.83 | 0.88   |

จากตารางที่ 3 ภาพรวมเวลาการให้บริการของรถ  
สองแถวในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็นพบว่า รถสาย 7 มี  
ความถี่ในการให้บริการโดยเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=9.52$ ,  
S.D=2.26) ลำดับรองลงมาคือ รถสาย 8 ( $\bar{X}=10.55$ ,  
S.D=3.06) และรถที่มีความถี่น้อยสุดคือ รถสาย 4416 ( $\bar{X}=14.98$ , S.D=1.90) ภาพรวมของคนบนรถที่มากับรถ  
สองแถวพบว่า รถสาย 7 มีจำนวนคนบนรถโดยเฉลี่ยมาก  
สุด ( $\bar{X}=9.59$ , S.D=2.11) ลำดับรองลงมาคือรถสาย 8 ( $\bar{X}=8.82$ , S.D=2.45) ส่วนรถสองแถวที่มีจำนวนคนบนรถ  
น้อยสุดคือสาย 1307 ( $\bar{X}=6.48$ , S.D=2.47) ภาพรวม  
ของคนขึ้นรถสองแถวพบว่า รถสาย 4140 มีจำนวนคนขึ้น

รถโดยเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=2.06$ , S.D=1.78) รองลงมาคือ  
รถสาย 4287 ( $\bar{X}=1.74$ , S.D=1.68) ส่วนรถที่มีจำนวน  
คนขึ้นน้อยสุดคือรถสาย 20 ( $\bar{X}=1.13$ , S.D=1.21) และ  
ภาพรวมของคนลงรถสองแถวพบว่า รถสาย 8 มีจำนวน  
คนลงรถเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=1.78$ , S.D=1.43) รองลงมาคือ  
รถสาย 11 ( $\bar{X}=1.53$ , S.D=1.35) ส่วนรถที่มีจำนวนคน  
ลงรถน้อยสุดคือรถสาย 4234 ( $\bar{X}=0.74$ , S.D=1.05)

## 2) บริเวณจุดจอดรถหน้าห้างคลังพลาซ่าใหม่

จากตารางที่ 4 ภาพรวมเวลาการให้บริการของรถ  
สองแถวในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าพบว่า รถสาย 1 มีความถี่

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการให้บริการและผู้มารับบริการหน้าห้างคลังพลาซ่าใหม่

| รถ<br>สาย | ช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า |       |      |       |      |       |      |        | ช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น |       |      |       |      |       |      |        |
|-----------|-----------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-----------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|
|           | AT                          | SD_AT | OM   | SD_OM | GO   | SD_GO | GOF  | SD_GOF | AT                          | SD_AT | OM   | SD_OM | GO   | SD_GO | GOF  | SD_GOF |
| 1         | 8.79                        | 1.84  | 8.64 | 2.10  | 1.39 | 0.89  | 0.86 | 0.84   | 9.70                        | 2.13  | 7.44 | 2.11  | 1.55 | 1.28  | 1.02 | 1.01   |
| 2         | 9.89                        | 2.48  | 8.53 | 1.79  | 1.63 | 1.63  | 0.95 | 0.91   | 10.18                       | 3.20  | 8.35 | 2.01  | 1.61 | 1.65  | 1.11 | 1.33   |
| 4         | 10.24                       | 2.57  | 9.17 | 1.68  | 1.43 | 1.60  | 1.21 | 1.36   | 10.60                       | 2.98  | 9.00 | 1.90  | 1.39 | 1.51  | 1.11 | 1.17   |
| 5         | 10.54                       | 3.83  | 7.41 | 2.06  | 1.43 | 1.36  | 0.98 | 1.15   | 11.91                       | 3.81  | 8.27 | 1.75  | 1.63 | 1.55  | 1.00 | 0.95   |
| 6         | 11.28                       | 4.11  | 8.13 | 1.51  | 1.65 | 1.56  | 1.02 | 1.11   | 12.44                       | 4.28  | 8.14 | 1.62  | 1.73 | 1.88  | 1.11 | 1.45   |
| 7         | 9.00                        | 2.53  | 8.93 | 1.73  | 1.51 | 1.73  | 1.24 | 1.30   | 9.13                        | 2.88  | 9.12 | 1.98  | 1.70 | 1.71  | 1.36 | 1.37   |
| 10        | 10.05                       | 2.20  | 8.30 | 2.13  | 1.32 | 1.42  | 1.23 | 1.20   | 10.72                       | 2.81  | 8.71 | 2.13  | 1.27 | 1.44  | 1.15 | 1.16   |
| 11        | 9.74                        | 2.67  | 8.52 | 1.61  | 1.26 | 1.39  | 1.05 | 1.15   | 9.98                        | 2.74  | 8.76 | 1.97  | 1.28 | 1.46  | 1.23 | 1.15   |
| 12        | 10.30                       | 2.76  | 8.30 | 1.68  | 1.33 | 1.31  | 0.95 | 1.25   | 11.58                       | 3.23  | 8.11 | 1.82  | 1.30 | 1.48  | 1.04 | 1.18   |
| 13        | 11.32                       | 2.99  | 7.11 | 2.09  | 1.40 | 1.50  | 0.96 | 0.98   | 11.56                       | 3.15  | 8.09 | 2.03  | 1.50 | 1.69  | 1.24 | 1.29   |
| 14        | 12.10                       | 2.59  | 8.17 | 1.69  | 1.38 | 1.52  | 0.88 | 0.87   | 13.26                       | 3.26  | 8.34 | 1.82  | 1.48 | 1.71  | 1.08 | 1.28   |
| 15        | 11.63                       | 3.35  | 8.49 | 2.32  | 1.59 | 1.58  | 1.10 | 1.07   | 12.61                       | 3.53  | 8.64 | 2.68  | 1.33 | 1.46  | 1.22 | 1.23   |
| 18        | 11.86                       | 2.94  | 8.84 | 2.34  | 1.48 | 1.40  | 1.12 | 1.08   | 12.41                       | 3.06  | 7.86 | 2.48  | 1.31 | 1.37  | 1.03 | 1.07   |
| 20        | 10.52                       | 2.41  | 8.68 | 1.99  | 1.55 | 1.32  | 1.07 | 1.09   | 12.00                       | 2.66  | 8.39 | 2.58  | 1.47 | 1.42  | 1.14 | 1.20   |
| 1307      | 11.57                       | 2.33  | 8.51 | 2.20  | 1.16 | 1.12  | 1.00 | 1.02   | 12.32                       | 2.89  | 8.42 | 2.49  | 1.25 | 1.35  | 1.08 | 1.29   |
| 4140      | 12.93                       | 3.01  | 8.39 | 1.86  | 1.37 | 1.48  | 1.17 | 1.18   | 12.85                       | 2.52  | 7.82 | 2.36  | 1.27 | 1.53  | 1.13 | 1.64   |
| 4234      | 12.67                       | 2.39  | 7.81 | 2.07  | 1.48 | 1.74  | 1.13 | 1.44   | 13.21                       | 2.97  | 8.41 | 2.51  | 1.16 | 1.32  | 1.07 | 1.36   |
| 4287      | 12.12                       | 2.27  | 7.78 | 2.28  | 1.34 | 1.64  | 1.14 | 1.34   | 12.86                       | 2.55  | 8.41 | 2.11  | 1.44 | 1.37  | 1.11 | 1.23   |
| 4416      | 11.17                       | 2.60  | 7.98 | 2.66  | 1.43 | 1.68  | 1.21 | 1.67   | 11.80                       | 3.01  | 8.23 | 2.64  | 1.38 | 1.49  | 1.32 | 1.32   |

การให้บริการเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=8.79$ ,  $S.D=1.84$ ) ลำดับรองลงมาคือรถสาย 7 ( $\bar{X}=9.00$ ,  $S.D=2.53$ ) และรถที่มีความถี่น้อยสุดคือ รถสาย 4140 ( $\bar{X}=12.93$ ,  $S.D=3.01$ ) ภาพรวมของคนบนรถที่มากับรถสองแถวพบว่า รถสาย 7 มีจำนวนคนบนรถโดยเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=9.33$ ,  $S.D=1.73$ ) รองลงมาคือรถสาย 4 ( $\bar{X}=9.27$ ,  $S.D=1.68$ ) ส่วนรถสองแถวที่มีจำนวนคนบนรถน้อยสุดคือสาย 4234 ( $\bar{X}=7.81$ ,  $S.D=2.07$ ) ภาพรวมของคนขึ้นรถสองแถวพบว่า สาย 6 มีจำนวนคนขึ้นรถโดยเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=1.65$ ,  $S.D=1.56$ ) รองลงมาคือรถสาย 2 ( $\bar{X}=1.63$ ,  $S.D=1.60$ ) ส่วนรถสองแถวที่มีจำนวนคนขึ้นน้อยสุดคือรถสาย 1307 ( $\bar{X}=1.16$ ,  $S.D=1.12$ ) และภาพรวมของคนลงรถสองแถวพบว่า รถสาย 7 มีจำนวนคนลงรถโดยเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=1.24$ ,  $S.D=1.30$ ) ลำดับรองลงมาคือรถสาย 10 ( $\bar{X}=1.23$ ,

$S.D=1.20$ ) ส่วนรถที่มีจำนวนคนลงรถน้อยสุดคือ สาย 1 ( $\bar{X}=0.86$ ,  $S.D=0.84$ )

จากตารางที่ 4 ภาพรวมเวลาการให้บริการของรถสองแถวในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นพบว่า รถสาย 7 มีความถี่การให้บริการเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=9.13$ ,  $S.D=2.88$ ) รองลงมาคือรถสาย 1 ( $\bar{X}=9.70$ ,  $S.D=2.13$ ) และรถที่มีความถี่น้อยสุดคือ รถสาย 14 ( $\bar{X}=13.26$ ,  $S.D=3.26$ ) ภาพรวมของคนบนรถที่มากับรถสองแถวพบว่า รถสาย 7 มีจำนวนคนบนรถเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=9.42$ ,  $S.D=1.98$ ) รองลงมาคือรถสาย 4 ( $\bar{X}=9.00$ ,  $S.D=1.90$ ) และรถที่มีจำนวนคนบนรถน้อยสุดคือ สาย 1 ( $\bar{X}=7.44$ ,  $S.D=2.11$ ) ภาพรวมของคนขึ้นรถสองแถวพบว่า รถสาย 6 มีจำนวนคนขึ้นรถโดยเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=1.73$ ,  $S.D=1.88$ ) รองลงมาคือรถสาย 7 ( $\bar{X}=1.70$ ,  $S.D=1.71$ ) ส่วนรถที่มีจำนวนคนขึ้น

น้อยสุดคือสาย 4234 ( $\bar{X}=1.16$ ,  $S.D=1.32$ ) และภาพรวมของคนลงรถสองแถวพบว่า รถมาย 7 มีจำนวนคนลงรถโดยเฉลี่ยมากที่สุด ( $\bar{X}=1.36$ ,  $S.D=1.37$ ) รองลงมาคือ รถมาย 4416 ( $\bar{X}=1.32$ ,  $S.D=1.32$ ) และรถที่มีจำนวนคนลงน้อยสุดคือ สาย 5 ( $\bar{X}=1.00$ ,  $S.D=0.95$ )

### 3.2 ผลการจำลองสถานการณ์

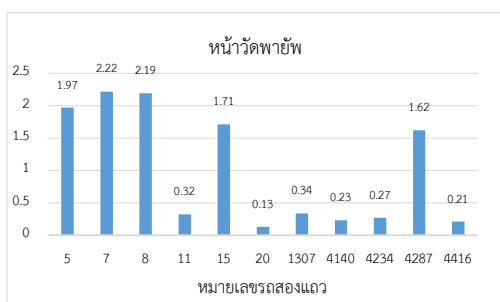
#### 3.2.1 วิเคราะห์ผลการจำลองสถานการณ์

วิเคราะห์ผลจากการจำลองสถานการณ์การให้บริการและผู้มารับบริการรถสองแถวในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนจากทฤษฎีแถวคอยเพื่อหาจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยที่รออยู่บริเวณจุดจอดรถหรือป้าย ซึ่งมีผลของการดำเนินดังนี้

##### 1) หน้าวัดพายัพ

##### 1.1) ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า

จากผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า ณ บริเวณจุดจอดรถโดยสารสาธารณะของรถสองแถวหน้าวัดพายัพ โดยแสดงข้อมูลจุดวิกฤตจำนวนผู้มาใช้บริการรถสองแถวเฉลี่ยที่คอยอยู่บริเวณจุดจอดรถในแต่ละสาย ดังแสดงในกราฟรูปที่ 7 พบว่า มีจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยที่รออยู่ที่บริเวณจุดจอดรถไม่เท่ากัน โดยที่ รถมาย 7 มีจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยมากที่สุดคือ 2.22 คน รองลงมาคือ รถมาย 8 มีจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ย 2.19 คน และจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยน้อยสุดคือ รถมาย 20 เท่ากับ 0.13 คน

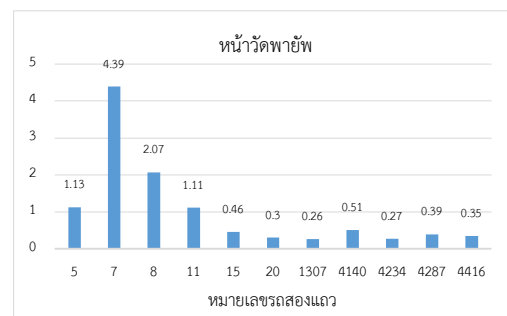


รูปที่ 7 จุดวิกฤตจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในแต่ละสาย

##### 1.2) ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น

จากผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น ดังแสดงในกราฟรูปที่ 8 พบว่า รถมาย 7 มี

จำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยมากที่สุดคือ 4.39 คน รองลงมาคือ รถมาย 8 มีจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ย 2.07 คน และจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยน้อยสุดคือ รถมาย 1307 เท่ากับ 0.26 คน

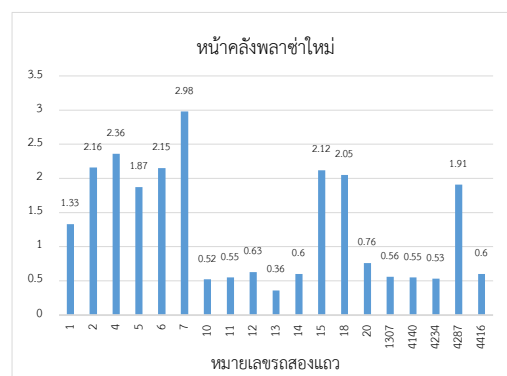


รูปที่ 8 จุดวิกฤตจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในแต่ละสาย

##### 2) หน้าคลังปลาซาใหม่

##### 2.1) ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า

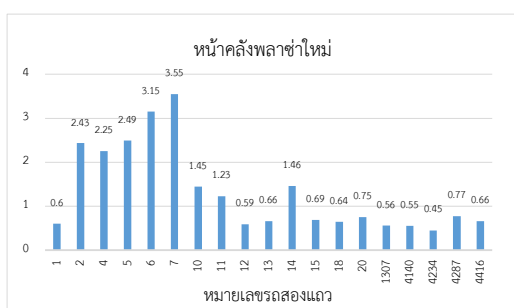
จากผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า ณ บริเวณจุดจอดรถหน้าคลังปลาซาใหม่ โดยแสดงข้อมูลจุดวิกฤตจำนวนผู้มาใช้บริการรถสองแถวเฉลี่ยที่คอยอยู่บริเวณจุดจอดรถในแต่ละสาย ดังแสดงในกราฟรูปที่ 9 พบว่า มีจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยที่รออยู่ที่บริเวณจุดจอดรถไม่เท่ากัน โดยที่ รถมาย 7 มีจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยมากที่สุดคือ 2.98 คน รองลงมาคือ รถมาย 4 มีจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ย 2.36 คน และจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยน้อยสุดคือ รถมาย 13 เท่ากับ 0.36 คน



รูปที่ 9 จุดวิกฤตจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในแต่ละสาย

## 2.2) ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น

จากผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น โดยแสดงข้อมูลจุดวิกฤตจำนวนผู้มาใช้บริการรถสองแถวเฉลี่ยที่คอยอยู่บริเวณจุดจอดรถของแต่ละสาย ดังแสดงในกราฟรูปที่ 10 พบว่ารถสาย 7 มีจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยมากที่สุดคือ 3.55 คน รองลงมาคือรถสาย 6 มีจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ย 3.15 คน และจำนวนคนมาคอยสะสมเฉลี่ยน้อยสุดคือ สาย 4234 เท่ากับ 0.45 คน



รูปที่ 10 จุดวิกฤตจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในแต่ละสาย

### 3.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบและผลการจำลองแบบ

การจำลองระบบเริ่มจากระบบที่ 1 ให้มีหน่วยผู้ให้บริการเป็น 1 หน่วยจากระบบเดิมที่มีอยู่และระบบต่อมาจะเพิ่มหน่วยให้บริการขึ้นอีกทีละหน่วย จนกระทั่งครบตามจำนวนหน่วยที่ให้บริการทั้งหมด ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแต่ละคู่ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยตั้งสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และสมมติฐานรอง ( $H_1$ ) ดังนี้

$H_0: m_1 = m_2 = m_3 = m_4$  (จำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ย)

$H_1$ : มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน

ซึ่งผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) หน้าวัดพายุ

##### 1.1) ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า

เมื่อวัดประสิทธิภาพของทุกระบบจากจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ย โดยการเปรียบเทียบทีละคู่ดังตารางที่ 5 พร้อมทั้งหาช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากสมการที่ (7) พบว่า รถสาย 11, 20, 1307, 4140, 4234 และ 4416 ค่า

P มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้าแต่ละคู่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และรถสาย 5, 7, 8, 15 และ 4287 ค่า P มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรองแสดงว่าจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า แต่ละคู่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

##### 1.2) ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น

เมื่อวัดประสิทธิภาพของทุกระบบจากจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ย โดยการเปรียบเทียบทีละคู่ดังตารางที่ 5 พร้อมทั้งหาช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า รถสาย 15, 20, 1307, 4140, 4234, 4287 และ 4416 ค่า P มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น แต่ละคู่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และรถสาย 5, 7, 8 และ 11 ค่า P มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรองแสดงว่าจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น แต่ละคู่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 2) หน้าคลังพลาซ่าใหม่

##### 2.1) ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า

เมื่อวัดประสิทธิภาพของทุกระบบจากจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ย โดยการเปรียบเทียบทีละคู่ดังตารางที่ 6 พร้อมทั้งหาช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า รถสาย 10, 11, 12, 13, 14, 20, 1307, 4140, 4234 และ 4416 ค่า P มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้าแต่ละคู่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และรถสาย 1, 2, 4, 5, 6, 7, 15, 18 และ 4287 ค่า P มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรองแสดงว่าจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้าแต่ละคู่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

##### 2.2) ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น

เมื่อวัดประสิทธิภาพของทุกระบบจากจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ย โดยการเปรียบเทียบทีละคู่ดังตารางที่ 6

พร้อมทั้งหาช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า รถสาย 1, 12, 13, 15, 18, 20, 1307, 4140, 4234, 4287 และ 4416 ค่า P มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น แต่ละคู่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจากจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยหน้าวัดพายัพ

| หน่วยผู้<br>ให้บริการ | ช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า           |                                       |        |        | ช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น |                                       |                                       |        |        |        |
|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|--------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|
|                       | ช่วงความ<br>เชื่อมั่นของ<br>ค่าเฉลี่ย | เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย<br>(ค่า P-value) |        |        |                             | ช่วงความ<br>เชื่อมั่นของ<br>ค่าเฉลี่ย | เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย<br>(ค่า P-value) |        |        |        |
|                       |                                       | 1                                     | 2      | 3      | 4                           |                                       | 1                                     | 2      | 3      | 4      |
| 5                     | 1.450-2.490                           |                                       | 0.040* | 0.030* | 0.010*                      | 0.745-1.519                           |                                       | 0.043* | 0.019* | 0.005* |
| 7                     | 1.671-2.771                           |                                       | 0.081  | 0.011* | 0.004*                      | 3.529-5.258                           |                                       | 0.069  | 0.029* | 0.010* |
| 8                     | 1.532-2.843                           |                                       | 0.039* | 0.035* | 0.023*                      | 1.536-2.611                           |                                       | 0.040* | 0.006* | 0.003* |
| 11                    | 0.143-0.495                           |                                       | 0.327  | 0.171  | 0.106                       | 0.711-1.502                           |                                       | 0.017* | 0.011* | 0.001* |
| 15                    | 1.212-2.218                           |                                       | 0.043* | 0.015* | 0.008*                      | 0.238-0.686                           |                                       | 0.571  | 0.237  | 0.176  |
| 20                    | 0.046-0.221                           |                                       | 0.717  | 0.483  | 0.334                       | 0.124-0.478                           |                                       | 0.611  | 0.467  | 0.189  |
| 1307                  | 0.152-0.533                           |                                       | 0.162  | 0.103  | 0.062                       | 0.109-0.404                           |                                       | 0.898  | 0.400  | 0.127  |
| 4140                  | 0.055-0.396                           |                                       | 0.854  | 0.746  | 0.491                       | 0.274-0.738                           |                                       | 0.842  | 0.641  | 0.513  |
| 4234                  | 0.130-0.410                           |                                       | 0.856  | 0.506  | 0.403                       | 0.131-0.416                           |                                       | 0.505  | 0.336  | 0.222  |
| 4287                  | 1.150-2.099                           |                                       | 0.028* | 0.013* | 0.004*                      | 0.150-0.622                           |                                       | 0.839  | 0.726  | 0.445  |
| 4416                  | 0.068-0.344                           |                                       | 0.730  | 0.719  | 0.542                       | 0.148-0.555                           |                                       | 0.714  | 0.394  | 0.215  |

\*มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

#### 4. บทสรุป

จากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่ได้นั้นนำมาใช้เป็นแนวทางการบริหารจัดการจำนวนรถสองแถวสายต่างๆ ที่เหมาะสม และสามารถช่วยลดระยะเวลาในการรอคอยรถในชั่วโมงเร่งด่วน โดยคำนึงถึงต้นทุนแปรผันในการเดินแต่ละครั้ง ซึ่งมีผลการดำเนินการดังนี้

##### 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการให้บริการ

จากผลการเปรียบเทียบจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยที่รออยู่บริเวณจุดจอดรถหน้าวัดพายัพของระบบการทำงาน

จริงกับผลที่ได้จากแบบจำลอง ในชั่วโมงเร่งด่วนเช้าพบว่า ผลจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยโดยรวมของแบบจำลองลดลงจากระบบการทำงานจริงถึงร้อยละ 18.38 และใช้จำนวนรถเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงร้อยละ 2.19 และในชั่วโมงเร่งด่วนเย็นพบว่า ผลจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยโดยรวมของแบบจำลองลดลงจากระบบการทำงานจริงถึงร้อยละ 29.89 และใช้จำนวนรถเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงร้อยละ 2.75

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจากจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยหน้าคลังปลาชำใหม่

| หน่วยผู้ให้บริการ | ช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า   |                                    |        |        |        | ช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น   |                                    |        |        |        |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|
|                   | ช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ย | เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย (ค่า P-value) |        |        |        | ช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ย | เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย (ค่า P-value) |        |        |        |
|                   |                               | 1                                  | 2      | 3      | 4      |                               | 1                                  | 2      | 3      | 4      |
| 1                 | 0.965-1.702                   |                                    | 0.047* | 0.018* | 0.001* | 1.840-3.147                   |                                    | 0.734  | 0.549  | 0.187  |
| 2                 | 1.611-2.702                   |                                    | 0.026* | 0.012* | 0.009* | 2.406-3.898                   |                                    | 0.030* | 0.023* | 0.021* |
| 4                 | 1.688-3.033                   |                                    | 0.017* | 0.005* | 0.003* | 2.594-4.514                   |                                    | 0.046* | 0.019* | 0.004* |
| 5                 | 1.361-2.380                   |                                    | 0.036* | 0.027* | 0.014* | 0.994-1.913                   |                                    | 0.025* | 0.019* | 0.004* |
| 6                 | 1.569-2.739                   |                                    | 0.038* | 0.029* | 0.015* | 0.872-1.587                   |                                    | 0.235  | 0.041* | 0.007* |
| 7                 | 2.339-3.628                   |                                    | 0.065  | 0.033* | 0.012* | 0.352-0.821                   |                                    | 0.096  | 0.005* | 0.003* |
| 10                | 0.299-0.737                   |                                    | 0.522  | 0.488  | 0.289  | 0.378-0.939                   |                                    | 0.031* | 0.014* | 0.012* |
| 11                | 0.319-0.774                   |                                    | 0.588  | 0.211  | 0.095  | 0.967-1.960                   |                                    | 0.013* | 0.008* | 0.004* |
| 12                | 0.391-0.862                   |                                    | 0.812  | 0.650  | 0.396  | 0.454-0.922                   |                                    | 0.587  | 0.191  | 0.144  |
| 13                | 0.188-0.525                   |                                    | 0.444  | 0.314  | 0.173  | 0.378-0.899                   |                                    | 0.802  | 0.464  | 0.180  |
| 14                | 0.385-0.809                   |                                    | 0.798  | 0.704  | 0.499  | 0.483-1.024                   |                                    | 0.044* | 0.030* | 0.026* |
| 15                | 1.498-2.750                   |                                    | 0.045* | 0.041* | 0.020* | 0.366-0.754                   |                                    | 0.779  | 0.563  | 0.151  |
| 18                | 1.487-2.612                   |                                    | 0.041* | 0.014* | 0.002* | 0.266-0.835                   |                                    | 0.673  | 0.264  | 0.165  |
| 20                | 0.524-0.996                   |                                    | 0.569  | 0.324  | 0.300  | 0.222-0.675                   |                                    | 0.774  | 0.69   | 0.362  |
| 1307              | 0.292-0.833                   |                                    | 0.884  | 0.694  | 0.442  | 0.509-1.027                   |                                    | 0.559  | 0.443  | 0.306  |
| 4140              | 0.334-0.761                   |                                    | 0.572  | 0.427  | 0.283  | 0.443-0.885                   |                                    | 0.559  | 0.396  | 0.250  |
| 4234              | 0.263-0.803                   |                                    | 0.750  | 0.556  | 0.460  | 1.840-3.147                   |                                    | 0.859  | 0.357  | 0.535  |
| 4287              | 1.340-2.472                   |                                    | 0.046* | 0.034* | 0.017* | 2.406-3.898                   |                                    | 0.658  | 0.461  | 0.363  |
| 4416              | 0.366-0.830                   |                                    | 0.626  | 0.402  | 0.221  | 2.594-4.514                   |                                    | 0.273  | 0.167  | 0.090  |

\*มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

จากผลการเปรียบเทียบจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยที่รออยู่บริเวณจุดจอดรถหน้าคลังปลาชำใหม่ ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าพบว่า ผลจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยโดยรวมของแบบจำลองลดลงจากระบบทำงานจริงถึงร้อยละ 31.07 และใช้จำนวนรถเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียงร้อยละ 5.88 และในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็นพบว่า ผลจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยโดยรวมของแบบจำลองลดลงจากระบบทำงานจริงถึงร้อยละ 28.32 และใช้จำนวนรถเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพียง

ร้อยละ 4.08 ดังนั้นผลที่ได้จากแบบจำลองของจุดจอดรถทั้งสองจุดจึงมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบการทำงานจริง

#### 4.2 แนวทางการจัดการเดินรถสองแถว หน้าวัดพายัพและหน้าคลังปลาชำใหม่

เส้นทางการเดินรถจากจุดจอดหน้าวัดพายัพไปยังจุดจอดหน้าห้างสรรพสินค้าคลังปลาชำ ระยะทางประมาณ 1.5 กิโลเมตรมีลักษณะเป็นการเดินรถแบบทางเดียว ในการพิจารณาเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของแต่ละสายนั้นจะพิจารณาทั้งสองจุดไปพร้อมกัน โดยดูจากผลการวิเคราะห์

จำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ย ดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6 ซึ่งได้ผลการทดสอบแต่ละคู่มีค่าแตกต่างกัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีดังนี้

#### 4.2.1 กรณีการเดินทางสองแถวในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเช้า

1) เมื่อพิจารณาการเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของสาย 5 ที่วิ่งผ่านทั้งสองจุด พบว่าจุดวิกฤตที่มีจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยมากอยู่ที่บริเวณจุดจอดหน้าวัดพายัพมีผู้มารับบริการมากกว่า ซึ่งหน่วยผู้ให้บริการที่เหมาะสมที่สุดกำหนดให้เพิ่มขึ้นอีก 1 หน่วย

2) พิจารณาการเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของสาย 7 ที่วิ่งผ่านทั้งสองจุด พบว่าจุดวิกฤตที่มีจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยอยู่ที่บริเวณจุดจอดหน้าคลังปลาซ่าใหม่มีผู้มารับบริการมากที่สุด ซึ่งหน่วยผู้ให้บริการที่เหมาะสมกำหนดให้เพิ่มขึ้นอีก 2 หน่วย

3) พิจารณาการเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของสาย 15, 4287 ที่วิ่งผ่านทั้งสองจุด พบว่าจุดวิกฤตที่มีจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยอยู่ที่บริเวณจุดจอดหน้าคลังปลาซ่าใหม่มีผู้มารับบริการมากกว่า ซึ่งหน่วยผู้ให้บริการที่เหมาะสมที่สุดกำหนดให้เพิ่มขึ้นอีกสายละ 1 หน่วย

4) ในส่วนรถสาย 1, 2, 4, 6, 8 และ 18 ที่ไม่ได้วิ่งผ่านทั้งสองจุดนั้น แต่มีผลกระทบจากจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยมากเช่นกัน ดังนั้นจึงกำหนดให้เพิ่มหน่วยผู้ให้บริการจากจุดจอดเหล่านี้ขึ้นอีกสายละ 1 หน่วย

#### 4.2.2 กรณีการเดินทางสองแถวในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนเย็น

1) เมื่อพิจารณาการเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของสาย 5, 11 ที่วิ่งผ่านทั้งสองจุด พบว่าจุดวิกฤตที่มีจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยมากอยู่ที่บริเวณจุดจอดหน้าคลังปลาซ่าใหม่มีผู้มารับบริการมากกว่า ซึ่งหน่วยผู้ให้บริการที่เหมาะสมที่สุดกำหนดให้เพิ่มขึ้นอีกสายละ 1 หน่วย

2) พิจารณาการเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของสาย 7 ที่วิ่งผ่านทั้งสองจุด พบว่าจุดวิกฤตที่มีจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยอยู่ที่บริเวณจุดจอดหน้าวัดพายัพมีผู้มารับบริการมาก

ที่สุด ซึ่งหน่วยผู้ให้บริการที่เหมาะสมกำหนดให้เพิ่มขึ้นอีก 2 หน่วย

3) พิจารณาการเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของสาย 6 ที่วิ่งผ่านเฉพาะหน้าห้างสรรพสินค้าคลังปลาซ่า พบว่ามีจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยมากที่สุด และหน่วยผู้ให้บริการที่เหมาะสมกำหนดให้เพิ่มขึ้นอีก 2 หน่วย

4) ในส่วนรถสาย 2, 4, 8, 10 และ 14 ที่ไม่ได้วิ่งผ่านทั้งสองจุดนั้น แต่มีผลกระทบจากจำนวนคนคอยสะสมเฉลี่ยมากเช่นกัน ดังนั้นจึงกำหนดให้เพิ่มหน่วยผู้ให้บริการจากจุดจอดนี้ขึ้นอีกสายละ 1 หน่วย

แต่ถึงอย่างไรก็ตามในการเพิ่มจำนวนเที่ยวรถของรถสองแถวสายต่างๆ ผู้วิจัยได้พิจารณาถึงความจำเป็นและความคุ้มค่าในการเดินรถแต่ละครั้ง ไม่ว่าจะเป็นค่าใช้จ่ายผันแปรเช่น ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าเสื่อม ค่าสึกหรอและค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบกับจำนวนเที่ยวรถที่เพิ่มขึ้น แต่สิ่งสำคัญก็เพื่อให้ผู้มารับบริการเกิดความสะดวกสบายและปลอดภัยในการเดินทาง

#### 4.3 อนาคตเมืองนครราชสีมากับรถสองแถว

เพื่อรองรับโครงข่ายคมนาคมที่กำลังจะเกิดขึ้น โดยเฉพาะระบบขนส่งมวลชนจังหวัดนครราชสีมา สายสีเขียว ได้วางแผนที่จะสร้างสถานีจอดรถไฟฟ้าใกล้กับจุดจอดรถสาธารณะทั้งสองจุดนี้ ดังรูปที่ 3 โดยออกแบบให้รถสองแถวสามารถเข้าไปรับส่งผู้โดยสารในสถานีได้ ซึ่งคาดว่าจะแล้วเสร็จและเปิดให้บริการในปี 2571 สามารถรองรับผู้โดยสารได้ 100 คนต่อเที่ยว [1] มีประชาชนต้องเดินทางโดยระบบขนส่งมวลชนและรถสองแถวเป็นจำนวนมากบริเวณนี้ ดังนั้นภาครัฐและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็นสำนักงานขนส่งจังหวัดนครราชสีมา เทศบาลเมืองนครราชสีมา และสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) ใช้เป็นแนวทางปรับปรุงสร้างโครงข่ายระบบจราจรและขนส่งในอนาคต และการสนับสนุนส่งเสริมนโยบายให้ประชาชนหันมาใช้บริการขนส่งสาธารณะหรือระบบขนส่งมวลชนให้มากขึ้น โดยกำหนดนโยบายการใช้ระบบตั๋วโดยสารร่วม (Common Ticketing System) เพื่อเชื่อมต่อการเดินทางทุกระบบ

เช่น รถไฟ รถไฟฟ้ารางเบา และรถขนส่งสาธารณะ ซึ่งทำให้ประชาชนได้รับความสะดวก ช่วยลดปัญหาการแออัด การแย่งชิงลูกค้าระหว่างกัน และผู้ให้บริการรถสองแถว พร้อมให้ความร่วมมือที่จะปรับปรุง ทั้งการให้บริการและสภาพรถให้มีความสะดวกสบาย และเหมาะสมสำหรับทุกคนอย่างแท้จริง เป้าหมายคือการพัฒนาเพื่อก้าวสู่เมืองที่กำลังเป็นสมาร์ทซิตี โคราชสมาร์ท ซิตี้ (Korat Smart City) ในอนาคต

#### 4.4 ข้อเสนอแนะงานวิจัยครั้งต่อไป

1) งานวิจัยนี้ได้ศึกษา วิธีการบริหารจัดการจำนวนรถสองแถวสายต่างๆ ที่เหมาะสมในช่วงโมงเร่งด่วนด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์เพื่อรองรับระบบขนส่งมวลชนจังหวัดนครราชสีมา รถไฟฟ้ารางเบา (LRT) สายสีเขียวที่ยังไม่เกิดขึ้นจริง ในอนาคตเมื่อโครงการระบบขนส่งมวลชนได้มีการเปิดให้บริการแล้วควรทำการศึกษาพฤติกรรมรถเลือกใช้ระบบขนส่งมวลชนในสถานการณ์จริง มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่

2) การศึกษาด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์การนี้เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งไม่สามารถทดลองในสถานการณ์จริงได้เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องเวลา ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรเก็บข้อมูลให้มากกว่านี้เพื่อจะได้เป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลจริง หากผู้ที่จะนำข้อมูลวิจัยนี้ไปใช้ควรระมัดระวังในการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ เพราะข้อมูลอาจมีเปลี่ยนแปลงได้ตามกาลเวลา อีกทั้งแบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่ได้นำรายละเอียดปลีกย่อยของระบบการทำงานจริงมาพิจารณา เช่น สาเหตุอื่นๆ ที่ทำให้รถมาช้าผิดปกติ และต้นทุนของผู้ให้บริการรถสองแถวทั้งต้นทุนคงที่ ต้นทุนผันแปร เป็นต้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล และข้อมูลเชิงวิชาการจาก ผศ. ดร.ชัยนิกร กุลวงษ์ รวมถึงนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ช่วยลงพื้นที่เก็บข้อมูลเพื่อเป็นข้อมูลในการวิจัยในครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Office of Transport and Traffic Policy and Planning (OTP), “Traffic and Public Transport Master Plan in Nakhon Ratchasima City (Final Report)”, Bangkok: Thailand, April 15, 2017.
- [2] S. Prewthaisong, “The Minibus Service Capacity Towards the Needs of The People in The Areas of Double-Track Train Stations in The Future”, In *SMART LOGISTICS Proceeding of the 1st national Conference on Smart Logistics*, Burapha University, Chonburi, Thailand, 2018, pp. 217-229.
- [3] K. Artsuwan, “Development of Quality of Service for Public Transportation in Pattaya City, Chonburi Province: A Case Study of Minibus (Blue Line)”, M.P.A. thesis, General Administration, Burapha University, Chonburi; 2014.
- [4] P. Chantruthai, “A Study of Passenger Mode Choice Behavior of Urban Public Transport System: A Case Study of Nakhon Si Thammarat Municipality” , *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 61-66, 2015.
- [5] E. E. Lewis, “Introduction to Reliability Engineering”, in *Data and Distributions*, 2th ed. Evanston, Illinois: John Wiley & Sons, Inc., 1994, pp. 102-139.
- [6] Shannon, Robert E, *System Simulation the Art and Science*. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1975.
- [7] W. Natratip, “Simulation Model on Lift Utilizing for Energy Saving: A Case Study of Building 15 at Rajabhat Institute Buriram”, M.S. thesis, Dept. Engineering Management,



Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University, Nakhon Ratchasima, 2003.

- [8] K. Nanok. (2021, June 10). Map of Minibuses in Korat [Online]. Available: <https://wekorat.com/2016/04/07/2-taewkorat-map-download>
- [9] K. Namchimlee, “ Factors Influencing Traveling to Central Business District during the Morning Peak Hour: A Case Study of Nakhon Ratchasima Municipality”, *Technical Education Journal King Mongkut’s University of Technology North Bangkok*, vol. 5, no. 1, pp. 91-98, 2014.
- [10] N. Chumrit, *Engineering Statistics*. Bangkok: SE-ED Publishing, 2013.
- [11] N. Kamolsuk, “Queuing System Analysis: The Study of 7- Eleven at Muangthai- Patthara Branch”, *MISJournal Faculty of Management and Information Sciences Naresuan University*, vol. 7, no. 1, pp. 66-78, 2012.

**วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลระยะยาวของปริมาณ  
ยอดขายจำหน่ายรถยนต์ในประเทศด้วยอนุกรมเวลา; กรณีศึกษา ปี พ.ศ.2554-2564**  
**Long Term Trend Analysis of Domestic Car Sales Volume**  
**Using Time Series; 2011-2021 Case Study**

สุดนิรันดร์ เพชรรัตน์<sup>1\*</sup> รุ่งอรุณ บุญถ่าน<sup>1</sup> รุ่งโรจน์ ฤกษ์หย้าย<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

<sup>2</sup>ศูนย์แห่งความยอดเยี่ยมทางวิศวกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Sudniran Phetcharat<sup>\*1</sup> Roongarun Buntan<sup>1</sup> Rungroj Ruekrai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering,  
Srinakharinwirot University

<sup>2</sup>Excellence Center for Sustainable Engineering Faculty of Engineering,  
Srinakharinwirot University

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

(Received: October 4, 2022; Revised: December 14, 2022 ; Accepted: January 27, 2023)

**บทคัดย่อ**

ปริมาณยอดขายจำหน่ายรถยนต์ในประเทศมีความสัมพันธ์กับนโยบายด้านภาษีสรรพสามิตรถยนต์และแปรผันตรงกับราคาขายปลีกในระหว่างปี 2554-2564 รัฐบาลได้ดำเนินนโยบายที่เกี่ยวข้องกับภาษีสรรพสามิตรถยนต์ คือ โครงการรถยนต์ใหม่คันแรกตามนโยบายรัฐบาล และการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ที่คำนวณจากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ในช่วงปี 2563 เกิดการระบาดของโควิด-19 ที่ส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจทั่วโลก ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อตลาดรถยนต์ในประเทศ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากเหตุการณ์ดังกล่าวต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณยอดขายจำหน่ายรถยนต์ภายในประเทศด้วยอนุกรมเวลา การพยากรณ์ปริมาณยอดขายจำหน่ายรถยนต์ในส่วนบุคคลและรถยนต์บรรทุกส่วนบุคคลปี 2554-2564 จากจำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ โดยใช้สถิติปี 2543-2553 เป็นฐานพยากรณ์ จากการเปรียบเทียบแบบจำลอง 9 แบบ พบว่า แบบจำลองเลขยกกำลัง รูปสมการ  $Nt = 224066t^{0.4815}$  มีค่า  $r^2$  สูงที่สุด ผลการเปรียบเทียบค่าจากการพยากรณ์กับสถิติ พบว่า โครงการรถยนต์ใหม่คันแรกตามนโยบายรัฐบาล ส่งผลให้ปริมาณยอดขายจำหน่ายรถยนต์ภายในประเทศเพิ่มขึ้นผิดปกติ โดยมีจำนวนมากกว่าค่าพยากรณ์ ร้อยละ 61.71 และ 59.60 ในปี 2555 และ 2556 ตามลำดับ ผลจากการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ที่คำนวณจากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในปี 2559 ไม่ทำให้ปริมาณยอดขายจำหน่ายรถยนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับโครงสร้างภาษีไม่ส่งผลให้ราคาจำหน่ายรถยนต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนผลกระทบจากการระบาดของโควิด 19 ทำให้ปริมาณยอดขายจำหน่ายรถยนต์น้อยกว่าค่าพยากรณ์ ร้อยละ 19.02 และ 20.01 ในปี 2563 และ 2564 ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** ปริมาณยอดขายจำหน่ายรถยนต์, ภาษีสรรพสามิต, โครงการรถคันแรก, โครงสร้างภาษีรถยนต์, โควิด 19

## ABSTRACT

The volume of domestic cars sales depends on the excise tax policy for cars and has been directly variable with the direction of economic growth. During 2011–2021 the Thai government implemented policies on excise tax for cars including the First Car Policy and the restructuring of the excise tax on cars based on the calculations of carbon dioxide emissions. Then in 2020 the COVID-19 pandemic occurred and impacted the global economy which might have impacted the volume of cars sales in the domestic automotive market as well. This article aimed to analyze the impact from the situation on the long-term trend in the volume of cars sales in Thailand using the time series analysis method. The prediction of the total sale volume of sedans and pick-up trucks for 2011–2021 were calculated based on new car registration nation-wide using the statistics during 2000–2010 as the baseline for prediction. Comparison of 9 models found that the power model with the formula  $Nt = 224066t^{0.4815}$  has the highest  $r^2$ . When the predicted value was compared with the statistics it was found that the result of the government's First Car Policy resulted in irregular increase the volume of domestic car sales. The statistical amount was 61.71% and 59.60% higher than the predicted amount for 2012 and 2013 respectively. The result of the restructuring of excise tax on cars based on the amount of carbon dioxide emissions in 2016 did not increase the volume of car sales. This was because the restructuring of excise tax for cars was not caused statistically significant decrease in the price of cars. The COVID-29 pandemic reduced the volume of cars sales was lower than the predicted volume by 19.02% and 21.01% for 2020 and 2021 respectively.

**Keyword:** Volume of Cars Sales, Excise Tax, First Car Project, Tax Structure for Car, Covid-19.

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมรถยนต์เป็นอุตสาหกรรมที่รัฐบาลไทยให้การส่งเสริมอย่างต่อเนื่อง โดยช่วงแรกระหว่างปี พ.ศ. 2504-2513 รัฐบาลกำหนดนโยบายที่สนับสนุนการลงทุนในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ เพื่อส่งเสริมการผลิตรถยนต์ภายในประเทศทดแทนการนำเข้า เช่น การให้สิทธิประโยชน์ทางภาษี การลดอัตราภาษีนำเข้าชิ้นส่วนครบชุดสมบูรณ์ที่ใช้ประกอบรถยนต์ และการปรับขึ้นภาษีนำเข้ารถยนต์ประกอบสำเร็จรูปจากต่างประเทศในอัตราสูงเพื่อจำกัดการนำเข้ารถยนต์มาจำหน่ายในประเทศ ในช่วงต่อมาเริ่มตั้งแต่ปี 2514 รัฐบาลมีนโยบายสร้างความเข้มแข็งให้กับอุตสาหกรรมรถยนต์ในประเทศ โดยส่งเสริมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อรองรับการเติบโตของ

อุตสาหกรรมรถยนต์ในอนาคต โดยปรับขึ้นภาษีนำเข้าชิ้นส่วนครบชุดสมบูรณ์ที่ใช้ประกอบรถยนต์ ส่งเสริมการลงทุนจากต่างประเทศและผลักดันให้เกิดการถ่ายทอดเทคโนโลยี จากนโยบายของรัฐบาลดังกล่าวส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์และชิ้นส่วนรถยนต์เติบโตอย่างรวดเร็ว จากข้อมูลปี 2562 [1] พบว่า ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตรถยนต์ทุกประเภทเป็นอันดับที่ 11 ของโลก อันดับที่ 5 ของเอเชีย และอันดับ 1 ของอาเซียน โดยมียอดจำหน่ายรถยนต์ เป็นอันดับที่ 17 ของโลก อันดับที่ 6 ของเอเชีย และอันดับ 2 ของอาเซียน

ทิศทางการเติบโตของอุตสาหกรรมรถยนต์ในประเทศได้รับอิทธิพลจากนโยบายของรัฐบาล ในขณะที่อุตสาหกรรมรถยนต์ก็มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจ

โดยรวมของประเทศ ทั้งการจ้างงาน การสร้างมูลค่าเพิ่ม และการเติบโตของอุตสาหกรรมต่อเนื่อง ส่วนปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ภายในประเทศก็ได้รับอิทธิพลจากภาวะเศรษฐกิจและนโยบายของรัฐบาล ทั้งนี้ในช่วงปี พ.ศ.2054-2564 ที่ผ่านมารัฐบาลได้ดำเนินมาตรการด้านภาษีรถยนต์ที่สำคัญ คือ ในปี พ.ศ.2554 โครงการรถยนต์ใหม่คันแรกตามนโยบายรัฐบาล [2] และการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่ทั้งระบบที่ใช้หลักการคำนวณจากปริมาณการปล่อยมลพิษ หรือการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) มีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 1 มกราคม 2559 [3] นอกจากนี้ ในปี พ.ศ.2563 เกิดการระบาดของโรคโควิด 19 [4] ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบกลไกทางเศรษฐกิจของไทยและทั่วโลกอย่างรุนแรง โดยเหตุการณ์ดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อการเติบโตของอุตสาหกรรมรถยนต์ของประเทศไทย

โครงการรถยนต์ใหม่คันแรกตามนโยบายรัฐบาล เป็นนโยบายที่สนับสนุนให้ประชาชนที่มีรายได้น้อยที่ไม่เคยมีรถยนต์มาก่อนสามารถซื้อรถยนต์ได้ โดยได้รับเงินคืนเท่ากับค่าภาษีสรรพสามิตที่จ่ายจริงไม่เกิน 100,000 บาท โดยผู้เข้าร่วมโครงการต้องซื้อรถยนต์ระหว่างวันที่ 16 กันยายน 2554 – 31 ธันวาคม 2555 ซึ่งมีการขยายเวลาในการรับมอบรถยนต์จนถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 ตามมติคณะรัฐมนตรีที่อนุมัติระยะเวลาสิ้นสุดการรับมอบรถยนต์ตามโครงการรถยนต์คันแรก [5] จากการดำเนินโครงการดังกล่าวมีผู้เข้าร่วมโครงการที่มีสิทธิตามเงื่อนไขจำนวน 1,244,530 ราย [2] จากการที่ประชาชนเข้าร่วมโครงการดังกล่าวเป็นจำนวนมากจึงทำให้เกิดอุปสงค์ในการซื้อรถยนต์เพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดด

การปรับเปลี่ยนโครงสร้างภาษีสรรพสามิตใหม่ที่ใช้หลักการคำนวณจากปริมาณการปล่อยมลพิษ หรือการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสากลนิยมที่ทั่วโลกใช้กันอยู่ และยังเป็นแนวทางที่สนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ในอนาคตที่ให้ความสำคัญกับการพัฒนารถยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงด้านพลังงาน โดยรัฐบาลได้ปรับอัตราภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่ ตามมติ

คณะรัฐมนตรี เมื่อ 28 ธันวาคม พ.ศ.2555 ซึ่งผ่านความเห็นชอบจากคณะรัฐมนตรี และมีผลบังคับใช้ในวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2559 การปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ดังกล่าวถือว่าเป็นการสนับสนุนรถยนต์ประหยัดพลังงานขนาดเล็กหรืออีโคคาร์ และเป็นรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานเพราะมีอัตราภาษีลดลง หากมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า 100 กรัมต่อกิโลเมตร แต่สำหรับรถยนต์ขนาดใหญ่ที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 200 กรัมต่อกิโลเมตรต้องเสียภาษีในอัตราที่สูงขึ้น การปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์นี้ อาจส่งผลกระทบให้เกิดการเปลี่ยนแปลงราคาจำหน่ายรถยนต์ภายในประเทศ และอาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการซื้อขายรถยนต์ของผู้บริโภค

การระบาดของโควิด-19 เริ่มครั้งแรกในประเทศจีน เมื่อปี 2562 สำหรับประเทศไทยพบผู้ป่วยโควิด 19 รายแรกเมื่อ 13 มกราคม 2563 [4] จากนั้นมีประกาศกระทรวงสาธารณสุขกำหนดให้โควิด 19 เป็นโรคติดต่ออันตรายภายใต้พระราชบัญญัติโรคติดต่อ พ.ศ. 2558 การระบาดของโควิด 19 ในประเทศไทยมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้นายกรัฐมนตรีประกาศสถานการณ์ฉุกเฉินในทุกพื้นที่ของประเทศไทยเมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2563 ตามพระราชกำหนดการบริหารราชการในสถานการณ์ฉุกเฉิน พ.ศ.2548 ผลจากการระบาดของโควิด 19 นั้นส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจโลก และเศรษฐกิจไทยอย่างมาก ประชาชนต้องประสบปัญหาในการดำรงชีวิต โดยเฉพาะการสูญเสียรายได้ จากการหยุดงาน และถูกเลิกจ้างงาน เนื่องจาก ร้านค้า บริษัท หลายแห่งต้องยุติการดำเนินงาน

จากการวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงถึงผลกระทบจากนโยบายด้านภาษีและสภาพเศรษฐกิจต่อพฤติกรรมการซื้อขายรถยนต์ของผู้บริโภค มีรายงานที่พยากรณ์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภาษีรถยนต์ พบว่า ปัจจัยด้านภาษีที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกประเภทรถยนต์มากที่สุดคือ ปัจจัยด้านราคารถยนต์ [6] ส่วนผลกระทบของ

นโยบายภาษีรถยนต์ประหยัดพลังงานขนาดเล็ก พบว่าปัจจัยด้านราคามีผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อรถยนต์มากที่สุด [7] การดำเนินนโยบายรถยนต์คันแรกทำให้มีการซื้อรถยนต์เพิ่มขึ้น [8] ซึ่งเป็นการดึงดูดอุปสงค์ของรถยนต์มาจากอนาคตโดยจำนวนผู้ซื้อรถยนต์ในปี พ.ศ. 2555 และ 2556 เพิ่มขึ้นมากกว่าค่าพยากรณ์ตามอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ [9] ส่วนผลจากการแพร่ระบาดของโควิด-19 เริ่มส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมรถยนต์ ในปี 2563 และกระทบต่อห่วงโซ่อุปทานการผลิตรถยนต์ เนื่องจากกำลังซื้อของผู้บริโภคในประเทศและตลาดส่งออกซบเซารุนแรง [1] ทั้งนี้ ผลจากการดำเนินโครงการรถยนต์คันแรกตามนโยบายรัฐบาล การปรับเปลี่ยนโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่ และการระบาดของโควิด 19 เป็นเหตุการณ์สำคัญที่อาจส่งผลกระทบต่อความต้องการของผู้บริโภคในประเทศในช่วงปี พ.ศ.2554-2564 โดยเฉพาะผลกระทบต่อรถยนต์นั่งส่วนบุคคลไม่เกิน 7 ที่นั่ง (รถยนต์.1) และรถยนต์บรรทุกส่วนบุคคล (รถยนต์.3) ซึ่งเป็นรถยนต์ที่คนไทยนิยมใช้กันมากที่สุด และมียอดขายสูงที่สุดอยู่ในสองลำดับแรก

บทความนี้แสดงการวิเคราะห์ผลกระทบจากการดำเนินโครงการรถยนต์คันแรกตามนโยบายรัฐบาล การปรับเปลี่ยนโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่ และการระบาดของโควิด 19 ต่อปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ภายในประเทศ ช่วงปี พ.ศ.2554-2564 (ค.ศ. 2011-2021) โดยใช้เทคนิคการพยากรณ์ด้วยอนุกรมเวลาที่พยากรณ์ปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์จากสถิติจำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศปี 2543-2553 เป็นฐานพยากรณ์ โดยพิจารณาเฉพาะรถยนต์ประเภท รถยนต์.1 และ รถยนต์.3 เนื่องจากรถยนต์ทั้งสองประเภทนี้เป็นรถยนต์ที่คนไทยนิยมใช้ในการเดินทางและขนส่ง ดังนั้น ปริมาณการซื้อรถยนต์ทั้งสองประเภทนี้ของผู้บริโภคจึงมีความสัมพันธ์กับนโยบายด้านภาษีรถยนต์ และสภาพเศรษฐกิจของไทย

## 2. ขั้นตอนการวิจัย

การวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ในประเทศด้วยเทคนิคการพยากรณ์ด้วยอนุกรมเวลา ร่วมกับการวิเคราะห์ความถดถอย โดยพยากรณ์ปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ในประเทศจากสถิติจำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ ซึ่งเผยแพร่โดยกรมขนส่งทางบก โดยเป็นสถิติจำนวนผู้ซื้อรถยนต์ใหม่ที่จดทะเบียนในวันที่ 1 มกราคม-31 ธันวาคม ของปีนั้น ๆ ซึ่งจำแนกประเภทรถยนต์ตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์ และกฎหมายว่าด้วยการขนส่งทางบก สำหรับการวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะสถิติจำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่ประเภท รถยนต์.1 และ รถยนต์.3 ตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์ (จำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่จะไม่ใช้ปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ที่แท้จริง เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนจากผู้ซื้อรถยนต์ที่ไม่ได้จดทะเบียนภายในปีที่ซื้อรถยนต์ แต่มีคลาดเคลื่อนน้อยมาก จึงเป็นสถิติที่เชื่อถือได้ในการใช้วิเคราะห์ภาพรวมของตลาดรถยนต์ภายในประเทศ)

จำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นฟังก์ชันของเวลา ดังสมการที่ 1 โดยแสดงองค์ประกอบของอนุกรมเวลา ดังสมการที่ 2 ประกอบด้วย การเคลื่อนไหวหรือเปลี่ยนแปลงข้อมูลระยะยาว (Long Term Trend) การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (Seasonal Variation) การเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักร (Cyclical Variation) และการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติ (Irregular Variation)

$$Y_t = f(t) \dots\dots\dots(1)$$

$$Y_t = T + S + C + I \dots\dots\dots(2)$$

โดยที่

$Y_t$  คือจำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่ปีที่  $t$

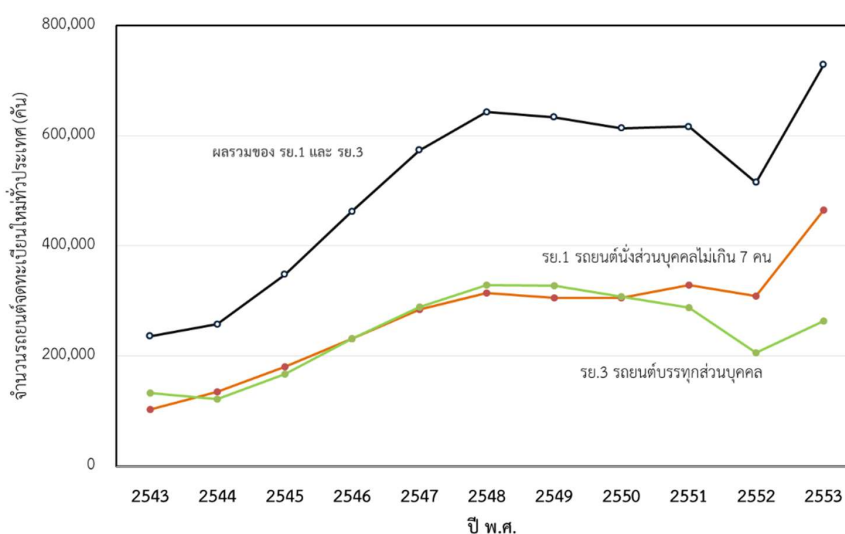
$t$  คือ ปีที่ 1, 2, 3, ...,  $n$

$T$  คือ การเปลี่ยนแปลงข้อมูลระยะยาว

$S$  คือ การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

$C$  คือ การเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักร

$I$  คือ การเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติ



รูปที่ 1 จำนวนรายนต์นั่งส่วนบุคคลไม่เกิน 7 คน และรายนต์บรรทุกส่วนบุคคลจดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ  
ปี พ.ศ.2543-2553 [10]

การวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณยอด  
การจำหน่ายรถยนต์ภายในประเทศไทยด้วยอนุกรมเวลา  
โดยพยากรณ์ยอดการจำหน่ายรถยนต์จากสถิติจำนวน  
รายนต์จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ มีขั้นตอนดังนี้

1. การวิเคราะห์ความถดถอยด้วยโปรแกรม SPSS  
เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของจำนวนรายนต์จดทะเบียน  
ใหม่ทั่วประเทศ (จำนวนรายนต์ที่เป็นผลรวมของ รย.1  
และ รย.3) โดยใช้ข้อมูลสถิติปี 2543-2553 ดังแสดงในรูป  
ที่ 1 เป็นฐานพยากรณ์ โดยพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบ  
ของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลระยะยาวที่เป็น  
ฟังก์ชันของเวลา ไม่มีองค์ประกอบของการเปลี่ยนแปลง  
ตามฤดูกาลและการเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักร

2. วิเคราะห์ความเหมาะสมจากสมการความถดถอย  
ทั้งหมด 9 แบบจำลอง คือ แบบจำลองเชิงเส้น (Linear  
Model) แบบจำลองลอการิทึม (Logarithmic Model)  
แบบจำลองผกผัน (Inverse Model) แบบจำลองกำลัง  
สอง (Quadratic Model) แบบจำลองผสม (Compound  
Model) แบบจำลองเลขยกกำลัง (Power Model)  
แบบจำลองตัวเอส (S Model) แบบจำลองการเติบโต  
(Growth Model) และแบบจำลองเลขชี้กำลัง  
(Exponential Model)

3. การคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมในการ  
พยากรณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจำนวนรายนต์ประเภท  
รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ โดยพิจารณา  
จากแบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  
(Coefficient of Determination;  $r^2$ ) มากที่สุด และ  
แบบจำลองนั้นต้องมีการแจกแจงความคลาดเคลื่อนแบบ  
ปกติ

4. เปรียบเทียบสถิติจำนวนที่เป็นผลรวมของรายนต์  
ประเภท รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศกับ  
ค่าที่พยากรณ์จากสมการความสัมพันธ์ เพื่อวิเคราะห์การ  
เปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติที่เกิดขึ้นจากโครงการรถยนต์ใหม่  
คันแรก (พ.ศ.2555-2556) การปรับโครงสร้างภาษี  
สรรพสามิตรถยนต์ใหม่ (พ.ศ.2559-2560) และการ  
ระบาดของโควิด 19 (2563-2564)

### 3. ผลการวิจัย

การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองที่จะใช้  
ในการพยากรณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจำนวนที่เป็น  
ผลรวมของรายนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 จดทะเบียน  
ใหม่ทั่วประเทศ ด้วยโปรแกรม SPSS แสดงดังตารางที่ 1  
พบว่า แบบจำลองเลขยกกำลัง ดังสมการที่ 3 มีค่า  $r^2$  มาก

ที่สุด คือ 0.8625 หรือมีความเชื่อมั่น ร้อยละ 86.25 ทั้งนี้ ได้ตรวจสอบการแจกแจงความคลาดเคลื่อน และความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแบบจำลองเลขยกกำลัง ด้วยสถิติทดสอบ Shapiro-Wilk พบว่า มีค่า Significant เท่ากับ 0.767 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังนั้น แบบจำลองเลขยกกำลังจึงมีการแจกแจงแบบปกติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

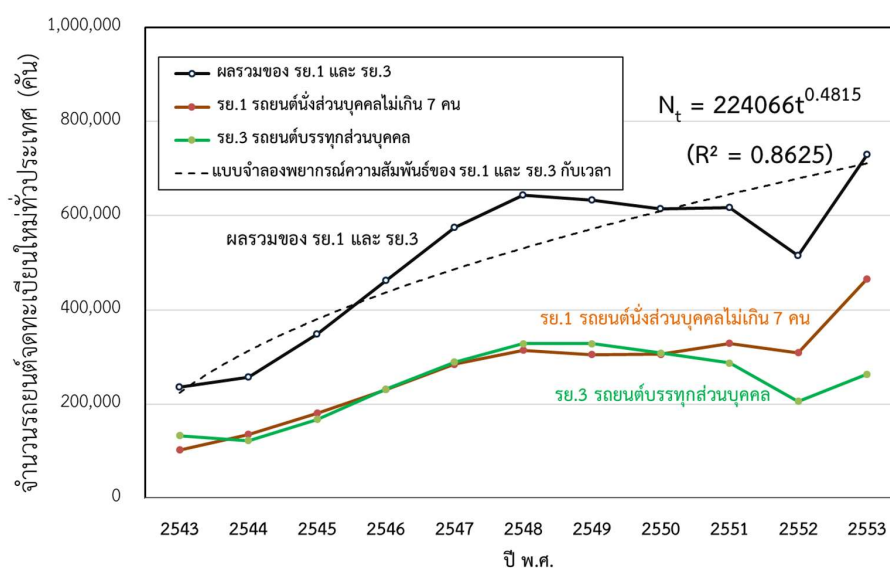
โดยมีความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.151 ดังนั้น จึงเหมาะสมตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

$$N_t = 224066t^{0.4815} \dots\dots\dots(3)$$

โดย  $N_t$  หมายถึง จำนวนรถยนต์ รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ ปีที่  $t$ ,  $t$  หมายถึง ปีที่ 1,2,3..... $t$

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์แบบจำลองของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจำนวนรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ พยากรณ์จากสถิติปี 2543-2553

| Equation        | R Square      | Parameter Estimates |               |            |    |
|-----------------|---------------|---------------------|---------------|------------|----|
|                 |               | Constant            | b1            | b2         | b3 |
| 1. Linear       | 0.7202        | 257573              | 42396.8182    |            |    |
| 2. Logarithmic  | 0.8225        | 191077              | 201667.4380   |            |    |
| 3. Quadratic    | 0.8539        | 87523               | 120881.0979   | -6540.3566 |    |
| 4. Inverse      | 0.6973        | 652636              | -512439.0187  |            |    |
| 5. Compound     | 0.7089        | 267636              | 1.1030        |            |    |
| <b>6. Power</b> | <b>0.8625</b> | <b>224066</b>       | <b>0.4815</b> |            |    |
| 7. S            | 0.7801        | 13                  | -1.2638       |            |    |
| 8. Growth       | 0.7089        | 12                  | 0.0981        |            |    |
| 9. Exponential  | 0.7089        | 267636              | 0.0981        |            |    |



รูปที่ 2 เปรียบเทียบค่าพยากรณ์ของจำนวนที่เป็นผลรวมของ รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ ปี 2543-2553 กับค่าสถิติ

จากรูปที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบเส้นแนวโน้มจำนวนรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 ที่จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ ปี 2543-2553 ระหว่างค่าสถิติกับค่าที่พยากรณ์จากสมการที่ 3 พบว่าปี พ.ศ. 2552 จำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศมีค่าน้อยกว่าค่าพยากรณ์แบบผิปกติเมื่อเทียบกับปีอื่น เนื่องจากในปี 2552 เกิดสภาวะเศรษฐกิจถดถอยครั้งใหญ่ของโลกจากปัญหาวิกฤตในภาคการเงินของกลุ่มเศรษฐกิจชั้นนำของโลก หรือ กลุ่ม G3 ได้แก่ สหรัฐอเมริกา ยุโรป และญี่ปุ่น ซึ่งส่งผลกระทบต่อประเทศไทยทั้งอุปสงค์ภายในประเทศและต่างประเทศลดลง ทำให้ปี 2552 เศรษฐกิจไทยหดตัวร้อยละ 2.3 [11] ซึ่งเป็นการหดตัวครั้งแรกในรอบ 10 ปี นับจากปี 2542 ทั้งนี้ การเกิดสภาวะเศรษฐกิจหดตัวดังกล่าว จึงเป็นสาเหตุให้ยอดจำหน่ายรถยนต์ภายในประเทศลดลง

ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างค่าพยากรณ์และค่าสถิติของจำนวนรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.2 ที่จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ ปี 2554-2564 แสดงดังรูปที่ 3 และตารางที่ 2 พบว่า สถิติจำนวนรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศมีเหตุการณ์ผิปกติเกิดขึ้นหลายช่วงเวลา ซึ่งสามารถจำแนกเป็นช่วงเวลาที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินโครงการรถยนต์คันแรก (พ.ศ. 2555-2556) ผลกระทบจากการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตที่คำนวณจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (พ.ศ.2559-2560) และผลกระทบจากการระบาดของโควิด 19 (พ.ศ.2563-2564) โดยแสดงการวิเคราะห์ผลกระทบแต่ละเหตุการณ์ ในข้อที่ 3.1-3.3 ตามลำดับ

### 3.1 ผลกระทบจากการดำเนินโครงการรถยนต์ใหม่คันแรกตามนโยบายรัฐบาล

การดำเนินโครงการรถยนต์ใหม่คันแรกตามนโยบายรัฐบาล มีผู้เข้าร่วมโครงการที่จองซื้อรถยนต์ในเดือนกันยายน 2554-31 ธันวาคม 2555 ที่เข้าร่วมโครงการจำนวน 1,244,530 ราย [1] โดยผู้เข้าร่วมโครงการโดยส่วนใหญ่ประมาณ 1,100,000 ราย รับมอบรถยนต์ภายในปี พ.ศ.2555-2556 จากการดำเนินโครงการดังกล่าวทำให้

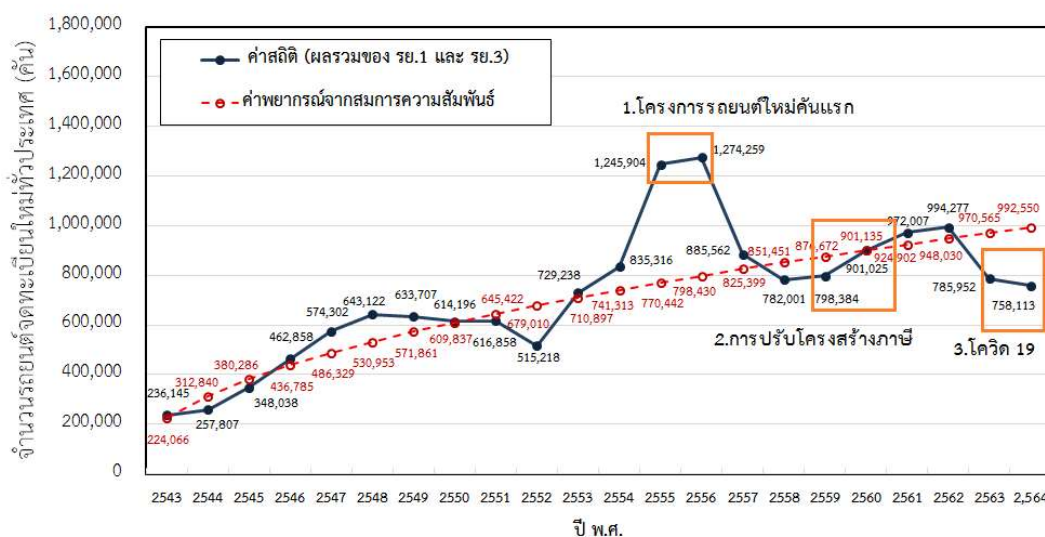
เกิดเหตุการณ์ผิปกติครั้งใหญ่ของตลาดรถยนต์ในประเทศ โดยมีผู้ซื้อรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นรถยนต์ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของโครงการ จากรูปที่ 3 และตารางที่ 2 พบว่าในปี 2555 และ 2556 มีรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ จำนวน 1,245,904 และ 1,274,259 คัน เพิ่มขึ้นจากปี 2554 ร้อยละ 49.15 และ 52.55 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบระหว่างค่าสถิติกับค่าพยากรณ์ของจำนวนที่เป็นผลรวมของรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ พ.ศ.2554-2564

| พ.ศ. | จำนวนรถยนต์ประเภท<br>รย.1 และ รย.3<br>จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ (คัน) |            | ผลต่างระหว่าง<br>ค่าสถิติกับค่าพยากรณ์ |        |
|------|---------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|--------|
|      | ค่าสถิติ                                                            | ค่าพยากรณ์ | คัน                                    | ร้อยละ |
| 2554 | 835,316                                                             | 741,313    | 94,003                                 | 12.68  |
| 2555 | 1,245,904                                                           | 770,442    | 475,462                                | 61.71  |
| 2556 | 1,274,259                                                           | 798,430    | 475,829                                | 59.60  |
| 2557 | 885,562                                                             | 825,399    | 60,163                                 | 7.29   |
| 2558 | 782,001                                                             | 851,451    | -69,450                                | -8.16  |
| 2559 | 798,384                                                             | 876,672    | -78,288                                | -8.93  |
| 2560 | 901,025                                                             | 901,135    | -110                                   | -0.01  |
| 2561 | 972,007                                                             | 924,902    | 47,105                                 | 5.09   |
| 2562 | 994,277                                                             | 948,030    | 46,247                                 | 4.88   |
| 2563 | 785,952                                                             | 970,565    | -184,613                               | -19.02 |
| 2564 | 783,989                                                             | 992,550    | -208,561                               | -21.01 |

ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าสถิติกับค่าพยากรณ์ ดังตารางที่ 2 พบว่าในปี 2555 และ 2556 มีจำนวนรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่มากกว่าค่าพยากรณ์ 475,462 และ 475,829 คัน หรือร้อยละ 61.71 และ 59.60 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงถึงผลกระทบโดยรวมจากการดำเนินโครงการรถยนต์ใหม่คันแรก ในปี 2555 และ 2556 เท่ากับ 951,291 คัน ซึ่ง





รูปที่ 3 เปรียบเทียบสถิติผลรวมของ รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ ปี 2543-2564 กับค่าพยากรณ์

มากกว่าค่าพยากรณ์ร้อยละ 60.64 การดำเนินโครงการดังกล่าวเป็นปัจจัยกระตุ้นให้ผู้บริโภคซื้อรถยนต์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผู้บริโภคได้รับผลประโยชน์จากการที่ผู้บริโภครอรถใหม่จากรถยนต์คันเดิม จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นให้ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อรถยนต์ ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นการดึงกำลังซื้อมาจากอนาคต จึงส่งผลให้ยอดจำหน่ายรถยนต์ ในปี 2557 และ 2558 ลดลงอย่างรวดเร็ว

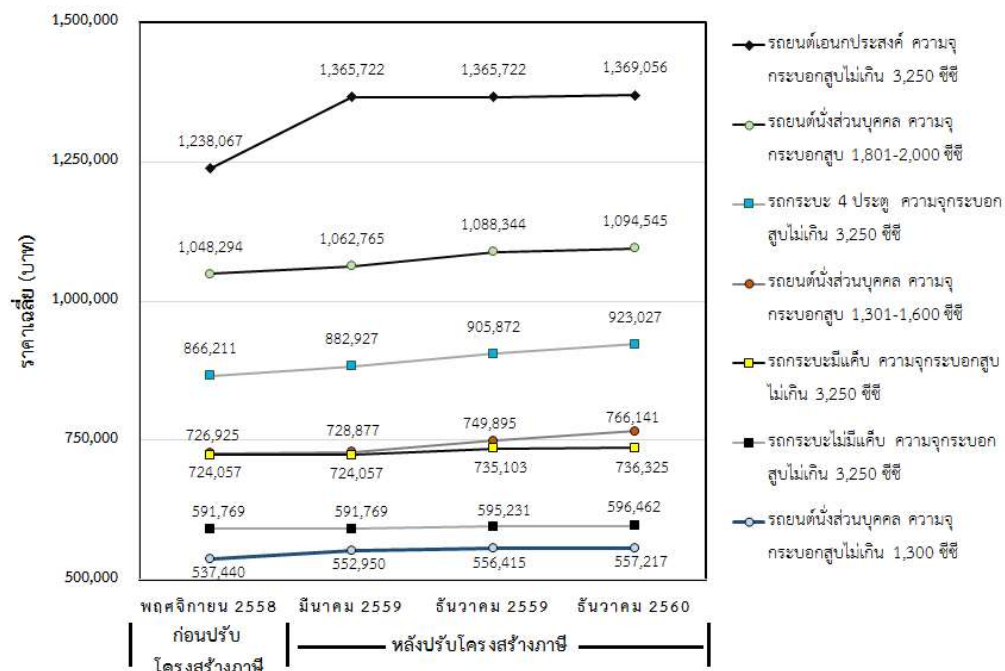
### 3.2 ผลกระทบจากปรับอัตราภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่จากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีผลบังคับใช้ในวันที่ 1 มกราคม 2559

การปรับอัตราภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่จากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีผลบังคับใช้ในวันที่ 1 มกราคม 2559 ถือว่าเป็นการสนับสนุนรถยนต์ประหยัดพลังงานขนาดเล็กหรืออีโคคาร์ เพราะรถยนต์ประเภทนี้มีอัตราภาษีลดลง หากมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่ำกว่า 100 กรัมต่อกิโลเมตรแต่รถยนต์ที่มีเครื่องยนต์ขนาดใหญ่จำเป็นต้องเสียภาษีในอัตราที่สูงขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 200 กรัมต่อกิโลเมตร ดังนั้นการปรับอัตราภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงราคาจำหน่ายรถยนต์ และอาจมีผลต่อการตัดสินใจซื้อรถยนต์ของผู้บริโภคภายในประเทศ

จากรูปที่ 3 และตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าสถิติจำนวนรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศกับค่าพยากรณ์ โดยพิจารณาข้อมูลในปี 2559 ซึ่งเป็นช่วงเวลาหลังจากปรับโครงสร้างภาษี 1 ปี พบว่าสถิติจำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศต่ำกว่าค่าพยากรณ์ ร้อยละ 8.93 ส่วน ปี 2560 ค่าสถิติใกล้เคียงกับค่าพยากรณ์ แต่ยังต่ำกว่าค่าจากการพยากรณ์ ร้อยละ 0.01 จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงว่าการซื้อรถยนต์ของผู้บริโภคภายหลังการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตทั้ง 2 ปี มีจำนวนน้อยกว่าค่าพยากรณ์ แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่ใช่ข้อสรุปว่าการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตใหม่เป็นผลให้ทำให้การบริโภครถยนต์ลดลง แต่ก็ยังเป็นสิ่งยืนยันว่าภายหลังการปรับอัตราภาษีสรรพสามิตรถยนต์ที่คำนวณจากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ส่งผลให้ยอดจำหน่ายรถยนต์ทั้งสองประเภทนี้เพิ่มขึ้นมากผิดปกติ

จากข้อมูลการสำรวจการจดทะเบียน โดยสุ่มตัวอย่างรถยนต์ที่จำหน่ายในประเทศไทยที่ประชาชนสัมพันธ์ผ่านทางเว็บไซต์ 5 ยี่ห้อ คือ ซูซูกิ มิตซูบิชิ ฮอนด้า โตโยต้า และ มาสด้า โดยสำรวจก่อนการปรับโครงสร้างภาษีในเดือน พฤศจิกายน 2558 และการสำรวจหลังการปรับโครงสร้างภาษี 3 ช่วง คือ มีนาคม 2559 ธันวาคม 2559 และ

ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2565 – มีนาคม พ.ศ. 2566



รูปที่ 4 ราคารถยนต์เฉลี่ยก่อนและหลังการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่

ธันวาคม 2560 ทั้งนี้ จำแนกรถยนต์เป็น 7 ประเภท คือ 1) รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ความจุกระบอกลูกไม่เกิน 1,300 ซีซี 2) รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ความจุกระบอกลูก 1,301-1,600 ซีซี 3) รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ความจุกระบอกลูก 1,601-2,000 ซีซี 4) รถกระบะไม่มีแค็บ ความจุกระบอกลูกไม่เกิน 3,250 ซีซี 5) รถกระบะมีแค็บ ความจุกระบอกลูกไม่เกิน 3,250 ซีซี 6) รถกระบะ 4 ประตู ความจุกระบอกลูกไม่เกิน 3,250 ซีซี และ 7) รถยนต์เอนกประสงค์ แสดงค่าเฉลี่ยราคาขายรถจำแนกประเภทดังรูปที่ 4 พบว่า ราคาขายรถหลังการปรับโครงสร้างภาษี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงไม่มีปัจจัยด้านราคาที่กระตุ้นให้ผู้บริโภคมีความต้องการซื้อรถยนต์เพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ ยังมีข้อพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับในช่วงปีแรกของการปรับอัตราภาษีสรรพสามิตรถยนต์ คือ ในปี พ.ศ.2559 ซึ่งค่าสัณยัติน้อยกว่าค่าจากการพยากรณ์ ร้อยละ 8.93 อาจมีสาเหตุจากการที่ผู้บริโภคชะลอการตัดสินใจในการซื้อรถยนต์เพื่อรอความชัดเจนของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และเป็นช่วงเวลาที่ยังได้รับผลกระทบจาก

โครงการรถยนต์คันแรก ที่ดึงอุปสงค์รถยนต์จากอนาคต และกระตุ้นให้ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อรถยนต์ในปี 2555 และ 2556 ส่วนปี พ.ศ.2560 การซื้อรถยนต์ของผู้บริโภคก็เริ่มกลับเข้าสู่สภาวะปกติ โดยสถิติจำนวนรถยนต์จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศกับค่าพยากรณ์มีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการเปรียบเทียบค่าสถิติและค่าพยากรณ์ในปี 2559 และ 2560 พบว่า สถิติรถยนต์ประเภท รย.1 และ รย.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศต่ำกว่าค่าพยากรณ์ แสดงว่าการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่ไม่ได้เป็นปัจจัยกระตุ้นให้ผู้บริโภคซื้อรถยนต์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไม่มีผลทำให้รถยนต์ที่จำหน่ายภายในประเทศมีราคาลดลง และอาจได้รับผลกระทบต่อเนื่องจากโครงการรถยนต์คันแรกเป็นปัจจัยร่วม จึงไม่มีปัจจัยใดที่สนับสนุนให้ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อรถยนต์เพิ่มขึ้น

### 3.3 ผลกระทบจากการระบาดของโควิด 19

มีรายงานการพบผู้ป่วยติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 หรือ โควิด-19 (COVID-19) รายแรกในประเทศไทยเมื่อเดือนมกราคม 2563 มีจากนั้น ผู้ป่วยโควิด-19 ในประเทศ

ก็มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น รัฐบาลจึงมีมาตรการต่าง ๆ เพื่อควบคุมการแพร่ระบาด โดยกระทรวงสาธารณสุขออกประกาศให้โควิด-19 เป็นโรคติดต่ออันตราย มีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 1 มีนาคม 2563 การจัดตั้งศูนย์บริหารสถานการณ์แพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (ศบค.) เมื่อวันที่ 12 มีนาคม 2563 จากนั้น นายกรัฐมนตรีได้แถลงประกาศใช้พระราชกำหนดการบริหารราชการในสถานการณ์ฉุกเฉิน พ.ศ. 2548 หรือ พรก.ฉุกเฉิน เพื่อควบคุมสถานการณ์การระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่สายพันธุ์ใหม่ 2019 มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 26 มีนาคม 2563 แต่อย่างไรก็ตาม ผลจากการระบาดของโควิด-19 นั้นส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจโลก และเศรษฐกิจไทยอย่างมาก ประชาชนต้องประสบปัญหาในการดำรงชีวิต โดยเฉพาะการสูญเสียรายได้ จากการหยุดงาน และถูกเลิกจ้างงาน เนื่องจาก ร้านค้า บริษัท หลายแห่งต้องยุติการดำเนินงาน โดยในปี พ.ศ.2563 เศรษฐกิจไทยหดตัวอย่างรุนแรงโดยค่าผลิตภัณฑ์รวมในประเทศ (Gross Domestic Product; GDP) -6.1% [12]

การประเมินผลกระทบจากการระบาดของโควิด-19 ต่อปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ภายในประเทศ ด้วยการเปรียบเทียบค่าสถิติจำนวนรถยนต์ประเภท รถ.1 และ รถ.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศกับค่าพยากรณ์ ดังที่แสดงในตารางที่ 2 พบว่า ปี พ.ศ.2563 สถิติของ รถ.1 และ รถ. 3 ต่ำกว่าค่าพยากรณ์ 184,613 คัน หรือต่ำกว่าร้อยละ 19.02 นอกจากนี้ ยังพบว่า ในปี 2564 ตลาดรถยนต์ยังได้รับผลกระทบจากการระบาดของโควิด 19 อย่างต่อเนื่อง โดยยอดการจำหน่ายรถยนต์น้อยกว่าค่าพยากรณ์ ร้อยละ 21.01

#### 4. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลระยะยาวของปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ในประเทศด้วยอนุกรมเวลา ที่พยากรณ์ยอดการจำหน่ายรถยนต์จากสถิติจำนวนรถยนต์ ประเภท รถ.1 และ รถ.3 จดทะเบียนใหม่ทั่วประเทศ โดยใช้สถิติปี 2543-2553 เป็นฐานพยากรณ์

ปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ ในปี 2554-2564 เพื่อประเมินผลกระทบจากนโยบายด้านภาษีรถยนต์และการระบาดของโควิด-19 มีข้อสรุปดังนี้

- การดำเนินโครงการรถยนต์ใหม่คันแรกตามนโยบายรัฐบาลมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ในปี 2555 และ 2556 โดยส่งผลให้มีจำนวนมากกว่าค่าพยากรณ์ 475,462 และ 475,829 คัน หรือร้อยละ 61.71 และ 59.60 ตามลำดับ

ในภาพรวมแล้วตลาดรถยนต์ภายในประเทศได้รับผลกระทบจากโครงการรถยนต์ใหม่คันแรกอย่างมาก โดยผลรวมทั้งในปี 2555 และ 2556 ปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์มากกว่าค่าที่ประมาณตามอนุกรมเวลา รวม 951,291 คัน หรือร้อยละ 60.64 ซึ่งยอดจำหน่ายรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นการดึงอุปสงค์มาจากอนาคตทำให้ยอดจำหน่ายรถยนต์ในปี 2558 ลดลงเหลือ 851,451 คัน ซึ่งต่ำกว่าค่าพยากรณ์ร้อยละ 8.16

- การปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่ที่คำนวณจากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ส่งผลให้ปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ใหม่ไม่มีผลให้ราคาจำหน่ายรถยนต์ลดลง จึงไม่เป็นปัจจัยกระตุ้นให้ผู้ซื้อรถยนต์เพิ่มมากขึ้นทั้งในปี 2559 และ 2560

ผลจากการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์นั้นแตกต่างจากผลจากโครงการรถยนต์คันแรกที่ประชาชนได้รับผลประโยชน์ในรูปแบบของเงินคืนในส่วนของภาษีสรรพสามิต ซึ่งเป็นปัจจัยหลักให้ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อรถยนต์เร็วขึ้นและเป็นการดึงดูดอุปสงค์รถยนต์จากอนาคต โดยปี 2557-2559 ยังได้รับผลกระทบต่อเนื่องจากโครงการรถยนต์ใหม่คันแรก กอปรกับการปรับโครงสร้างภาษีสรรพสามิตรถยนต์ไม่มีปัจจัยด้านราคาที่กระตุ้นให้ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อรถยนต์เพิ่มขึ้น

- การระบาดของโควิด-19 มีผลกระทบต่อปริมาณยอดการจำหน่ายรถยนต์ภายในประเทศ โดยส่งผลให้มีจำนวนน้อยกว่าค่าพยากรณ์ ร้อยละ 19.02 ในปี 2563 และร้อยละ 21.01 ในปี 2564

## 5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งในโครงการวิจัยเรื่อง “ผลกระทบจากการปรับโครงสร้างการเก็บภาษีสรรพสามิตรถยนต์ต่อพฤติกรรมการบริโภครถยนต์ภายในประเทศ” ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประเภท เงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2560

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Yongpisanphob. (2020, July 14). Industry Outlook 2020-2022: Automobile Industry [Online]. Available: <https://www.krungsri.com/en/research/industry/industry-outlook/Hi-tech-Industries/Automobiles/IO/io-automobile-20>
- [2] Budget Bureau. (2022, Sep 16). Bureau of the Budget Annual Report 2013 [Online]. Available: <https://www.bb.go.th/topic-detail.php?id=2685&mid=355&catID=0>
- [3] Foundation for Consumers. (2022, Sep 17). New car tax started in 2016 [Online]. Available: <https://www.consumerthai.org/>
- [4] Open Development Thailand. (2020, May 16). COVID-19 in Thailand [Online]. Available: <https://thailand.opendevdevelopmentmekong.net/topics/pandemics-covid-19/>
- [5] The Excise Department. (2020, May 17). The first new car project according to the government policy [Online]. Available: <http://firstcar.excise.go.th/>
- [6] C. Wanichapun, “Auto-related Tax Model for Impacts Forecasting,” M.Eng. thesis, Dept. Transportation. Eng., King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2002
- [7] K. Su-angka, S. Su-angka and S. Sukprasert, “Impact Assessment of Economic Car’s Auto-Related Tax Case Study: The Northeast region of Thailand, ” *Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)*, Vol. 4, no. 8, pp.1-13, Jul.-Dec. 2012
- [8] W. Taechoyotin, and P. Klaymanee, “The impact of the first car policy on the collection of excise tax on automobiles and related industries.” *Journal of Accounting Profession*, Vol. 11, no. 30, pp. 5-22. 2015.
- [9] S. Phechcharat, R. Buntan, and S. Chintarat, “Impact from the Government’s “First New Car Project” Policy on the Travel Behavior of People in Bangkok,” *SWU Engineering Journal.*, Vol. 9, no. 1, pp. 47-55, 2015
- [10] Department of Land Transport. (2022, May 20). Number of new registered cars in 2022 [Online]. Available: <https://web.dlt.go.th/statistics/>
- [11] Bank of Thailand. (2022, Nov 11). Economic and Monetary Report 2009 [Online]. Available: [https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/EconomicConditions/AnnualReport/AnnualReport/annual\\_52.pdf](https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/EconomicConditions/AnnualReport/AnnualReport/annual_52.pdf)
- [12] ThaiPublica. (2022, Jan 5). Thai Economy in 2021 and Outlook for 2022 [Online] . Available: <https://thaipublica.org/2022/01/krungsri-research-forecast-gdp2022/>

## การพัฒนาระบบเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มสำหรับพื้นที่ปลูกทุเรียน จังหวัดนนทบุรี

### Development of Salinity Intrusion Monitoring System for Durian Growing areas in Nonthaburi Province

ศิริชัย สารมนัส<sup>1\*</sup> วรินทร์ บุญยะโรจน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

กรุงเทพฯ 10800

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

Sirichai Saramanus<sup>1\*</sup> Varinthorn Booyaroj<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Computer Science, Faculty of Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800

<sup>2</sup>Department of Environmental Science and Technology, Faculty of Science and Technology

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800

\*Corresponding author Email: sirichai.s@rmutp.ac.th

(Received: June 30, 2022; Revised: December 28, 2022; Accepted: March 16, 2023)

#### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาต้นแบบระบบเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มโดยใช้ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือในการคัดแยกค่าความเค็มของน้ำ ระบบดังกล่าวทำการพัฒนาโมเดลตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือโดยใช้ข้อมูลคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเกษตรจาก FAO พิจารณาค่าการนำไฟฟ้า และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่เป็นปัจจัยส่งผลต่อค่าความเค็ม โดยใช้เครื่องมือพีซีลอจิกทูลบ็อกซ์ ทำการสร้างและทดสอบโมเดลที่สร้างขึ้น และทำการแปลงโมเดลที่สร้างขึ้นให้อยู่ในรูปแบบเอ็มเบ็ดเด็ด ซี โดยใช้เครื่องมือซิมูลิงค์ไคต์ ติดตั้งลงไมโครคอนโทรลเลอร์ Arm Cortex-M4 และใช้การทดสอบแบบ 10-Fold Cross Validation เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการคัดแยกข้อมูล ผลการทดสอบค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.58175 แสดงว่าโมเดลที่สร้างขึ้นสามารถคัดแยกข้อมูลได้ใกล้เคียงกับข้อมูลคัดแยกที่กำหนด

**คำสำคัญ:** การแทรกตัวของน้ำเค็ม ระบบเฝ้าสังเกต ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ พื้นที่ปลูกทุเรียนจังหวัดนนทบุรี

#### ABSTRACT

This research is to develop a prototype of a salinity intrusion monitoring system using fuzzy logic to extract salinity values. A system is developed according to a fuzzy logic model using FAO's for appropriate agricultural water quality data, considering the Electrical Conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS) as indicators of the salinity value by using the Fuzzy Logic Toolbox to produce and test the generated model. Transformation of the generated models to Embedded C format using

the Simulink Coder tool installed in the Arm Cortex-M4 microcontroller and a 10-fold cross-validation test was used to validate the data extraction. The Root Mean Square Error (RMSE) for the test results was 0.58175 on average. This research result indicates that the generated model is able to extract data that very closely matches the specified data.

**Keyword:** Salinity Intrusion, Monitoring System, Fuzzy logic, Nonthaburi Durian Growers.

## 1. บทนำ

ปัญหาการแทรกตัวของน้ำเค็มเข้าสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ส่งผลกระทบต่อเขตพื้นที่ทำการเกษตรของจังหวัดนนทบุรี และพื้นที่ภาคกลางตอนล่างหลายจังหวัด ปัญหาดังกล่าว ทำให้พืชผลทางการเกษตรมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง และเกิดความเสียหายต่อการทำการเกษตร เกษตรกรสวนทุเรียน จังหวัดนนทบุรี ต้องทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำ ก่อนนำไปใช้เพื่อหลีกเลี่ยงน้ำที่มีค่าความเค็มเกินค่ามาตรฐาน [1] รวมถึงต้องลงทุนวางระบบน้ำประปาเพื่อเจือจางค่าความเค็มของน้ำ จนกว่าค่าความเค็มของน้ำจะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการปลูกทุเรียนที่สูงขึ้น [2] ต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของทุเรียนและพันธุ์พืชอื่น ๆ

จากข้อมูลคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการการเกษตรของ Food and Agriculture Organization (FAO) [3] และการจำแนกประเภทและการใช้น้ำชลประทานของ United States Department of Agriculture (USDA) [4] กล่าวถึงค่าคุณลักษณะทางด้านเคมีและกายภาพ ใช้เป็นปัจจัยในการพิจารณาคุณภาพของน้ำ

มีการศึกษาการจำแนกประเภทคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานอย่างหลากหลาย [5] – [7] ซึ่งงานดังกล่าวเน้นใช้ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลคุณลักษณะทางด้านเคมีและกายภาพ จำแนกประเภทคุณภาพน้ำ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความซับซ้อน และความไม่แน่นอนของข้อมูล เป็นการยากต่อการนำเสนอข้อมูลให้คนทั่วไปเข้าใจได้ การเสนอแนวทางการนำตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือมาใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำชลประทานโดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ SAR และ EC ว่า

สอดคล้องกับการจำแนกประเภทคุณภาพน้ำของ United States Salinity Laboratory (USSL) [8] การประเมินคุณภาพน้ำใต้ดินด้วยวิธีตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือเป็นการศึกษาข้อมูลคุณภาพน้ำชลประทานของ Food and Agriculture Organization (FAO) เพื่อสร้าง FIS โดยใช้ค่า Salinity และค่า Sodicity Hazard ใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำ [9] การนำตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือมาใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำบาดาล [10]

จะเห็นได้ว่าตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ (Fuzzy Logic) [11] เป็นเครื่องมือช่วยในการจัดการกับข้อมูลที่มีความซับซ้อนและความไม่แน่นอนให้ผลลัพธ์ที่เข้าใจง่าย

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการการเกษตรโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า Electrical Conductivity (EC) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด Total Dissolved Solids (TDS) ใช้ข้อกำหนดคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการการเกษตรของ Food and Agriculture Organization (FAO) [3] ทำการสร้างโมเดล Fuzzy Inference System (FIS) ใช้ในการจำแนกประเภทและตัดสินใจคุณภาพน้ำให้ผลลัพธ์ที่เข้าใจง่าย

## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ปัญหาการแทรกตัวของน้ำเค็ม

การแทรกตัวของน้ำเค็มเข้าสู่เขตน้ำจืด เกิดจากน้ำทะเลที่หนุนจากทะเลเข้ามาสู่น้ำเจ้าพระยา เนื่องจากปริมาณน้ำจืดที่ปล่อยจากเขื่อนมีน้อย ทำให้น้ำทะเลหนุนเข้ามามากกว่าปกติ ส่งผลให้เขตพื้นที่ทำการเกษตรของจังหวัดนนทบุรีและพื้นที่ภาคกลางตอนล่างหลายจังหวัดที่

ใช้น้ำจากระบบชลประทานจากแม่น้ำเจ้าพระยาได้รับผลกระทบ [12] ค่าความเค็มที่เจือปนอยู่ในน้ำชลประทานหรือมาจากน้ำใต้ดินเค็มที่อยู่ต้นใกล้ผิวดินทำให้เกิดความเค็มซึ่ง สำหรับการเกษตรเพาะปลูกพืชนั้นมีค่าความเค็มของน้ำที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 2.0 กรัมต่อลิตร ค่าการนำไฟฟ้าไม่ควรเกิน 4,000 ไมโครโมลต่อเซนติเมตร ส่วนการนำมาผลิตประปา ค่าความเค็มของน้ำที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.25 กรัมต่อลิตร ค่าการนำไฟฟ้าไม่ควรเกิน 500 ไมโครโมลต่อเซนติเมตร [13] ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความเค็มต่อพืชสะสมในดินบริเวณรากพืช เมื่อมีปริมาณมากขึ้นทำให้พืชไม่สามารถดึงน้ำจากดินได้ตามปกติ เมื่อน้ำที่จะนำไปใช้ได้ลดลง ทำให้พืชนั้นมีอัตราการเจริญเติบโตลดลงและมีลักษณะคล้ายกับพืชขาดน้ำ เช่น ใบเหี่ยว ใบเหลือง เป็นต้น [14]

#### 2.2 คุณภาพน้ำเพื่อการเกษตร

น้ำที่มีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรได้มาก แต่บางพื้นที่นั้นมีข้อจำกัดด้านคุณภาพของน้ำที่นำมาใช้เพื่อการเกษตร จึงจำเป็นต้องมีการจัดการคุณภาพน้ำเพื่อการเกษตรอย่างต่อเนื่อง เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อดินและพืช สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพน้ำเพื่อการเกษตร คือ ค่าความเค็ม (Salinity) ซึ่งค่าความเค็มที่เจือปนอยู่ในน้ำชลประทานเพื่อการเกษตรนั้นทำให้เกิดการสะสมของเกลือในดินบริเวณรากพืชได้ ซึ่งหากค่าความเค็มมีปริมาณมากจะทำให้พืชไม่สามารถดึงน้ำจากดินได้ตามปกติและทำให้เกิดปัญหาดินเค็มเนื่องจากพืชใช้น้ำไปใช้ได้ลดลง ส่งผลให้พืชมีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลงด้วย โดยองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ [3] ได้แบ่งชั้นคุณภาพของน้ำเพื่อการชลประทาน จากผลของค่าการนำไฟฟ้า (Electro Conductivity, EC) และปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้ต่อผลผลิตพืช ได้แก่ น้ำที่มีคุณภาพดี มีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่า 0.7 dS/m หรือมีสารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolve Substance, TDS) น้อยกว่า 450 mg/L เป็นน้ำชลประทานที่ใช้ได้โดยไม่มีข้อจำกัด สำหรับน้ำที่มีคุณภาพปานกลาง มีค่าการนำไฟฟ้าระหว่าง 0.7-3.0 dS/m หรือมีสารที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS) 450-2,000

mg/L เป็นน้ำชลประทานที่มีข้อจำกัดเล็กน้อยถึงปานกลางในการนำไปใช้ โดยจะต้องปลูกพืชทนเค็ม และมีระบบระบายเกลือ และน้ำที่มีคุณภาพไม่ดี คือ มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 3.0 dS/m หรือมีสารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total dissolve substance, TDS) มากกว่า 2,000 mg/L เป็นน้ำชลประทานที่มีข้อจำกัดรุนแรงในการใช้เพื่อการเกษตร ซึ่งจะต้องแก้ไขโดยปลูกพืชทนเค็มมาก

#### 2.4 ตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ (Fuzzy Logic)

ตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือ ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) ถูกคิดค้นโดย L.A. Zade ใช้ในการประมาณการเหตุผล [15] พยุง มีสัง ได้ให้ความหมายไว้ว่า เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิธีความคิดซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean Logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial Ture) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริงกับเท็จ (Completely True) (Completely False) ตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น [16]

##### 2.4.1 ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) เป็นเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตอยู่ระหว่าง 0 และ 1 นิยามของฟัซซีกำหนดให้  $x$  เป็นเซตที่ไม่ว่าง ฟัซซีเซต  $A$  สามารถแสดงลักษณะเฉพาะได้จากฟังก์ชันความเป็นสมามิติดังสมการที่ (1)

$$\mu_A(x)X: \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

##### 2.4.2 ฟังก์ชันความเป็นสมามิติ (Membership Function)

ฟังก์ชันความเป็นสมามิติ (Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมามิติของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของ ฟัซซีเพราะ

รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและการแก้ไขปัญหา [16] ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่มีการนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานในการแก้ปัญหาต่างๆ มีจำนวนหลากหลายฟังก์ชันในงานวิจัยนี้จะกล่าวเพียง 2 ฟังก์ชันที่นำมาใช้งาน

ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) สมการที่ (2)

$$\text{triangle}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b) & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (2)$$

ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ  $\{a, b, c\}$

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function) สมการที่ (3)

$$\text{trapezoidal}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & c \leq x \leq d \\ 0 & d \leq x \end{cases} \quad (3)$$

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ  $\{a, b, c, d\}$

#### 2.4.3 กฎฟัซซี (Fuzzy Rules)

กฎฟัซซี (Fuzzy Rules) องค์ความรู้ในระบบฟัซซีสามารถแสดงในรูปประโยค [16, 17]

ถ้า ข้อตั้ง (ข้อนำ) ดังนั้น ข้อยุติ (ข้อตาม)

If ... Then ... Unless

#### 2.4.4 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Inference System)

โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Inference System) สามารถแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้ [16, 18]

1) ส่วนแปลงอินพุตทั่วไปเปลี่ยนเป็นอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี (Fuzzification) 2) ฐานความรู้ (Knowledge Base) เป็นส่วนที่จัดเก็บรวบรวมข้อมูลในการควบคุม

ประกอบด้วยฐานกฎ (Rule Base) และฐานข้อมูล (Database) ฐานกฎ (Rule Base) ทำหน้าที่กำหนดวิธีการควบคุม ได้จากผู้เชี่ยวชาญจัดให้อยู่ในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา (Linguistic Rule) ฐานข้อมูล (Database) เป็นส่วนการจัดเตรียมข้อมูลที่จำเป็น 3) เครื่องอนุมานหรือการตีความ (Inference Engine) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริงและกฎ เพื่อตีความหาเหตุผล 4) ส่วนการแปลงข้อมูลเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Defuzzification) ทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบฟัซซีให้เป็นค่าผลลัพธ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้

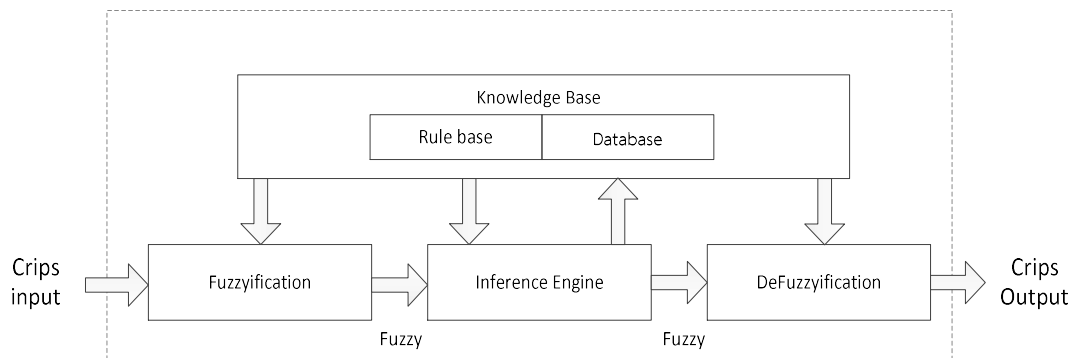
วิธีการหาค่าฟัซซีให้เป็นค่าทั่วไปที่นำไปใช้งานได้ (Defuzzification) มีหลายวิธีด้วยกัน [19] ในที่นี้นำเสนอวิธีเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average Method) หรือวิธีค่าพื้นที่กลาง (Centroid of Area) วิธีการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของพื้นที่ใต้กราฟฟัซซีซึ่งเป็นผลที่ได้จากการตีความ ค่าที่ได้จะประมาณเทียบเคียงค่าจุดศูนย์ถ่วงโดยรวม (Central of Gravity: COG) จะหาได้จากการประมาณค่าจากสมการที่ (4) [16]

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{\tilde{C}}(Z_i) \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^N \mu_{\tilde{C}}(Z_i)} \quad (4)$$

#### 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย A.F. Rusydi [20] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้า Electrical Conductivity (EC) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด Total Dissolved Solids (TDS) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบ่งบอกถึงคุณภาพของน้ำ รวมถึงการระบุค่าความเค็ม การศึกษานี้แสดงค่าอัตราส่วนของค่าการนำไฟฟ้า Electrical Conductivity (EC) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด Total Dissolved Solids (TDS) ที่พิจารณาโดยหาค่าจากค่าอัตราส่วนจากน้ำประเภต่างๆ





รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Inference System)

งานวิจัย K.L. Priya [8] ศึกษาแนวทางการนำตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือมาใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำชลประทาน กรณีศึกษา กลุ่มน้ำการันยาประเทศอินเดีย โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ Sodium Absorption Ratio (SAR) และ Electrical Conductivity (EC) ว่าสอดคล้องกับการจำแนกคุณภาพน้ำของ United States Salinity Laboratory (USSL) ผลการศึกษาพบว่าตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือที่นำมาใช้นั้นสอดคล้องกับการจำแนกคุณภาพน้ำของ United States Salinity Laboratory (USSL)

งานวิจัย S. Abdi [9] ได้ศึกษาการประเมินคุณภาพน้ำใต้ดินของที่ราบ ราบแซนจา ประเทศอิหร่าน ด้วยวิธีตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ โดยการศึกษาข้อมูลคุณภาพน้ำชลประทานของ FAO เพื่อสร้าง Fuzzy Inference System (FIS) โดยใช้ ค่า Salinity และ ค่า Sodicity Hazard เพื่อใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำ ผลการศึกษาพบว่าคุณภาพน้ำที่ราบดังกล่าวคุณภาพไม่ดี ถึง ปานกลาง ส่วนของค่า salinity และค่า Sodicity Hazard

งานวิจัย A. Saber Nasr [10] ได้ศึกษาแนวทางการนำตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือมาใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำบาดาลในจังหวัด ยาซด์ ประเทศอิหร่าน ผู้วิจัยได้นำค่าพารามิเตอร์ทางเคมีที่วัดได้ในตัวอย่างของน้ำ

บาดาล 60 ตัวอย่าง ผลการวิจัยพบว่าคุณภาพน้ำบาดาล 20 กลุ่มตัวอย่าง อยู่ในระดับน่าพอใจ และ 20 กลุ่มตัวอย่าง อยู่ในระดับยอมรับได้ และอีก 20 กลุ่มตัวอย่าง อยู่ในระดับยอมรับไม่ได้ สำหรับวัตถุประสงค์ในการดื่ม

### 3. วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ศึกษาข้อมูลการคัดแยกคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการทำการเกษตร

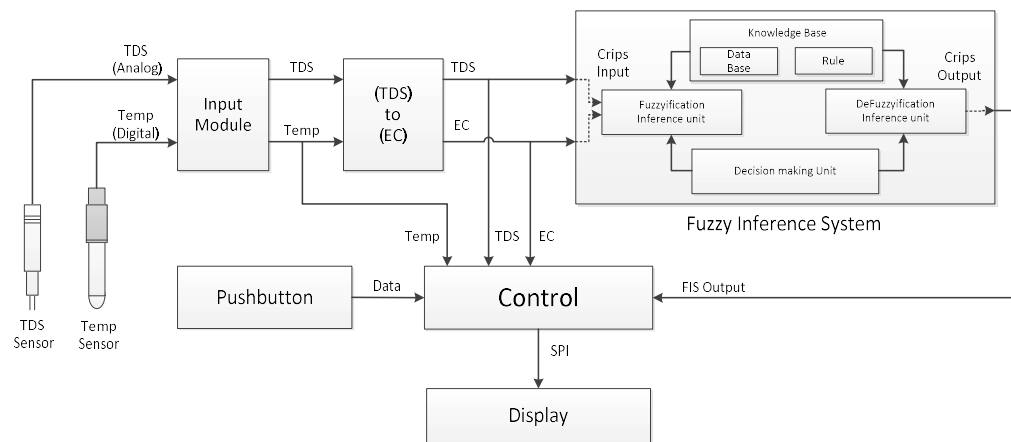
จากข้อกำหนดคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเกษตรของ Food and Agriculture Organization (FAO) [3] ที่แสดงในตารางที่ 1 และการศึกษาข้อมูลการคัดแยกคุณภาพน้ำ [20, 8, 9, 10] กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS (Total Dissolved Solids) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเค็ม (Salinity) ใช้ข้อมูลเป็นแนวทางการกำหนดคุณลักษณะในการคัดแยกคุณภาพน้ำ ระดับค่าความเค็มต่อการนำไปใช้งานมีเพียง 3 ระดับ คือ ระดับไม่มีผลกระทบ (None), ระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง (Slight to Moderate) และ ระดับรุนแรง (Severe)

**ตารางที่ 1** FAO Guideline for Interpretations of Water Quality of Irrigation

| Potential Irrigation Problem                                                                                                    |         |                        | Degree of Restriction on Use |                        |                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|
|                                                                                                                                 |         |                        | Units                        | None                   | Slight to Moderate<br>Severe |
| <b>Salinity</b> ( <i>Affects Crop Water Availability</i> )                                                                      |         |                        |                              |                        |                              |
| EC <sub>w</sub> (or)                                                                                                            |         | dS/m                   |                              | < 0.7                  | 0.7 – 3.0<br>> 3.0           |
| TDS                                                                                                                             |         | mg/l                   |                              | < 450                  | 450 – 2,000<br>> 2,000       |
| <b>Infiltration</b> ( <i>Affects Infiltration Rate of Water into the Soil. Evaluate Using EC<sub>w</sub> and SAR Together</i> ) |         |                        |                              |                        |                              |
| SAR                                                                                                                             | 0 – 3   | and<br>EC <sub>w</sub> |                              | >0.7                   | 0.7 – 0.2<br>< 0.2           |
|                                                                                                                                 | 3 – 6   |                        |                              | >1.2                   | 1.2 – 0.3<br>< 0.3           |
|                                                                                                                                 | 6 – 12  |                        |                              | >1.9                   | 1.9 – 0.5<br>< 0.5           |
|                                                                                                                                 | 12 – 20 |                        |                              | >2.9                   | 2.9 – 1.3<br>< 1.3           |
|                                                                                                                                 | 20 – 40 |                        |                              | >5.0                   | 5.0 – 2.9<br>< 2.9           |
| <b>Specific Ion Toxicity</b> ( <i>Affects Sensitive Crops</i> )                                                                 |         |                        |                              |                        |                              |
| Sodium (Na)                                                                                                                     |         | SAR                    |                              | < 3                    | 3 – 9<br>> 9                 |
| Surface Irrigation                                                                                                              |         | me/l                   |                              | < 3                    | >3                           |
| Sprinkler Irrigation                                                                                                            |         |                        |                              |                        |                              |
| Chloride (Cl)                                                                                                                   |         |                        |                              |                        |                              |
| Surface Irrigation                                                                                                              |         | me/l                   |                              | < 4                    | 4 – 10<br>> 10               |
| Sprinkler Irrigation                                                                                                            |         | me/l                   |                              | < 3                    | > 3                          |
| Boron (B)                                                                                                                       |         | mg/l                   |                              | < 0.7                  | 0.7 – 3.0<br>> 3.0           |
| Trace Elements                                                                                                                  |         |                        |                              |                        |                              |
| <b>Miscellaneous Effects</b> ( <i>Affects Susceptible Crops</i> )                                                               |         |                        |                              |                        |                              |
| Nitrogen (NO <sup>3</sup> - N)                                                                                                  |         | mg/l                   |                              | < 5                    | 5 – 30<br>> 30               |
| Bicarbonate (HCO <sup>3</sup> )                                                                                                 |         |                        |                              |                        |                              |
| (Overhead Sprinkling Only)                                                                                                      |         | mg/l                   |                              | < 1.5                  | 1.5 – 8.5<br>> 8.5           |
| pH                                                                                                                              |         |                        |                              | Normal Range 6.5 – 8.4 |                              |

**ตารางที่ 3.2** การแบ่งค่าระดับความเค็มต่อการนำไปใช้งานจากข้อมูลพื้นฐาน FAO Guideline for Interpretations of Water Quality of Irrigation

| Potential Irrigation Problem                               |  | Degree of Restriction on Use |      |             |              |                          |
|------------------------------------------------------------|--|------------------------------|------|-------------|--------------|--------------------------|
|                                                            |  | Units                        | LOW  | MIDLOW      | MID          | MIDHIGH<br>HIGH          |
| <b>Salinity</b> ( <i>Affects Crop Water Availability</i> ) |  |                              |      |             |              |                          |
| EC <sub>w</sub> (or)                                       |  | dS/m                         | <0.7 | 0.71 – 1.44 | 1.47 – 2.220 | 2.230 – 2.990<br>>3.0    |
| TDS                                                        |  | ppm                          | <450 | 458 – 966   | 967 – 1,483  | 1,484 – 1,999<br>> 2,000 |



รูปที่ 2 ระบบการเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็ม

ค่าระดับดังกล่าว หากนำไปใช้ในการเฝ้าระวังจะส่งผลให้การเฝ้าระวังจะไม่สามารถเตือนให้ทันเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ ทางคณะผู้จัดทำ ทำการแบ่งค่าระดับความเค็มออกเป็น 5 ระดับ โดยยึดข้อมูลค่าระดับความเค็มต่อการนำไปใช้งานจาก ตารางที่ 1 และการทำความเข้าใจหน่วยการวัด [21] เป็นแนวทาง ดังตารางที่ 2

### 3.2 ภาพรวมของระบบ

ภาพรวมของระบบจะแสดงดังรูปที่ 2 ภาพระบบการเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มคณะผู้วิจัยทำการแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วนคือ การนำข้อมูลเข้าก่อนการตัดสินใจ และการประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิก

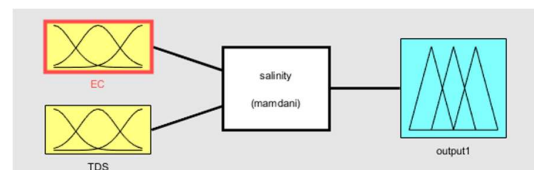
#### 3.2.1 การนำข้อมูลเข้าก่อนการตัดสินใจ

การทำงานส่วนที่ 1 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์อ่านค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS Sensor อุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิ Temperature Sensor ทำหน้าที่อ่านค่าอุณหภูมิทำงานร่วมกับ Input Module ข้อมูลที่อ่านได้เป็นแบบดิจิทัลทำการแปลงค่าจาก Total Dissolved solids (TDS) เป็นค่า Electrical Conductivity (EC) [22]

#### 3.2.2 การประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Inference System)

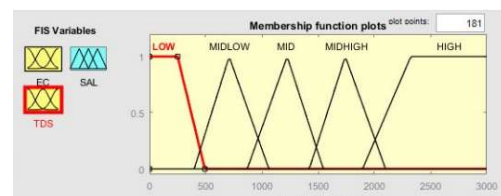
ส่วนการตัดสินใจ Fuzzy Inference System การออกแบบสร้าง Model โดยใช้ Fuzzy Logic Toolbox [23] เป็นเครื่องมือที่อยู่ในชุดซอฟต์แวร์ MATLAB [24] Version R2015B โดย Model ดังกล่าวจะมี 2 อินพุต

เป็นค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS (Total Dissolved Solids) และมี 1 เอาต์พุตเป็นค่าระดับความเค็ม SAL (Salinity) แสดงดังรูปที่ 3

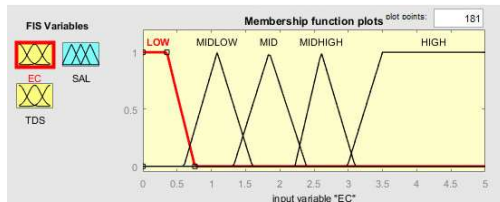


รูปที่ 3 Fuzzy Inference System Model

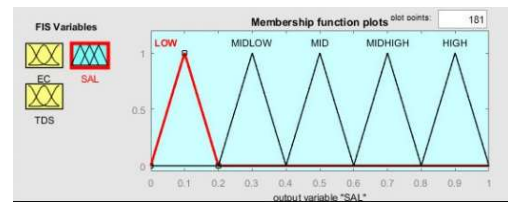
ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Member Ship Function) ของอินพุตค่า EC (Electrical Conductivity) และ TDS (Total Dissolved Solids) มีการแบ่งระดับข้อมูลออกเป็น 5 ระดับคือ LOW, MIDLOW, MID, MIDHIGH และ HIGH แสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 EC Member Ship Function



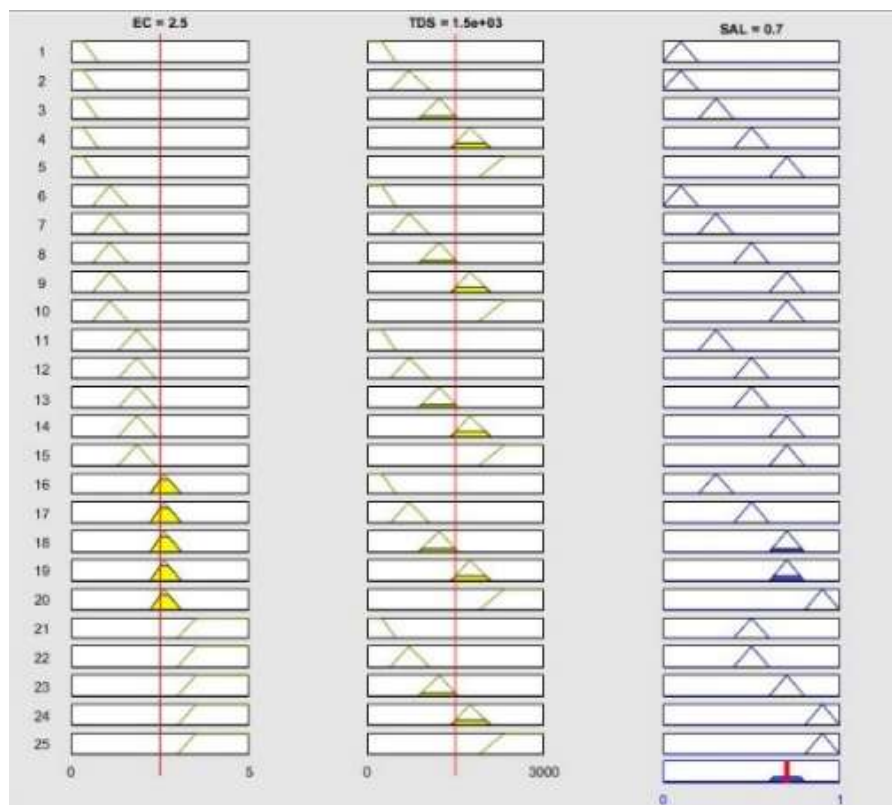
รูปที่ 5 TDS Member Ship Function



รูปที่ 6 SAL Member Ship Function

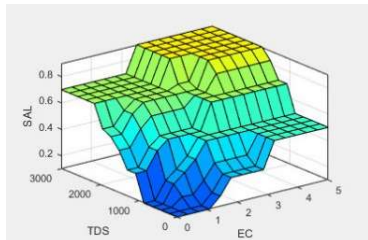
เอาต์พุตค่า SAL (Salinity) มีการแบ่งระดับข้อมูลออกเป็น 5 ระดับคือ LOW, MIDLOW, MID, MIDHIGH และ HIGH แสดงดังรูปที่ 6

การสร้างกฎฟัซซี (Fuzzy Rule) ใช้กฎ (Fuzzy if-then Rules) เพื่อใช้ในการตัดสินใจคัดแยกระดับค่าความเค็มทั้งหมด 25 กฎ แสดงได้ดังรูปที่ 7 การแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่าง อินพุต ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก กับ เอาต์พุตฟังก์ชันความเป็นสมาชิก



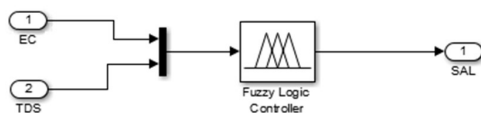
รูปที่ 7 ข้อมูลของกฎจำนวน 25 กฎ

ข้อมูลของกฎทั้งหมดแสดงแบบ Surface Viewer ระหว่าง TDS EC และ SAL ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 Surface Viewer ระหว่าง TDS EC และ SAL

เมื่อทำการทดสอบ Fuzzy Inference System Model (FIS) เสร็จสิ้น ทำการแปลง Fuzzy Logic Model ที่สร้างขึ้นด้วย Simulink Coder [25] ให้อยู่ในรูปแบบ Embedded C เพื่อให้สามารถนำไปติดตั้งในไมโครคอนโทรลเลอร์ Arm Cortex-M4 [26] โดยให้มีอินพุตจำนวน 2 อินพุตประกอบด้วย EC และ TDS ส่วนเอาต์พุตมี 1 เอาต์พุตกำหนดให้เป็น SAL ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 Simulink model

### 3.3 การทำงานของระบบ

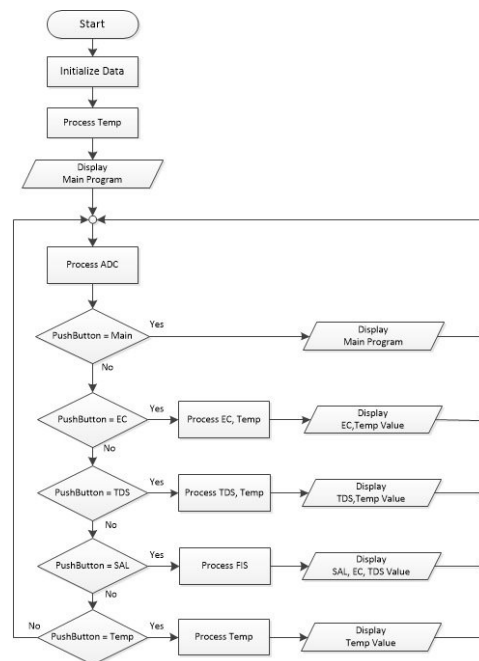
ส่วนการควบคุมการทำงาน Control ทำหน้าที่รับข้อมูลอินพุตจากอุปกรณ์อ่านค่า และอุปกรณ์นำเข้าข้อมูล ทำการประมวลผลการทำงานตาม Flowchart ในรูปที่ 10 นำผลลัพธ์ที่ได้แสดงบนส่วนแสดงผลของระบบ

## 4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

### 4.1 ผลการทดสอบของส่วนการตัดสินใจ

การทดสอบส่วนการตัดสินใจ Fuzzy Inference System Model (FIS) คณะผู้วิจัยทำการทดสอบโดยกำหนดข้อมูลให้ครอบคลุมค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS

(Total Dissolved solids) เพื่อแสดงการคัดแยกค่าระดับความเค็ม (Salinity) ระหว่าง FAO Guideline กับส่วนการตัดสินใจ Fuzzy Inference System Model (FIS) แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 10 ภาพรวมการทำงานของระบบ

### 4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของโมเดลที่สร้างขึ้น

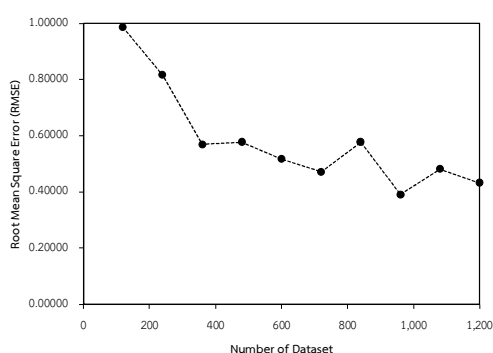
การทดสอบความถูกต้องของ Fuzzy Inference System Model (FIS) ที่สร้างขึ้นใช้ข้อมูลจาก โครงการระบบเฝ้าระวังคุณภาพน้ำแบบ Real Time ของการประปานครหลวง [27] เป็นข้อมูล ณ สถานีวัดมะขามระหว่างวันที่ 22 ถึง 31 มกราคม 2563, 1 ถึง 20 กุมภาพันธ์ 2563, 25 ถึง 31 มีนาคม 2563 และ 15 ถึง 24 เมษายน 2563 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบมีจำนวน 1,200 ข้อมูล โดยทำการทดสอบแบบ 10-Fold Cross Validation [28] เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการคัดแยกข้อมูลค่าระดับความเค็ม ข้อมูลผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 11 และตารางที่ 4 แสดงค่าจากการทดสอบ Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าค่อนข้างต่ำ ค่าเฉลี่ย RMSE อยู่ที่ 0.58175

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการตัดสินใจค่าระดับความเค็มระหว่าง FAO Guideline และส่วนการตัดสินใจ FIS

| Salinity |       |                    |                     |     |       |                    |                     |
|----------|-------|--------------------|---------------------|-----|-------|--------------------|---------------------|
| EC       | TDS   | FAO Guide line     | Salinity FIS Result | EC  | TDS   | FAO Guide line     | Salinity FIS Result |
| 0.1      | 150   | None               | 0.100 LOW           | 1.6 | 1,300 | Slight to moderate | 0.500 MID           |
| 0.2      | 250   | None               | 0.100 LOW           | 1.8 | 1,500 | Slight to moderate | 0.623 MIDHIGH       |
| 0.4      | 350   | None               | 0.100 LOW           | 2.1 | 1,700 | Slight to moderate | 0.700 MIDHIGH       |
| 0.6      | 450   | None               | 0.100 LOW           | 2.2 | 1,900 | Slight to moderate | 0.700 MIDHIGH       |
| 0.8      | 500   | Slight to moderate | 0.300 MIDLOW        | 2.4 | 2,100 | Severe             | 0.900 HIGH          |
| 1.1      | 700   | Slight to moderate | 0.300 MIDLOW        | 2.6 | 2,300 | Severe             | 0.900 HIGH          |
| 1.2      | 900   | Slight to moderate | 0.337 MIDLOW        | 2.8 | 2,500 | Severe             | 0.900 HIGH          |
| 1.4      | 1,100 | Slight to moderate | 0.500 MID           | 3.1 | 2,700 | Severe             | 0.900 HIGH          |

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบ 10-Fold Cross Validation

| Index     | Number of Dataset | RMSE    |
|-----------|-------------------|---------|
| 1         | 120               | 0.98560 |
| 2         | 240               | 0.81650 |
| 3         | 360               | 0.56900 |
| 4         | 480               | 0.57740 |
| 5         | 600               | 0.51640 |
| 6         | 720               | 0.47140 |
| 7         | 840               | 0.57740 |
| 8         | 960               | 0.39070 |
| 9         | 1,080             | 0.48110 |
| 10        | 1,200             | 0.43200 |
| $\bar{X}$ |                   | 0.58175 |



รูปที่ 11 กราฟแสดงการทดสอบ RMSE

## 5. สรุป

โครงการวิจัยระบบเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มสำหรับพื้นที่ปลูกทุเรียนจังหวัดนนทบุรีเป็นระบบที่สร้างขึ้นจากหลักการตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic)

โดยใช้ข้อมูลคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเกษตรจาก Food and Agriculture Organization (FAO) พิจารณา ค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS (Total Dissolved Solids) ที่เป็นปัจจัยส่งผลต่อค่าความเค็ม (Salinity) ผลจากการทดสอบการตัดแยกค่าความเค็มโดยพิจารณาจากค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.58175 แสดงว่า Fuzzy Inference System Model (FIS) ที่สร้างขึ้นสามารถตัดแยกข้อมูลค่าความเค็มได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการตัดแยกค่าความเค็มที่กำหนด

ระบบดังกล่าวนอกจากจะวัดค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด TDS (Total Dissolved Solids) และค่าการนำไฟฟ้า EC (Electrical Conductivity) ได้แล้วนั้น ยังช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับค่าความเค็ม สำหรับบุคคลทั่วไปให้สามารถเข้าใจได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยมีการแบ่งระดับค่าความเค็ม (Salinity) ออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ LOW, MIDLOW, MID, MIDHIGH และ HIGH หากพัฒนาในส่วนการจัดเก็บข้อมูลเป็นหน่วยความจำแบบ Flash Memory และส่วนการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายจะเป็นประโยชน์ในการจัดเก็บและการโอนถ่ายข้อมูลเพื่อไปใช้ในอนาคตได้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดจนสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณรายได้คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ประจำปี พ.ศ.2563 รวมถึงสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ สถานที่ อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการ ในการดำเนินการวิจัย

ท้ายสุดนี้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องที่จะนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Damrongsiri, "Drink Water How saliy?," *Environmental*. vol. 25, no. 1, pp. 1-4, 2021.
- [2] ThaiPBS NEWS (2015, June 21). Seawater supports the duriannon orchard [Online]. Available: <https://news.thaipbs.or.th/content/2901>.
- [3] R.S. Ayers and D.W. Westcott, "Water quality for agricul-ture," F.A.O. Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1 FAO Rome, 1985.
- [4] L.E. Allison et al., "Diagnosis Improvement of Saline and Alkali Soils," *Agriculture Handbook* No. 60, United States Department of Agriculture, Feb 1954.
- [5] B.C. Sarker and M.W. Zaman, "Extent of Pollution Assessment in Drinking Water Supplies of Narayanganj District in Bangladesh," *Journal of Biological Sciences*, vol. 3, no. 10, pp. 854-863, 2003.
- [6] K.L. Priya, and G.P. Arulraj, "A correlation-regression model for the physiochemical parameters of the groundwater in Coimbatore city, India," *Environmental Technology*, vol 32, no. 8, pp. 731-738, 2011.
- [7] C.M. Laluraj, and G. Gopinath, "Assessment on seasonal variation of groundwater quality of Phreatic aquifers – A river basin system," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 117, pp. 45-57, 2006.
- [8] K.L. Priya, "A Fuzzy Logic Approach for Irrigation Water Quality Assessment: A Case Study of Karunya Watershed, India," *J Hydrogeol Hydrol Eng*, vol. 2, no. 1, Feb 2013.
- [9] S. Abdi, A.T. Pour, H. Shirani, M. Hamidpour and H. Shekofteh, "Assessing salinity and sodicity hazards of ground water for irrigation purposes using fuzzy logic," *Desalination Water Treatment*, vol. 57, no. 33, pp. 15547-15558, Jul. 2016.
- [10] A.S. Nasr, M. Rezaei, and M.D. Barmaki, "Analysis of Groundwater Quality using Mamdani Fuzzy Inference System (MFIS) in Yazd Province, Iran," *International Journal of Computer Applications*, vol.59, no. 7, pp. 45-53, Dec 2012.
- [11] F.M McNeill and E. Thro, *Fuzzy Logic: A Practical Approach*. Morgan Kaufmann Pub, 1994.
- [12] A. Chimnoi, (2015, Dec). Lessons from the saltwater crisis [Online]. Available: <https://www.duriannon.com/15559269>
- [13] Water Quality Management Division, "Weekly water quality situation report," Pollution control department, Mar. 25, 2013.
- [14] K. Kaewkamol, W. Chearboon, O. Thepsilpwisuit, D. Athinuwat, and B. Cherdhirunkorn, "Effect of Salinity Stress on Changing of Soil Properties and Falling Leaves of Durian cv. Kan Yao," *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 1, Jan - Feb., pp. 68-67, 2020.

- [15] L. Zadeh, "Fuzzy algorithms," *Information and Control*, vol. 12, no. 2, pp. 94–102, Feb 1968.
- [16] P. Meesad, *Fuzzy Systems and Neural Network*. 1<sup>th</sup> ed., KMUTNB Textbook Publishing Center, 2012.
- [17] D. Dubois and H. Prade, "What Are Fuzzy Rules and How to Use Them," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 84, no. 2, pp. 169–185, Dec 1996.
- [18] M. F. Azeem (Ed.) *Fuzzy Inference System - Theory and Applications*. London, United Kingdom, IntechOpen, 2012 [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/1918>
- [19] Yigang Shi and P. C. Sen, "A new defuzzification method for fuzzy control of power converters," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, 2000, pp. 1202–1209.
- [20] A.F. Rusydi, "Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 118, Feb, 2018.
- [21] Terrie K. Boguski, P.E., "Understanding Units of Measurement," Center for Hazardous Substance Research, no. 2, Oct, 2006.
- [22] C. Chavez (2021, Feb. 25). Salt Concentration in the Soil," United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. Nd. [Online]. Available: [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs144p2\\_066452.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_066452.pdf)
- [23] USA: The MathWorks, Inc. (1994-2021). Fuzzy Logic Toolbox [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>
- [24] USA: The MathWorks, Inc. (1994-2021). MATLAB [Online]. Available: <https://www.mathworks.com>
- [25] USA: The MathWorks, Inc. (1994-2021). Simulink coder [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/simulink-coder.html>
- [26] STMicroelectronics, "Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU," STM32F401 datasheet, Jan. 2015 [Revised 3].
- [27] Thailand: Metropolitan Waterworks Authority (2014). Real Time Water Quality Surveillance System Project of the Metropolitan Waterworks Authority [Online]. Available: <http://rwc.mwa.co.th/page/home>.
- [28] T. Gunasegaran and Y. Cheah, "Evolutionary cross validation," in *8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, 2017, pp. 89–95.



การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยน  
ความร้อนแบบท่อกลมที่ติดตั้งแผ่นปีกสามเหลี่ยมกับแผ่นปีกสามเหลี่ยมพรุน  
Comparison of Heat Transfer and Pressure loss between Circular Tube  
Heat Exchanger Installed the Delta-Winglet Tapes  
and Perforated Delta-Winglet Tapes

นิวัฒน์ เกตุชาติ<sup>1,2\*</sup> นพรัตน์ อมัตติรัตน์<sup>2</sup> บัณฑิต กฤตาคม<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (DiTo-Lab)

<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

<sup>3</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
นครราชสีมา 30000

Niwat Ketchat<sup>1,2\*</sup> Nopparat Amattirat<sup>2</sup> Bundit Krittacom<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory (DiTo-Lab)

<sup>2</sup>Department of Energy and Air Conditioning Engineering, Faculty of Engineering and Technology,  
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima, 30000

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology,  
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima, 30000

\*Corresponding author Email: Niwat.ke@rmu.ac.th

(Received: October 18, 2022; Revised: January 25, 2023 ; Accepted: March 16, 2023)

#### บทคัดย่อ

การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม ที่ทำการติดตั้งแผ่นปีกสามเหลี่ยม (DWT) กับแผ่นปีกสามเหลี่ยมพรุน (P-DWT) ที่มีมุมปะทะปีก ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $45^\circ$  สัดส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $B_R$ ) มี 2 ค่าคือ 0.20 และ 0.30 และสัดส่วนระยะพิชต์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $P_R$ ) มี 3 ค่า คือ 1, 2 และ 3 การศึกษากระทำภายใต้สภาวะพลาซความร้อนที่ผิวท่อคงที่ อากาศถูกใช้เป็นของไหลทดสอบซึ่งไหลผ่านท่อแสดงในพจน์ของเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ในช่วง 4,300-24,000 การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันแสดงในเทอมของเลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ) และตัวประกอบความเสียดทาน ( $f$ ) จากการทดลองพบว่าค่า  $Nu$  และ  $f$  มีค่าสูงขึ้นตาม  $B_R$  เพิ่มมากขึ้น และ  $P_R$  มีค่าลดลง ในขณะเดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $Nu$  และ  $f$  ระหว่างปีกแบบ DWT กับปีกแบบ P-DWT พบว่าปีกแบบ DWT จะให้ค่า  $Nu$  สูงกว่า ปีกแบบ P-DWT เนื่องจากผลของร่องเจาะในปีกแบบ P-DWT แม้จะทำให้ความรุนแรงในการไหลของของไหลลดลงเล็กน้อย แต่ก็สามารถส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามปีกแบบ P-DWT สามารถลด  $f$  ได้ดีกว่าปีก DWT ส่งผลให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) ของการทดสอบในกรณีใส่ปีก P-DWT จะมีค่าสูงกว่าปีก DWT โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.69-1.12 และมีค่าสูงสุดในกรณี  $B_R = 0.30$  และ  $P_R = 1$

**คำสำคัญ:** เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แผ่นปีกสามเหลี่ยม การถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน

### ABSTRACT

The heat transfers and pressure loss between the circular tube heat exchanger installed Delta-Winglet Tape (DWT) and the Perforated Delta-Winglet Tape (P-DWT) were compared. The winglet inclination angle ( $\alpha$ ) was kept at  $45^\circ$ . Two winglet blockage ratios ( $B_R$ ) of 0.20 and 0.30 were examined. Three relative winglet pitches ( $P_R$ : 1, 2, and 3) were conducted. The experiment was conducted in the tube heat exchanger having a uniform heat flux wall. Air was used as the working fluid flowing through the tube for a Reynolds number of about 4,300 – 24,000. The heat transfer and pressure loss were presented in terms of Nusselt number (Nu) and friction factor (f), respectively. From the experiment, it was found that the Nu and f were increased as increasing  $B_R$  and decreasing  $P_R$ . For comparison of the DWT and P-DWT, the DWT wing gave a higher Nu value than the P-DWT due to the effect of bores on the P-DWT. Although the intensity of the fluid flow passing the P-DWT was slightly reduced, a decreased heat transfer was obtained. In contrast, the f value of the P-DWT can be reduced better than the DWT resulting in the thermal enhancement factor (TEF) of the P-DWTs gave higher than the DWT. The TEF of the P-DWT was in the range of 0.69-1.12 and the maximum TEF regarded as the optimum point was achieved at  $B_R = 0.30$  and  $P_R = 0.10$ .

**Keyword:** Heat Exchanger, Delta-Winglet Tape, Heat Transfer, Pressure Loss.

### 1. บทนำ

ในงานทางวิศวกรรมหลายประเภทต้องอาศัยกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกัน เช่น การระบายความร้อนของหม้อน้ำในรถยนต์ การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคอยล์เย็นกับอากาศ การแปรรูปอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลเหล่านี้ล้วนใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ด้วยเหตุนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงถูกพัฒนาให้มีสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปแบ่งออกได้ 3 ประเภท [1], [2] คือ 1) Active เป็นการนำพลังงานภายนอกเข้ามาช่วยในการกระตุ้น เช่น การใช้พลังงานกลที่ทำให้เกิดการสั่นของของไหล หรือการทำให้เกิดการสั่นที่ผิว 2) Passive เป็นการนำพลังงานที่สร้างขึ้นเอง เช่น การเพิ่มพื้นที่ผิว การทำให้ผิวขรุขระ เพิ่มอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนหรือหมุนควง

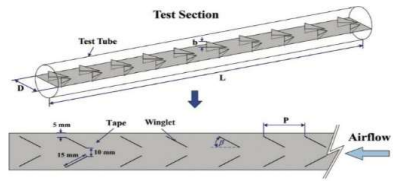
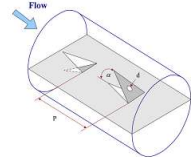
3) Compound เป็นการรวม Active กับ Passive เข้าด้วยกัน เช่น การใช้พลังงานกลที่ทำให้เกิดการสั่นของของไหลพร้อมกับการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนหรือหมุนควง แต่วิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากคือ Passive เนื่องจากสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย รวมถึงประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่สูง โดยเฉพาะการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนหรือหมุนควง ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้สามารถเพิ่มระดับความปั่นป่วนให้แก่ของไหลและสารทำงานภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแผ่นใบบิด (Twist Tape) [3]-[9] พบว่าสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบแต่การสูญเสียความดันก็เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ต่อมาได้มีการนำเสนอการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย

การใส่วงแหวน (Ring) [10]-[14] พบว่าการใส่วงแหวนแบบต่าง ๆ จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นปีกและครีบบนผิวท่อต่าง ๆ เช่น การถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ติดตั้งแผ่นปีกสามเหลี่ยมเจาะรู (Punched Delta-Winglet) [15]-[19] แผ่นปีกสามเหลี่ยม (Delta-Winglet) [20]-[22] แผ่นปีกรูปตัววี (V-Shaped Winglet) [23]-[26] แผ่นกั้นรูปตัววี (V-Blockages) [27]-[33] ซึ่งพบว่าการใส่อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนเหล่านี้สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าท่อผิวเรียบอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียความดันก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน โดยลักษณะครีบบนผิวท่อในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอข้างต้นสามารถแสดงดังตารางที่ 1

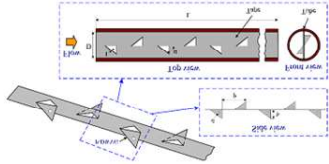
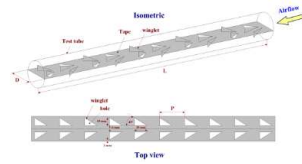
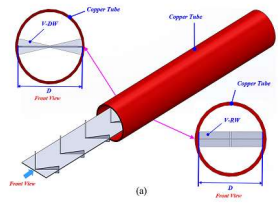
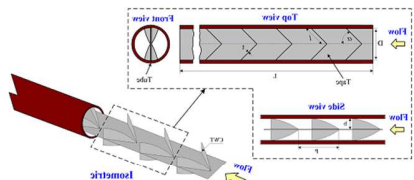
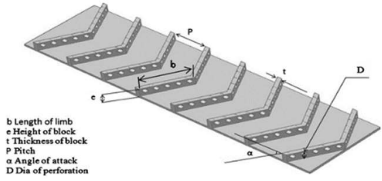
จากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าการใส่แผ่นปีกและครีบบนผิวท่อสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนหรือหมุนควงชนิดอื่น ๆ (แผ่นใบพัด และวงแหวน) นอกจากนี้

ยังพบว่าการเจาะรู รวมทั้งการเพิ่มช่องว่างระหว่างแผ่นปีกหรือครีบนั้นยังสามารถลดความดันตกคร่อมหรือการสูญเสียความดันที่เกิดจากการไหลปะทะกับแผ่นปีกหรือครีบบนผิวท่อโดยตรง [25], [31]-[33] ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นยังมีข้อมูลดังกล่าวค่อนข้างน้อยโดยเฉพาะการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันระหว่างกรณีติดตั้งแผ่นปีกทั่วไปกับแผ่นปีกพ่น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งก่อนการนำไปใช้งานจริง เพื่อให้มั่นใจในสมรรถนะของระบบและเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการตัดสินใจเลือกนำไปใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันระหว่างกรณีติดตั้งแผ่นปีกสามเหลี่ยม (Delta-Winglet Tape; DWT) กับแผ่นปีกสามเหลี่ยมพ่น (Perforated Delta-Winglet Tape; P-DWT) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม นอกจากนี้ผลที่ได้จากการทดสอบยังสามารถนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้ได้รับประโยชน์สูงสุดจากการใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

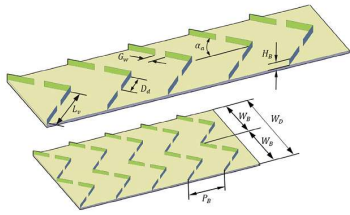
ตารางที่ 1 ตารางลักษณะการจัดวางครีบบนผิวท่อและแผ่นปีก

| นักวิจัย                         | พารามิเตอร์                                                                                        | ผลที่ได้                                                          | ลักษณะรูปทรง                                                                          |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| P. Hoonpong และ S. Skullong [2]  | $Re = 4,200-$<br>$25,800$<br>$B_R = 0.1, 0.15,$<br>$0.2$<br>$P_R = 1, 2, 3$<br>$\alpha = 45^\circ$ | $Nu/Nu_0 = 4.06$<br>$f/f_0 = 31.63$<br>$TEF = 1.51$               |   |
| P. Hoonpong และ S. Skullong [15] | $Re = 4,100-$<br>$25,500$<br>$d = 5$ มม.<br>$\alpha = 20^\circ-60^\circ$<br>$P/D = 3$              | $Nu/Nu_0 = 2.54-$<br>$3.38$<br>$f/f_0 = 8.6-24.2$<br>$TEF = 1.36$ |  |

ตารางที่ 1 ตารางลักษณะการจัดวางครีบลูกและแผ่นปีก (ต่อ)

| นักวิจัย                         | พารามิเตอร์                                                                                        | ผลที่ได้                                                            | ลักษณะรูปทรง                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C. Khanoknainyaakarn และคณะ [16] | $Re = 4,150-25,500$<br>$B_R = 0.1, 0.15, 0.20$<br>$P_R = 2, 3$<br>$\alpha = 45^\circ$              | $Nu/Nu_0 = 3.1-4.01$<br>$f/f_0 = 11.44-34.23$<br>$TEF = 1.39-1.48$  |                                                                                                                                                               |
| N. Koolnapadol และคณะ [21]       | $Re = 4,100-25,400$<br>$P_R = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$<br>$\alpha = 45^\circ$                      | $Nu/Nu_0 = 2.98-4.30$<br>$f/f_0 = 10.01-36.34$<br>$TEF = 1.22-1.55$ |                                                                                                                                                               |
| P. Promvonge และคณะ [23]         | $Re = 4,200-25,800$<br>$B_R = 0.1, 0.15, 0.20$<br>$P_R = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$                       | $Nu/Nu_0 = 4.58-5.09$<br>$f/f_0 = 47.93$<br>$TEF = 1.82 - 2.0$      |                                                                                                                                                              |
| S. Skullong และคณะ [25]          | $Re = 4,200-25,800$<br>$R_p=0.5-1.5$<br>$R_B=0.2$<br>$\theta = 10^\circ-90^\circ$                  | $Nu/Nu_0 = 3.16-4.27$<br>$f/f_0 = 4.21-13.48$<br>$TEF = 2.48$       |                                                                                                                                                             |
| T. Alam และคณะ [31]              | $Re = 2,000-20,000$<br>$e/H = 0.5-1.0$<br>$P/e = 4-12$<br>$\beta = 5-25\%$<br>$\chi = 30-75^\circ$ | $Nu/Nu_0 = 4.16-7.78$<br>$f/f_0 = 7.00-12.00$                       |  <p> b Length of limb<br/> e Height of block<br/> t Thickness of block<br/> P Pitch<br/> <math>\alpha</math> Angle of attack<br/> D Dia of perforation </p> |

ตารางที่ 1 ตารางลักษณะการจัดวางครีบบและแผ่นปีก (ต่อ)

| นักวิจัย             | พารามิเตอร์                                                                                                                                                                                     | ผลที่ได้                                                   | ลักษณะรูปทรง                                                                       |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| A. Kumar และคณะ [32] | $Re = 3,000-$<br>$80,000$<br>$H_B/H_0 = 0.25-$<br>$1.0$<br>$P_B/H_B = 8-12$<br>$D_d/L_v = 0.27-$<br>$0.77$<br>$G_w/H_B = 0.50-$<br>$1.5$<br>$\alpha_a = 30^\circ-70^\circ$<br>$W_D=W_B 1.0-6.0$ | $Nu/Nu_0 = 6.25-$<br>$7.96$<br>$f/f_0 = 13.04-$<br>$14.44$ |  |

## 2. รายการสัญลักษณ์

|            |                                                      |
|------------|------------------------------------------------------|
| A          | พื้นที่การถ่ายเทความร้อน [ $m^2$ ]                   |
| b          | ความสูงปีก [m]                                       |
| $B_R$      | อัตราส่วนความสูงของปีก [-]                           |
| $C_p$      | ค่าความจุความร้อนจำเพาะ [ $kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ]    |
| D          | เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ [m]                     |
| f          | ค่าตัวประกอบความเสียดทาน [-]                         |
| h          | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ]    |
| k          | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน [ $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ] |
| L          | ความยาวท่อช่วงทดสอบ [m]                              |
| $\dot{m}$  | อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล [ $kg\ s^{-1}$ ]         |
| Nu         | เลขนัสเซิลต์ [-]                                     |
| $\Delta P$ | ความดันตกคร่อมบริเวณท่อทดสอบ [kPa]                   |
| p          | ระยะพิตช์ [m]                                        |
| $P_R$      | อัตราส่วนระยะพิตช์ [-]                               |
| Q          | อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]                           |
| Re         | เลขเรย์โนลด์ [-]                                     |
| TEF        | ค่าตัวประกอบการส่งเสริมเชิงความร้อน [-]              |
| T          | อุณหภูมิ [ $^\circ C$ ]                              |
| $\bar{T}$  | อุณหภูมิเฉลี่ย [ $^\circ C$ ]                        |
| U          | ความเร็วเฉลี่ย [ $m\ s^{-1}$ ]                       |

## คำย่อ

|       |                                     |
|-------|-------------------------------------|
| DWT   | แผ่นปีกสามเหลี่ยม                   |
| P-DWT | แผ่นปีกสามเหลี่ยมพรุน               |
| TEF   | ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน [-] |

## สัญลักษณ์กรีก

|          |                                          |
|----------|------------------------------------------|
| $\alpha$ | มุมปะทะปีก [ $^\circ$ ]                  |
| $\rho$   | ความหนาแน่นของของไหล [ $kg\ m^{-3}$ ]    |
| $\nu$    | ความหนืดเชิงกลของอากาศ [ $m^2\ s^{-1}$ ] |

## ตัวกำกับล่าง

|      |               |
|------|---------------|
| air  | อากาศ         |
| b    | ของไหลเฉลี่ย  |
| conv | การพาความร้อน |
| i    | ทางเข้า       |
| o    | ทางออก        |
| w    | ผิวท่อ        |
| 0    | ท่อผิวเรียบ   |

## 3. การคำนวณ

การไหลของของไหลทดสอบ (อากาศ) ผ่านชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แสดงในเทอมของ

เลขเรย์โนลด์ (Reynold Number, Re) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ (1)

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1)$$

สมดุลความร้อนระหว่างความร้อนที่อากาศได้รับ ( $Q_{air}$ ) และความร้อนจากการพาความร้อน ( $Q_{conv}$ ) แสดงดังสมการที่ (2)

$$Q_{air} = Q_{conv}; \dot{m}C_p(T_o - T_i) = hA(\bar{T}_w - T_b) \quad (2)$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient, h) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ (3)

$$h = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A(\bar{T}_w - T_b)} \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } T_b = (T_o + T_i) / 2 \quad \text{และ} \quad \bar{T}_w = \sum T_w / 12$$

การถ่ายเทความร้อนที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เกิดจากกระบวนการพาความร้อนที่ใช้อากาศเป็นของไหลใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ได้ รับโดยของไหลทำงานกับปริมาณการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และทำการนำเสนอค่าการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ในรูปตัวแปรไร้มิติเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number, Nu) ซึ่งเป็นอัตราส่วนการพาความร้อนต่อการนำความร้อนภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใด ๆ แสดงดังสมการที่ (4)

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4)$$

ค่าตัวประกอบความเสียดทานเป็นตัวแปรไร้มิติของความดันตกคร่อมสำหรับการไหลภายในท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวใด ๆ ดังแสดงสมการที่ (5)

$$f = \frac{2}{(L/D)} \frac{\Delta P}{\rho U^2} \quad (5)$$

การประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะแสดงในเทอมของตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) จากเอกสารอ้างอิง [2], [23], [25] โดยนิยามจากอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวทดสอบ (h) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวเรียบ ( $h_0$ ) ซึ่งพิจารณาที่กำลังขับเดียวกัน ดังแสดงสมการที่ (6)

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = \left( \frac{Nu}{Nu_0} \right) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (6)$$

เพื่อความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือของการทดสอบ จึงได้ทำการทดสอบท่อเปล่าผนังเรียบเพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่แสดงในเทอมของเลขนัสเซลท์ (Nu) การสูญเสียความดันที่แสดงในเทอมของตัวประกอบความเสียดทาน (f) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ในอดีต จากเอกสารอ้างอิง [2], [23], [25] โดยผลของ Nu ที่ได้จากการทดลองจะนำไปเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ดังแสดงในสมการที่ (7) ในขณะที่ผลของ f จะนำไปเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Petukhov ดังแสดงในสมการที่ (8)

สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

สหสัมพันธ์ของ Petukhov

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (8)$$

#### 4. ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

##### 4.1 ชุดทดลอง

อุปกรณ์ชุดทดสอบเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมจะแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ พัดลมแรงดันสูง (High Pressure Blower) โรตاميเตอร์ (Rotameter) อุปกรณ์จัดระเบียบการไหล (Flow Straightener) ชุดปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) ชุดทดสอบ (Test Section) ชิ้นงานทดสอบโดยจะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (K-Type Thermocouple) มานอมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital Manometer) หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Variac Transformer) เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger)

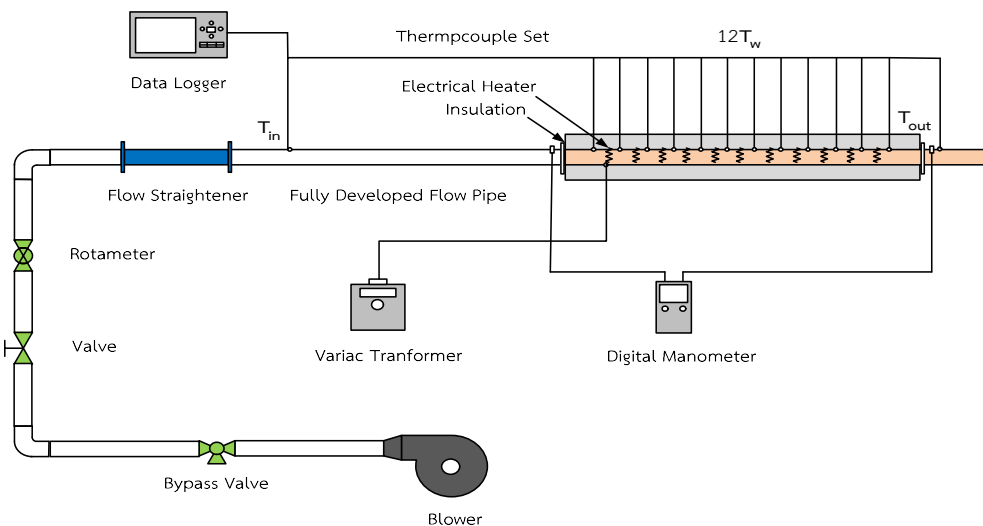
##### 4.2 แผ่นปีกสามเหลี่ยม

แผ่นปีกสามเหลี่ยมพรันจะติดตั้งในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2 โดยแผ่นปีกสามเหลี่ยม (Delta-Winglet Tapes ; DWT) กับแผ่นปีกสามเหลี่ยมพรัน (Perforated Delta-Winglet Tapes ; P-DWT) ที่ทำการศึกษาจะมีเงื่อนไขในการทดลองสามารถสรุปได้ดัง

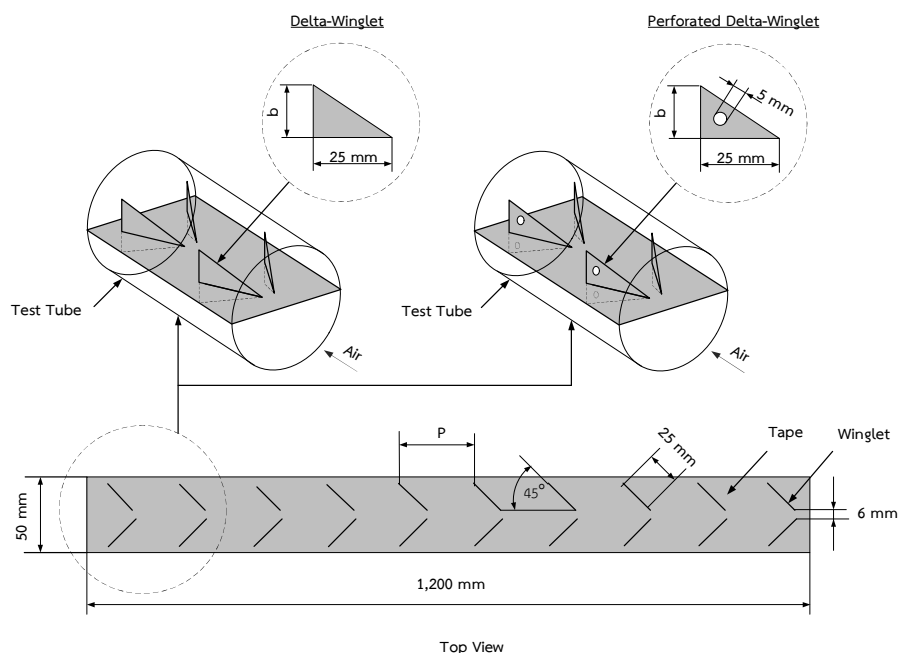
ตารางที่ 2 ซึ่งท่อทดสอบถูกทำให้ร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat fluxed) ด้วยขดลวดไฟฟ้าตลอดความยาวของท่อทดสอบ และทำการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกสู่บรรยากาศ

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลองและแผ่นปีกสามเหลี่ยม

| พารามิเตอร์                                        | เงื่อนไขการทดลอง                     |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| ประเภทแผ่นปีก                                      | DWT และ P-DWT                        |
| อากาศไหลผ่านชุดทดสอบแสดงในเทอมของเลขเรย์โนลด์ (Re) | 4,300-24,000                         |
| มุมปะทะปีก ( $\alpha$ ) [2]                        | 45°                                  |
| ความหนาแผ่นปีก [2]                                 | 0.5 mm.                              |
| รูเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) [15]             | 5 mm.                                |
| สัดส่วนความสูงของปีก ( $B_p$ )                     | 0.20, 0.30                           |
| สัดส่วนระยะพิทช์ ( $P_p$ )                         | 1, 2, 3                              |
| ขนาดแผ่นบาง กว้าง x ยาว x หนา                      | 50.8 x 1,200 x 0.5 mm <sup>3</sup> . |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทดสอบ (D) [2]              | 50 mm.                               |
| ความยาวของท่อทดสอบ (L) [2]                         | 1,200 mm.                            |



รูปที่ 1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม



รูปที่ 2 แผ่นปีกสามเหลี่ยม

#### 4.3 วิธีการทดลอง

จากส่วนประกอบทั้งหมดของชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม จะมีหลักการทำงานดังนี้ พัดลมแรงดันสูงทำหน้าที่ขับเคลื่อนของไหล (อากาศ) ผ่านโรตاميเตอร์ (Rotameter) ซึ่งเป็นตัววัดอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ จากนั้นจะเข้าสู่อุปกรณ์จัดระเบียบการไหล (Flow Straightener) ทำหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศและเข้าสู่ช่วงปรับสภาพการไหลที่มีความยาวมากพอให้อากาศปรับสภาพการไหลให้มีลักษณะพัฒนาเต็มท่อ (Fully Developed Flow) ก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ ท่อทองแดงที่ใช้ในการทดสอบถูกติดตั้งด้วยขดลวดความร้อนแบบฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater) และทำการจ่ายความร้อนให้แก่ท่อทดสอบแบบสภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Heat Flux) และท่อทองแดงจะถูกหุ้มฉนวนอย่างดี เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศ โดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-Type Thermocouple) จำนวน 14 ตัว จะถูกติดตั้งที่ผิวท่อด้านบน 12 ตัว และวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของท่อทดสอบอีก 2 ตัว จากนั้นจะส่งสัญญาณไปยังระบบเก็บข้อมูลรุ่น HIOKI LR8431-20 นอกจากนั้นค่า

ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) จะถูกวัดที่ทางเข้าและทางออกชุดทดสอบ ด้วยดิจิตอลมานอมิเตอร์ รุ่น Testo 510

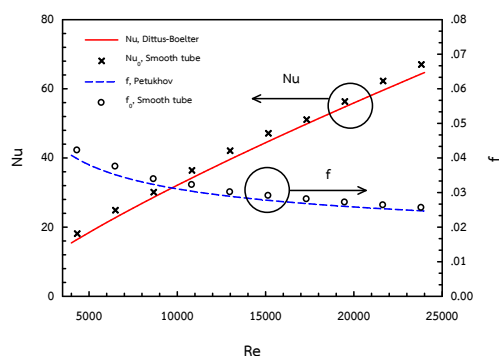
#### 5. ผลการทดลอง

##### 5.1 การทดสอบท่อผิวเรียบ

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  และ  $Re$  จากผลการทดสอบท่อผิวเรียบ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่า  $Nu$  จากผลการทดลองกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และค่า  $f$  จากผลการทดลองกับสมการสหสัมพันธ์ของ Petukhov สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่า  $Nu$  จากการทดลองจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและยังมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณจากสมการสหสัมพันธ์ ซึ่งพบว่า  $Re$  เพิ่มขึ้นจะทำให้  $Nu$  มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับค่าตัวประกอบความเสียดทาน ( $f$ ) จากการทดลองพบว่าค่า  $f$  จากการทดลองจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับสมการสหสัมพันธ์และยังมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่  $Re$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า  $f$  ลดลง ดังนั้นจากการตรวจสอบค่า  $Nu$  และ  $f$  แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์การ



ทดลองในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 3 การทดสอบท่อผิวเรียบ

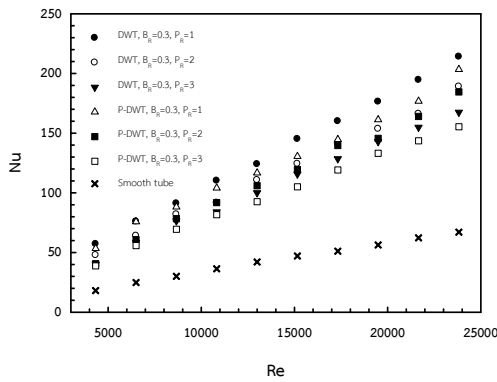
### 5.1 อิทธิพลของ $P_R$ ต่อการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนในเทอมของ  $Nu$  กับความเร็วของของไหล (อากาศ) ในเทอมของ  $Re$  จากการทดลองพบว่าค่า  $Nu$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม  $Re$  เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่แผ่นปีกสามเหลี่ยมทุกกรณีจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อค่า  $Re$  ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดกระแสการไหลแบบปั่นป่วนหรือหมุนวน ซึ่งจะไปรบกวนการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อนที่ผิวท่อทดสอบจึงทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น โดยการทดลองจะดำเนินการด้วยการสอดใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบแผ่นปีกสามเหลี่ยม (Delta-Winglet Tapes; DWT) กับแผ่นปีกสามเหลี่ยมพรูณ (Perforated Delta-Winglet Tapes; P-DWT) ที่สภาวะการทดลอง  $B_R = 0.3$  จากการทดลองพบว่า การติดตั้ง DWT กับ P-DWT ภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเพิ่ม  $Nu$  ได้อย่างดีเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าพิจารณาที่  $Re$  คงที่ใด ๆ ทุกค่า  $Re$  จะมีแนวโน้มที่เพิ่มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ค่า  $P_R$  มีค่าลดลง ทำให้ค่า  $Nu$  มีค่าเพิ่มขึ้น โดย  $P_R = 1$  ให้ค่า  $Nu$  สูงสุดในกรณีทดสอบ ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่

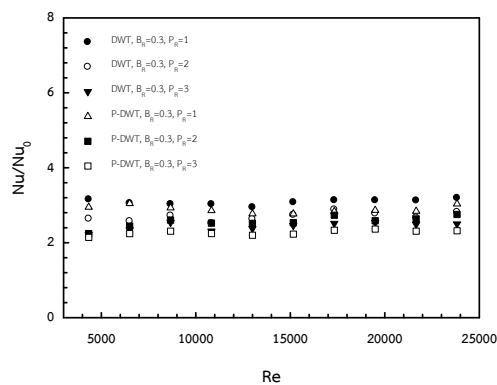
ผ่านมา (เอกสารอ้างอิง [2], [23]) ที่ได้อธิบายไว้ว่าปีกที่มีระยะพิตซ์น้อยหรือถี่จะมีระดับการไหลหมุนควงตามแนวกระแสการไหล (Longitudinal Vortex Generator) ที่แข็งแรงกว่ากรณีระยะพิตซ์ค่ามากหรือห่าง ทำให้สามารถขัดขวางการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal Boundary Layer) บริเวณผิวท่อได้ส่งให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient ;  $h$ ) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $Nu$  ระหว่างปีกแบบ DWT กับปีกแบบ P-DWT ที่  $Re$  และ  $P_R$  คงที่ใด ๆ พบว่าปีกแบบ DWT จะให้ค่า  $Nu$  สูงกว่า ปีกแบบ P-DWT เล็กน้อย เนื่องจากผลของรูเจาะในปีกแบบ P-DWT จะทำให้ความรุนแรงในการไหลของของไหลลดลงเล็กน้อย ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$  จากรูปที่ 5 พบว่า  $Nu/Nu_0$  มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของค่า  $Re$  ของปีกทั้งสองแบบ (DWT & P-DWT) นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $Nu/Nu_0$  ระหว่างปีก DWT กับปีก P-DWT ที่ค่า  $Re$  คงที่ พบว่าค่า  $Nu/Nu_0$  ของปีก DWT มีค่าสูงกว่าปีก P-DWT โดยที่ระยะพิตซ์  $P_R = 1, 2$  และ 3 พบว่าปีก DWT มีค่า  $Nu/Nu_0$  อยู่ในช่วง 3.15-3.19, 2.64-2.82 และ 2.22-2.50 ตามลำดับ และปีก P-DWT มีค่า  $Nu/Nu_0$  อยู่ในช่วง 2.95-3.03, 2.24-2.75 และ 2.14-2.32 ตามลำดับ

### 5.2 อิทธิพลของ $B_R$ ต่อการถ่ายเทความร้อน

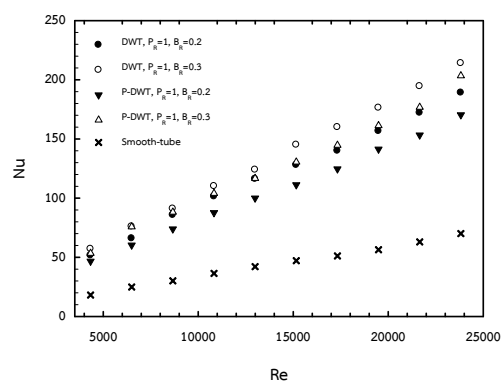
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Nu$  กับ  $Re$  ที่สภาวะการทดลอง  $P_R = 1$  จากการทดลองพบว่าค่า  $Nu$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม  $Re$  เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองทุกกรณีจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าพิจารณาที่  $Re$  คงที่ใด ๆ โดย  $Nu$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนความสูงของปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $B_R$ ) เพิ่มขึ้น  $B_R = 0.30$  ให้ค่า  $Nu$  สูงสุดในกรณีทดสอบ เนื่องจากกรณีปีกที่มีค่าความสูงมากจะมีระดับการไหล



รูปที่ 4 อิทธิพลของ  $P_R$  ต่อ Nu



รูปที่ 5 อิทธิพลของ  $P_R$  ต่อ  $Nu/Nu_0$



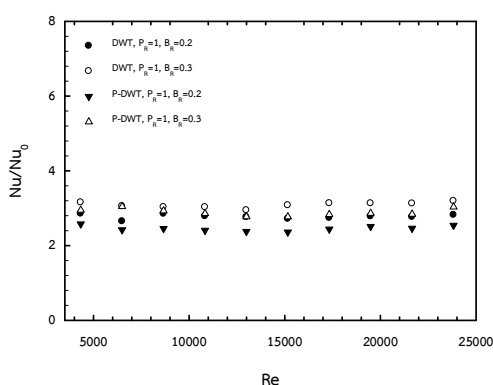
รูปที่ 6 อิทธิพลของ  $B_R$  ต่อ Nu

หมุนควงตามแนวกระแสการไหลที่คล้ายกับกรณี  
ระยะพิตซ์ต่ำ ๆ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ถูกอธิบายไว้  
ในรูปที่ 4 แล้วจึงไม่ขอกล่าวซ้ำอีก ในขณะเดียวกันเมื่อทำ  
การเปรียบเทียบค่า Nu ระหว่างปีกแบบ DWT กับปีก  
แบบ P-DWT ที่  $Re$  และ  $B_R$  คงที่ใด ๆ พบว่าปีกแบบ  
DWT จะให้ค่า Nu สูงกว่า ปีกแบบ P-DWT เนื่องจากผล  
ของรูเจาะในปีกแบบ P-DWT โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการ  
เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$  จาก  
รูปที่ 7 พบว่า  $Nu/Nu_0$  มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย  
ตามการเพิ่มขึ้นของค่า  $Re$  ของปีกทั้งสองแบบ (DWT &  
P-DWT) และเปรียบเทียบค่า  $Nu/Nu_0$  ที่ค่า  $Re$  คงที่  
พบว่าค่า  $Nu/Nu_0$  ของปีก DWT มีค่าสูงกว่าปีก P-DWT  
โดยปีก DWT ที่  $B_R = 0.30$  มีค่า  $Nu/Nu_0$  อยู่ในช่วง 3.15-  
3.19 และ  $B_R = 0.20$  มีค่า  $Nu/Nu_0$  อยู่ในช่วง 2.82-2.85  
ขณะที่ปีก P-DWT ที่  $B_R = 0.30$  มีค่า  $Nu/Nu_0$  อยู่ในช่วง  
2.95-3.03 และ  $B_R = 0.20$  มีค่า  $Nu/Nu_0$  อยู่ในช่วง 2.54-  
2.58

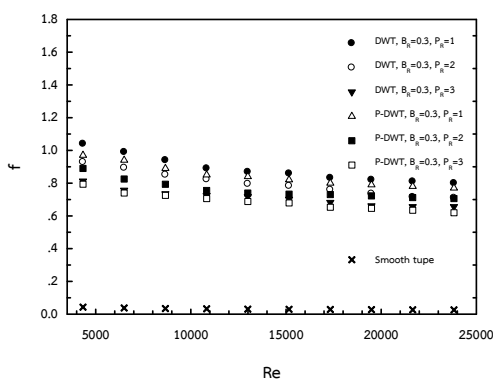
### 5.3 อิทธิพลของ $P_R$ ต่อความเสียดทานเนื่องจากการ ไหล

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเสียดทาน  
เป็นตัวแปรไร้มิติของความดันตกคร่อม ( $f$ ) กับ  $Re$  แสดง  
ดังรูปที่ 8 พบว่าค่า  $f$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้น  
ซึ่งผลการทดลองที่แผ่นปีกสามเหลี่ยมทุกกรณีจะมี  
แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าถ้า  
พิจารณาที่  $Re$  คงที่ใด ๆ โดยการใส่ปีก DWT ภายในท่อ  
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่  $P_R = 1$  มีค่า  $f$  สูงสุดในกรณี  
ทดสอบ เนื่องจากการใส่แผ่นปีกที่มีระยะพิตซ์ที่ถี่ขัดขวาง  
กระแสการไหลของของไหล ทำให้มีระดับความปั่นป่วน  
ภายในท่อทดสอบสูง ส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อม ( $\Delta P$ )  
เพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีปีกที่มีระยะพิตซ์ห่าง ในขณะเดียวกัน  
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $f$  ระหว่างปีก DWT กับปีก P-  
DWT ที่  $Re$  และ  $P_R$  คงที่ใด ๆ พบว่าปีกแบบ P-DWT จะ  
ให้ค่า  $f$  ต่ำกว่า ปีกแบบ DWT เนื่องจากการเจาะรูในปีก  
P-DWT สามารถลด  $\Delta P$  ได้ดีกว่าปีก DWT ซึ่งมีแนวโน้ม  
ไปในทิศทางเช่นเดียวกันกับงานวิจัยที่ผ่านมา

(เอกสารอ้างอิง [25] ) โดยงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  กรณีใส่ปีก DWT กับปีก P-DWT ภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังรูปที่ 9 พบว่า ค่า  $f/f_0$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตาม  $Re$  ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองทุกกรณีจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $f/f_0$  ระหว่างปีก DWT กับปีก P-DWT ที่ค่า  $Re$  คงที่ พบว่าค่า  $f/f_0$  ของปีก P-DWT มีค่าต่ำกว่าปีก DWT โดยที่ระยะพิตช์  $P_R = 1, 2$  และ  $3$  พบว่าปีก P-DWT มีค่า  $f/f_0$  อยู่ในช่วง 22.93-30.10, 21.10-27.60 และ 18.80-24.20 ตามลำดับ และปีก DWT มีค่า  $f/f_0$  อยู่ในช่วง 24.95-31.50, 22.02 - 27.75 และ 19.27-25.65 ตามลำดับ



รูปที่ 7 อิทธิพลของ  $B_R$  ต่อ  $Nu/Nu_0$



รูปที่ 8 อิทธิพลของ  $P_R$  ต่อ  $f$

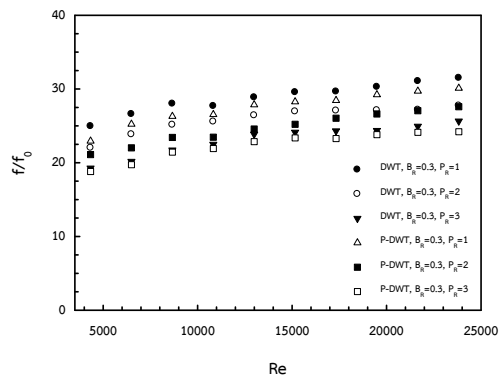
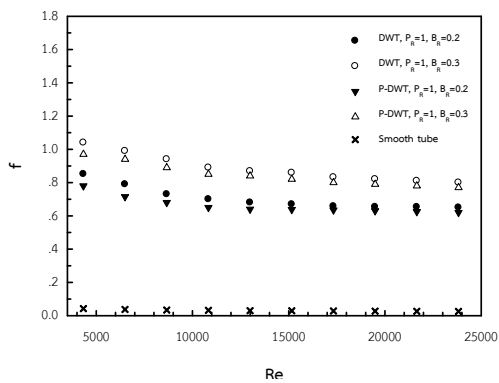
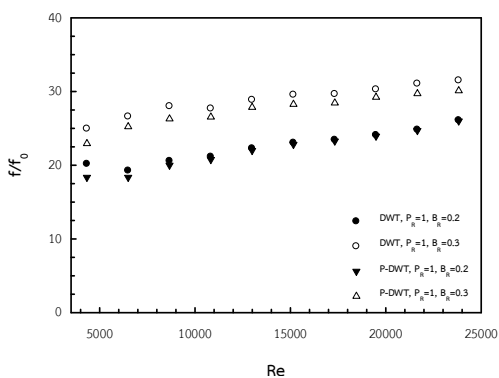
#### 5.4 อิทธิพลของ $B_R$ ต่อความเสียดทานเนื่องจากการไหล

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $Re$  แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าค่า  $f$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่แผ่นปีกสามเหลี่ยมทุกกรณีจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ยังถ้าพิจารณาที่  $Re$  คงที่ใด ๆ พบว่าการใส่แผ่นปีกทั้งสองกรณี (DWT & P-DWT) ภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่  $B_R = 0.30$  มีค่า  $f$  สูงสุดในกรณีทดสอบ เนื่องจากการใส่แผ่นปีกที่มีค่าความสูงมากจะขัดขวางกระแสการไหลของของไหล ส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อม ( $\Delta P$ ) เพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีปีกที่มีค่าความสูงน้อย ในขณะเดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $f$  ระหว่างปีก DWT กับปีก P-DWT ที่  $Re$  และ  $B_R$  คงที่ใด ๆ พบว่าปีกแบบ P-DWT จะให้ค่า  $f$  ต่ำกว่า ปีกแบบ DWT เนื่องจากผลของการเจาะรูในปีก P-DWT สามารถลด  $\Delta P$  ได้ดีกว่าปีก DWT เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา (เอกสารอ้างอิง [25] ) โดยงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  จากรูปที่ 11 พบว่า  $f/f_0$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามค่า  $Re$  ทุกกรณี นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $f/f_0$  ระหว่างปีก DWT กับปีก P-DWT ที่ค่า  $Re$  คงที่ พบว่าปีก P-DWT สามารถลดค่า  $f/f_0$  ได้ดีกว่าปีก DWT โดยปีก P-DWT ที่  $B_R = 0.30$  มีค่า  $f/f_0$  อยู่ในช่วง 22.93-30.10 และ  $B_R = 0.20$  มีค่า  $f/f_0$  อยู่ในช่วง 18.35-26.00 ขณะที่ปีก DWT ที่  $B_R = 0.30$  มีค่า  $f/f_0$  อยู่ในช่วง 24.95-31.50 และ  $B_R = 0.20$  มีค่า  $f/f_0$  อยู่ในช่วง 20.18-26.10

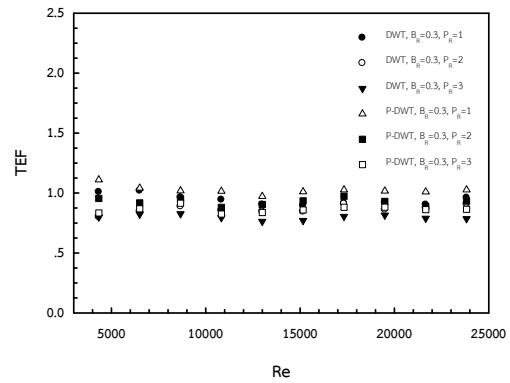
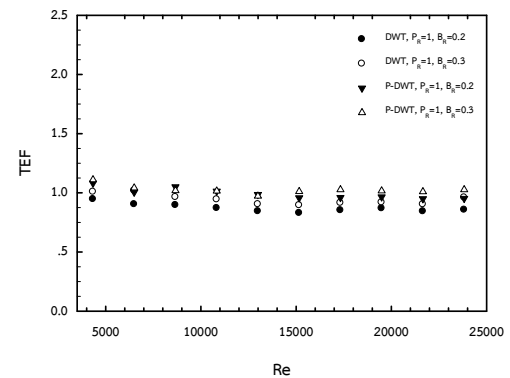
#### 5.5 อิทธิพลของ $P_R$ และ $B_R$ ต่อ TEF

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) ซึ่งพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของแหล่งจ่าย (พัดลมแรงดันสูง) กับค่า  $Re$  แสดงดังรูปที่ 12 พบว่าค่า TEF มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของค่า  $Re$  ในขณะเดียวกันงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่าง TEF ที่ค่า  $P_R$  ใด ๆ ระหว่างปีก DWT กับปีก P-DWT ที่ค่า  $Re$  คงที่ พบว่าปีก P-DWT จะ

ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2565 – มีนาคม พ.ศ. 2566

รูปที่ 9 อิทธิพลของ  $P_R$  ต่อ  $f/f_0$ รูปที่ 10 อิทธิพลของ  $B_R$  ต่อ  $f$ รูปที่ 11 อิทธิพลของ  $B_R$  ต่อ  $f/f_0$ 

มีค่า TEF สูงกว่าค่าปีก DWT นอกจากนี้ถ้าพิจารณาอิทธิพลของ  $B_R$  ต่อ TEF แสดงดังรูปที่ 13 โดยทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่าง TEF ที่ค่า  $B_R$  ใด ๆ ระหว่างปีก DWT กับปีก P-DWT ที่ค่า  $Re$  คงที่ พบว่าปีก P-DWT จะมีค่า TEF สูงกว่าค่าปีก DWT โดยกรณีติดตั้งปีก P-DWT ภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่  $P_R = 1$  และ  $B_R = 0.3$  มีค่า TEF สูงสุดในกรณีทดสอบเท่ากับ 1.12 ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยค่า  $f/f_0$  ที่น้อยกว่าทำให้ปีก P-DWT มีค่า TEF สูงกว่าปีก DWT

รูปที่ 12 อิทธิพลของ  $P_R$  ต่อ TEFรูปที่ 13 อิทธิพลของ  $B_R$  ต่อ TEF

## 6. สรุป

การถ่ายเทความร้อน (Nu) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และตัวประกอบความเสียดทาน (f) มีแนวโน้มลดลงตามกับความเร็วของของไหล (Re) ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่แผ่นปีกสามเหลี่ยมทุกกรณีจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่า Re ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดกระแสการไหลแบบปั่นป่วนหรือหมุนวน ซึ่งจะไปรบกวนการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อนที่ผิวท่อทดสอบจึงทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น การติดตั้ง DWT กับ P-DWT ภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเพิ่ม Nu ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ ( $Nu/Nu_0$ ) แต่ในทางตรงกันข้ามก็จะส่งผลให้ f มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ถ้าพิจารณาที่ Re คงที่ใด ๆ พบว่าเมื่อ  $B_R$  มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ Nu และ f มีค่าเพิ่มขึ้นตาม ขณะที่  $P_R$  เพิ่มขึ้น ค่า Nu และ f มีแนวโน้มลดลง ในขณะเดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า Nu,  $Nu/Nu_0$ , f และ  $f/f_0$  ระหว่างปีกแบบ DWT กับปีกแบบ P-DWT ที่ Re และ  $P_R$  คงที่ใด ๆ พบว่าปีกแบบ DWT จะให้ค่า Nu และ  $Nu/Nu_0$  สูงกว่า ปีกแบบ P-DWT เนื่องจากผลของรูเจาะในปีกแบบ P-DWT จะทำให้ความรุนแรงในการไหลของของไหลลดลงเล็กน้อย ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามปีกแบบ P-DWT สามารถลด f และ  $f/f_0$  ได้ดีกว่าปีก DWT โดยค่า TEF กรณีใส่ปีก P-DWT ที่  $P_R = 1$  และ  $B_R = 0.3$  ให้ค่าสูงสุดของการทดสอบ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตามสัญญาเลขที่ NKR2565INC001 และขอบคุณสาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทดลองในการทำวิจัยในครั้งนี้

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Liu and M. Sakr, "A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 64–81, 2013.
- [2] P. Hoonpong and S. Skullong, "Heat transfer enhancement in turbulent tube flow through delta-winglet tapes," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 3, pp. 557–566, 2018.
- [3] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard, P. Promvong, "Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert", *Int. Commun. Heat. Mass. Transf.*, vol. 36, pp. 365–371, 2009.
- [4] H. Bas, V. Ozceyhan, "Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube wall," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 41, pp. 51–58, 2012.
- [5] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Promvong, "Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements," *Int. Commun. Heat. Mass. Transf.* vol. 33, pp. 1225–1233, 2006.
- [6] M. M. K. Bhuiya, M. S. U. Chowdhury, M. Saha and M. T. Islam, "Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts," *Int. Commun. Heat. Mass. Transf.*, vol. 46, pp. 49–57, 2013.
- [7] T. Chompookham, "Thermal Enhancement Technique in Circular Duct with Twisted Tape," *UBU Engineering Journal.*, vol. 2, pp. 85–100, 2013.

- [8] A. Sroysroy, U. Phongrasamee, C. Chooppava and J. Kuntong, "Heat transfer enhancement in a circular tube inserted with wavy twisted," *KKU Science Journal*, vol. 48, no. 3, pp. 440-449, 2020.
- [9] P. Promvonge and S. Skullong, "Heat transfer in a tube with combined V-winglet and twin counter-twisted tape," *Case Stud. in Therm. Eng.*, vol. 26, pp. 1-10, 2021.
- [10] C. Thianpong, K. Yongsiri, K. Nanan and S. Eiamsa-ard, "Thermal performance evaluation of heat exchangers fitted with twisted ring turbulators," *Int. Commun. Heat. Mass Transf.*, vol. 39, pp. 861-868, 2012.
- [11] W. Chingtuaythong and S. Chokphoemphun, "Thermal performane augmentation in heat exchanger tube with oval-pentagon ring," *J. Res. Appl. Mech. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 50-62, 2018.
- [12] W. Chingtuaythong, S. Chokphoemphun, S. Thongdaeng, A. Donmuan and B. Lamlerd., "Study on Turbulent Air Flow and Heat Transfer Characteristics of a Tube Inserted the Diamond-diamond Rings Turbulator," *Journal of Industrial Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 161-168., 2018.
- [13] P. Promvonge and S. Skullong, "Thermal characterization in circular tube inserted with diamond-shaped rings," *J. Res. Appl. Mech. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 1-10, 2019.
- [14] P. Hoonpong, P. Promvonge and S. Skullong, "Experimental study of thermal performance in the tubular heat exchanger using inclined perforated vertex rings," *J. Res. Appl. Mech. Eng.*, vol.,8, no. 2, pp. 148-157, 2020.
- [15] P. Hoonpong and S. Skullong. "Experimental investigation on heat transfer and fluid flow characteristics in a heat exchanger Cylindrical tube with perforated-wing-tape insert," *Journal of Industrial Technology*, vol. 11, no.1, pp. 29-37. 2016.
- [16] Lei, Y., Zheng, F., Song, C. and Lyu, Y, "Improving the thermal hydraulic performance of a circular tube by using punched delta-winglet vortex generators," *Int. J. Heat Mass Tran.*, vol. 111, pp. 299-311. 2017.
- [17] C. Khanoknaiyakarn, P. Promvonge, C. Thianpong and S. Skullong. "Performance improvement in a tubular heat exchanger by punched delta-winglet vortex generators," in *8<sup>th</sup> TSME-International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2017)*, Bangkok, 12-15 December 2017.
- [18] A.T. Wijayanta, T. Istanto, K. Kariya, and A. Miyara, "Heat transfer enhancement of internal flow by inserting punched delta winglet vortex generators with various attack angles," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 87, pp. 141-148, 2017.

- [19] A.T. Wijayanta, I. Yaningsih, W.E. Juwana, M. Aziz, T. Miyazaki, "Effect of wing-pitch ratio of double-sided delta-wing tape insert on the improvement of convective heat transfer," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 151, 106261, 2020.
- [20] S. Skullong, P. Promvong, N. Jayranaiwachira and C. Thianpong, "Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 109, pp. 164-177, 2016.
- [21] N. Koolnapadol, S. Sripattanapipat and S. Skullong, "Effect of pitch spacing of delta-winglet on thermal characteristics in a heat exchanger tube," *J. Res. Appl. Mech. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp.166-174, 2016.
- [22] S. Skullong, P. Promvong, C. Thianpong and N. Jayranaiwachira, "Thermal behaviors in a round tube equipped with quadruple perforated-delta-winglet pairs," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 229-243, 2017.
- [23] P. Promvong and S. Skullong. "Thermo-hydraulic performance in heat exchanger tube with V-shaped winglet vortex generator," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 164, 114424, 2020.
- [24] P. Promvong, P. Promthaisong and S. Skullong, "Thermal performance augmentation in round tube with louvered V-winglet vortex generator," *Int. J. Heat Mass Tran.*, vol. 182, 121913, 2022.
- [25] S. Skullong, P. Promvong, C. Thianpong, N. Jayranaiwachira and M. Pimsarn, "Thermal performance of heat exchanger tube inserted with curved winglet tapes," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 129, pp. 1197-1211, 2018.
- [26] P. Promvong, P. Promthaisong and S. Skullong, "Experimental and numerical heat transfer study of turbulent tube flow through discrete V-winglets," *Int. J. Heat Mass Tran.*, vol. 151, 119351, 2020.
- [27] C.W. Leung, S. Chen, T.T. Wong and S.D. Probert, "Forced convection and pressure drop in a horizontal triangular-sectional duct with V-grooved (i.e. orthogonal to the mean flow) inner surfaces," *Appl. Energy*, vol. 66, pp. 199-211, 2000.
- [28] S. Singh, S. Chander and J.S. Saini, "Investigations on thermo-hydraulic performance due to flow-attack-angle in V-down rib with gap in a rectangular duct of solar air heater," *Appl Energy*, vol. 97, pp. 907-912, 2012.
- [29] P. Promvong and S. Skullong, "Heat transfer in solar receiver heat exchanger with combined punched-V-ribs and chamfer-V-grooves," *Int. J. Heat Mass Tran.*, vol. 143, 118486, 2019.
- [30] A. Alam, R.P. Saini, J.S. Saini, "Experimental investigation on heat transfer enhancement due to V-shaped perforated blocks in a rectangular duct of solar air heater," *Energy Convers. Manag.*, vol. 81, pp. 374-383, 2014.

- [31] A. Alam, R.P. Saini, J.S. Saini, "Effect of circularity of perforation holes in V-shaped blockages on heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct," *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 952-963, 2014.
- [32] A. Kumar, R. Chauhan, R. Kumar, T. Singh, M. Sethi and A. Sharma "Developing heat transfer and pressure loss in an air passage with multi discrete V-blockages," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 84, pp. 266-278, 2017.
- [33] R. Kumar, M. Sethi, R. Chauhan, and A. Kumar, "Experimental study of enhancement of heat transfer and pressure drop in a solar air channel with discretized broken V-pattern baffle," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 856-872, 2017.



## การออกแบบและสร้างรถเข็นไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบความเร็ว 3 ระดับ

### ที่ควบคุมด้วยมือโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

## The Design and Construction of 3 Speed Levels Electric Wheelchair for Disabilities Controlled with Hand by using Microcontroller

ชัยพร อัดโดดดร นิติคม อริยพิมพ์\* ธนัช เอกเกื้อกุล พงศกร ชิดชอบ

จิรวัดณ์ วรณโรจน์ ธนกร ศิริมงคลกานต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

199/19 ถนนมิตรภาพ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

Chaiporn Addoddorn Nitikom Ariyapim\* Tanut Aekkuerkul Phongsagorn Chidchob

Jirawat Waroonrod Thanakorn Siramongkolkan

Faculty of Engineering, Northeastern University

199/19 Mittraphap Rd., Mueang District, KhonKaen 40000

\*Corresponding author E-mail : Nitikom.ari@neu.ac.th

(Received: December 26, 2022; Revised: January 7, 2023 ; Accepted: March 23, 2023)

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างรถเข็นไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบความเร็ว 3 ระดับที่ควบคุมด้วยมือโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วได้แบบปรับความกว้างพัลส์ที่ร้อยละ 100 80 และ 60 ที่ค่าความเร็วสูงสุดแบบความเร็วนุ่มนวล ซึ่งประกอบด้วยวงจรตรวจจับระดับแรงดันแบตเตอรี่ วงจรอัดประจุ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560 วงจรขับมอเตอร์ H-Bridge Driver SE-HB-80 มอเตอร์เกียร์สเกดเตอร์ 2 ตัว และคันโยกบังคับมือ ให้สามารถเคลื่อนที่และพาผู้ใช้งานไปยังพื้นที่ต่างๆได้ ซึ่งรับคำสั่งมาจากผู้ใช้งานโดยผ่านคันโยกบังคับมือ แล้วส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560 เป็นตัวควบคุมอีกทีหนึ่ง ซึ่งใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบทั้งหมด จากการทดสอบการทำงานของรถเข็นไฟฟ้านี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับคำสั่งจากคันโยกบังคับมาประมวลผลและควบคุมการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าได้ทุกฟังก์ชัน อาทิเช่น เดินหน้า ถอยหลัง หยุด เลี้ยวขวา เลี้ยวซ้าย แบบความเร็วนุ่มนวลที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 10 เป็นเวลา 150 ms รถเข็นไฟฟ้านี้สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 120 กิโลกรัม ทำให้ปลอดภัยและประหยัดแรงงานของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างมาก และทำให้ลดภาระการช่วยเหลือดูแลจากคนรอบข้าง สังคม และภาครัฐได้ วัสดุ อุปกรณ์ในการสร้างรถเข็นไฟฟ้านี้สามารถหาซื้อได้ในท้องถิ่นหรือภายในประเทศ ทำให้ประหยัดต้นทุนลงได้เป็นอย่างมากอีกด้วย

**คำสำคัญ:** รถเข็นไฟฟ้า มอเตอร์เกียร์สเกดเตอร์ ความกว้างพัลส์ ความเร็วนุ่มนวล ไมโครคอนโทรลเลอร์

### Abstract

This paper presents the design and construction of 3 speed levels electric wheelchair for disabilities controlled with hand by using microcontroller. The speed can be controlled using 100, 80, and 60 percent pulse width modulation with the use of soft speed. The construction consists of the battery voltage level detection circuit, the charger circuit, the Arduino MEGA2560 microcontroller circuit, the H-Bridge Driver SE-HB-80 motor driver circuit, 2 scooter motor gear and the manual lever to allow the wheelchair to move and navigate to different areas depending on user commands. When using the manual lever, the command will be sent to the microcontroller Arduino MEGA2560 in which the system control program is written using C language. Based on the operation test of this electric wheelchair, the microcontroller can take commands from the manual lever to process and control all functions of the electric wheelchair such as forward, backward, stop, turn right, turn left with the use of soft speed at 10% pulse width modulation for 150 ms. This electric wheelchair can support a maximum weight of 120 kg. Thus, this wheelchair is very safe and can help minimize the user's effort as well as the need for assistance from other people, society and government. The materials used to make this electric wheelchair can be purchased locally or domestically, therefore it can save a lot of costs as well.

**Keywords:** Electric Wheelchair, Scooter Motor Gear, Pulse Width Modulation, Soft Speed, Microcontroller.

### 1. บทนำ

ประเทศไทยมีจำนวนคนพิการรวม 2,102,384 คน นับจากจำนวนคนพิการที่ได้รับการออกบัตรประจำตัวคนพิการแล้วตามข้อมูลสำนักทะเบียนกลาง กรมการปกครอง วันที่ 31 ธันวาคม 2564 จำแนกเป็นเพศหญิง 1,004,267 คน (47.77%) เพศชาย 1,098,117 คน (52.23%) และคนพิการส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นผู้พิการทางแขนขาไม่สามารถช่วยเหลือตัวเองได้ ทำให้ต้องใช้รถเข็นในการเคลื่อนที่และยังจำเป็นต้องมีคนปกติช่วยในการเข็นรถอีกด้วย ปัจจุบันรถเข็นเป็นที่ต้องการอย่างมากสำหรับคนพิการและผู้สูงอายุ ซึ่งรถเข็นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ รถเข็นด้วยมือและรถเข็นไฟฟ้า [1,2] ซึ่งจะเห็นว่าการขับรถเข็นด้วยมือเป็นเวลานานๆ จะทำให้ผู้ใช้งานเกิดอาการบาดเจ็บที่ข้อมือ ข้อศอก และไหล่ ดังนั้น รถเข็นไฟฟ้าจึงเป็นที่นิยมมากกว่าและเพิ่มมาก

ขึ้นเรื่อย ๆ ในสังคมสมัยใหม่ โดยที่ปัจจุบันคนพิการในประเทศไทยนั้นประสบปัญหาในการเข้ารับบริการทางการแพทย์ เนื่องจากสาเหตุด้านค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ค่ารักษาพยาบาลและการขอรับการรักษาที่ต้องใช้เวลานาน ตลอดจนอาคารสถานที่ อุปกรณ์หรือสื่อที่ไม่เอื้อให้คนพิการเข้าถึงและใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ อุปกรณ์ทางการแพทย์บางอย่างยังมีราคาแพงซึ่งคนพิการไม่สามารถใช้งานได้ด้วยตนเอง และต้องมีผู้ดูแลช่วยในการใช้งานอย่างเช่นรถเข็นคนพิการที่ต้องมีผู้ช่วยในการเข็นเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้ หากคนพิการต้องอยู่เพียงลำพังไม่มีผู้ดูแล หากจะไปไหนก็ทำให้ยากลำบาก ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีรถเข็นไฟฟ้าคนพิการขายแล้วก็ตามถ้าเทียบกับการใช้งานที่ดีและมีประสิทธิภาพ สามารถไปในพื้นที่ราบและพื้นที่ลาดเอียงได้ แต่หากจะให้คนพิการซื้อเองก็เป็นเรื่องลำบากเพราะมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและพัฒนารถเข็นไฟฟ้าควบคุมด้วยคั่นโยกบังคับมือ ให้สามารถเดินทางไปพื้นที่ราบ พื้นที่ลาดเอียงได้ ซึ่งมีราคาไม่แพงนัก มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เพื่อช่วยส่งคนพิการที่มีปัญหาความพิการทางท่อนล่างให้สามารถเดินทางไปไหนมาไหนได้โดยไม่ต้องมีคนอื่นเข็น ช่วยอำนวยความสะดวกแก่คนพิการที่ไม่มีผู้ช่วยเหลืออีกด้วย ทำให้ปลอดภัยและประหยัดแรงงานของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างมาก และทำให้ลดภาระการช่วยเหลือ ดูแลจากคนรอบข้าง สังคม และภาครัฐได้ วัสดุอุปกรณ์ในการสร้างรถเข็นไฟฟ้านี้สามารถหาซื้อได้โดยไม่ต้องถิ่นหรือภายในประเทศ ทำให้ประหยัดต้นทุนลงได้เป็นอย่างมากอีกด้วย

## 2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วิวัฒนาการของรถเข็น

ปัจจุบันรถเข็นผู้พิการและผู้สูงอายุได้มีวิวัฒนาการไปอย่างมาก มีคุณภาพและสิ่งอำนวยความสะดวกที่หลากหลาย รถเข็นผู้พิการและผู้สูงอายุที่มีราคาแพงพวก Ultralightweight wheelchair จะมีโครงสร้างเป็นโลหะเบา พวกอลูมิเนียมหรือไทตาเนียม มีระบบการบังคับ การเอนพนัก ระบบความปลอดภัยและระบบล้อที่เคลื่อนไหวได้คล่องแคล่ว ผู้พิการและผู้สูงอายุจึงสามารถเรียนรู้และบังคับได้อย่างรวดเร็วเหมาะสำหรับผู้พิการและผู้สูงอายุที่จำเป็นต้องใช้ในระยะเวลา สำหรับรถเข็นผู้พิการและผู้สูงอายุที่มีราคาย่อมเยากว่านั้นถึงจะไม่ได้ผลิตด้วยโลหะเบา แต่มีความทนทาน ใช้งานได้ง่าย มีระบบอำนวยความสะดวกพอควร จึงเหมาะสำหรับคนใช้ทั่วไปแตกต่างจากรถเข็นผู้พิการและผู้สูงอายุที่มีราคาถูกมากๆผลิตทั้งในและต่างประเทศ แต่ใช้วัสดุที่ไม่มีความคงทน มักโค้งงอหักหรือบิดได้ง่าย ที่สำคัญระบบการบังคับและระบบล้อไม่มีความคล่องตัว คนใช้จะมีปัญหาอย่างมากกับการใช้งานรถเข็นมีความสำคัญในการใช้เดินทางอย่างมากสำหรับผู้พิการและผู้สูงอายุที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 ประเภท ดังนี้

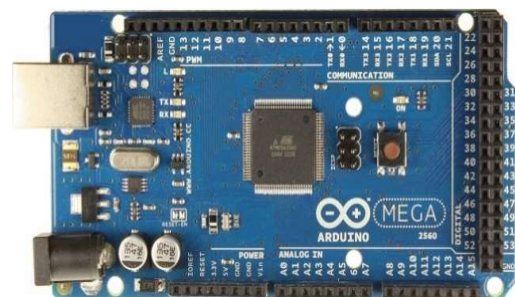
2.1.1 รถเข็นธรรมดา ช่วยให้ผู้พิการและผู้สูงอายุสามารถเคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่ต้องการโดยการให้ผู้อื่น

เข็น แต่ถ้าไม่มีคนเข็นให้ผู้พิการหรือผู้สูงอายุจะต้องออกแรงในการหมุนล้อเพื่อให้รถเข็นเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งทำให้ต้องออกแรงอย่างมากในการเคลื่อนที่ แต่รถเข็นชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับผู้พิการเพราะช่วยเหลือตนเองได้ลำบากซึ่งรถเข็นมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก แต่มีราคาค่อนข้างถูก ทนทาน ใช้งานง่าย หาซื้อได้ทั่วไป

2.1.2 รถเข็นไฟฟ้า ช่วยให้ผู้พิการและผู้สูงอายุสามารถเคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่ต้องการได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้คนอื่นเข็น เพราะมีการติดตั้งระบบไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ ผู้ใช้สามารถบังคับผ่านจากคั่นโยกบังคับด้วยมือ ไม่ต้องออกแรงเหมือนกับรถเข็นธรรมดา แต่มีราคาค่อนข้างสูง

### 2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

Arduino MEGA2560 R3 เป็นบอร์ด Arduino [3] ดังแสดงในรูปที่ 1 ที่ออกแบบมาสำหรับงานที่ต้องใช้ I/O มากกว่า Arduino Uno R3 เช่น งานที่ต้องการรับสัญญาณจาก Sensor หรือควบคุมมอเตอร์ Servo หลายๆ ตัวทำให้ Pin I/O ของบอร์ด Arduino Uno R3 ไม่สามารถรองรับได้ ทั้งนี้บอร์ด MEGA2560 R3 ยังมีความหน่วยความจำแบบ Flash มากกว่า Arduino Uno R3 ทำให้สามารถที่จะเขียนโค้ดโปรแกรมเข้าไปได้มากกว่าในความเร็วของ MCU ที่เท่ากัน [4,5]



รูปที่ 1 บอร์ด Arduino MEGA2560 R3 [3]

Arduino MEGA2560 R3 มีคุณสมบัติ ดังนี้

- ชิพไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560
- ใช้แรงดันไฟฟ้า 5 V

- รองรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แนะนำ 7–12 V
- รองรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จำกัด 6–20 V
- พอร์ต Digital I/O 54 พอร์ต มี 15 พอร์ต PWM

#### output

- พอร์ต Analog Input 16 พอร์ต
- กระแสไฟฟารวมที่จ่ายได้ในทุกพอร์ต 40 mA
- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายได้ในพอร์ต 3.3 V 50 mA
- พื้นที่โปรแกรมภายใน 256 KB แต่ 8 KB ถูกใช้โดย

#### Bootloader

- พื้นที่แรม 8 KB
- พื้นที่หน่วยความจำถาวร EEPROM 4 KB
- ความถี่คริสตัล 16 MHz

### 3. การออกแบบและสร้างรถเข็นไฟฟ้าสำหรับคนพิการ

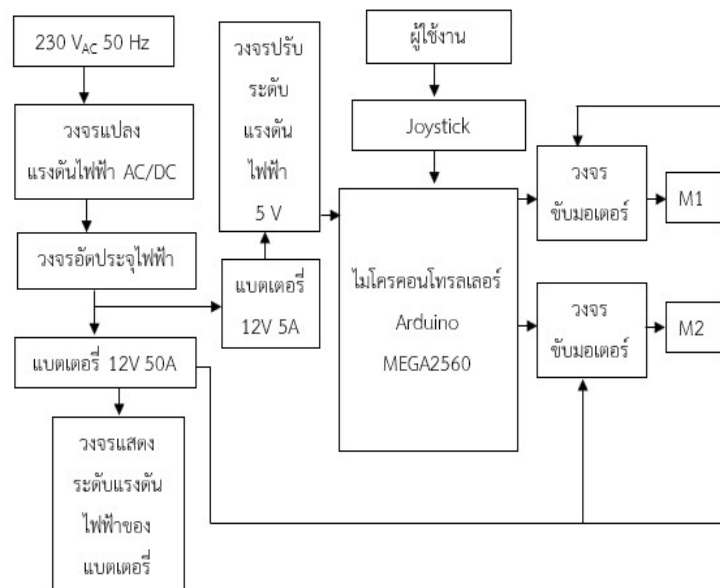
#### 3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2 การทำงานจะมีหลอดแอลอีดีแจ้งระดับแรงดันของแบตเตอรี่หากแบตเตอรี่ต่ำจะมีการอัดประจุโดยรับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับส่งต่อไปยังคำสั่งแปลงแรงดันไฟฟ้า

กระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้าตรงเพื่ออัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 50 แอมแปร์-ชั่วโมง และขนาด 12 โวลต์ 5 แอมแปร์-ชั่วโมง และจะมีคำสั่งปรับระดับแรงดันไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์ เพื่อส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560 คำสั่งควบคุมของผู้ใช้งานจะถูกส่งมาโดยผ่านคีย์บอร์ดมือแล้วส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560 ที่อยู่ในตัวรถเข็นไฟฟ้าด้วยรหัสสัญญาณดิจิทัลต่างๆ เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รับคำสั่งมาประมวลผลและควบคุมการทำงานของมอเตอร์ M1, M2 ซึ่งใช้เป็นตัวขับเคลื่อนรถเข็นไฟฟ้า โดยผ่านวงจรขับมอเตอร์และควบคุมการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าตามที่ต้องการ

#### 3.2 โครงสร้างของรถเข็นไฟฟ้า

โครงสร้างของรถเข็นไฟฟ้านี้จะมีขนาดยาว 104 ซม. กว้าง 65 ซม. และสูง 88 ซม. น้ำหนัก 55 กก. (รวมแบตเตอรี่) ขับเคลื่อนด้วยล้อหลัง 2 ล้อ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3 ผ่านเฟืองที่แกนโรเตอร์ของมอเตอร์เกียร์ ที่มีฟังก์ชันการทำงาน ดังนี้



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของรถเข็นไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ข้อมูลการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

| ข้อมูล                           | ตัวแปร         | ปริมาณ | หน่วย          |
|----------------------------------|----------------|--------|----------------|
| น้ำหนักกรงเหล็กไฟฟ้าและผู้ขับขี่ | m              | 120    | kg             |
| อัตราเร็วที่ออกแบบ               | V              | 5      | km/hr          |
| พื้นที่หน้าตัดของการขับขี่       | A              | 0.54   | m <sup>2</sup> |
| รัศมีล้อ                         | d <sub>w</sub> | 0.29   | m              |
| สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ         | K <sub>a</sub> | 0.018  | -              |
| จำนวนฟันเฟืองขับเคลื่อนมอเตอร์   | N <sub>m</sub> | 9      | ซี่            |
| จำนวนฟันเฟืองเพลาส่งกำลัง        | N <sub>s</sub> | 32     | ซี่            |
| รัศมีเฟืองท้าย                   | d <sub>s</sub> | 0.065  | m              |
| ประสิทธิภาพการส่งกำลังที่ออกแบบ  | η <sub>t</sub> | 90     | %              |
| มุมมองความลาดชัน                 | θ              | 10     | องศา           |
| ความกว้างของรถเข็นไฟฟ้า          | W              | 0.65   | m              |
| ความยาวของรถเข็นไฟฟ้า            | L              | 1.04   | m              |

### 3.2.1 การคำนวณหาแรงต้านการเคลื่อนที่

#### 3.2.1.1 แรงต้านจากการหมุน

หาค่าแรงต้านจากการหมุน (R<sub>r</sub>)

$$\begin{aligned} R_r &= K_r N \\ &= 0.0158 \times 100 \times 9.81 \sin(10) \\ &= 2.69 \text{ N} \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ R<sub>r</sub> = แรงต้านการเคลื่อนที่ N

K<sub>r</sub> = สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ

N = แรงปฏิกิริยาที่พื้นกระทำกับล้อรถ N

โดยที่ N = mg ถ้ารถเข็นไฟฟ้าเคลื่อนที่ในพื้นราบ

N = mg sin θ ถ้ารถเข็นไฟฟ้าเคลื่อนที่ในพื้นเอียง

#### 3.2.1.2 แรงต้านอากาศ

หาค่าแรงต้านอากาศ (R<sub>a</sub>)

$$R_a = \frac{\rho v^2 C_D A}{2} \quad (2)$$

เมื่อ R<sub>a</sub> = แรงต้านอากาศ (N)

ρ = ความหนาแน่นอากาศ (kg/m<sup>3</sup>), (ρ<sub>air</sub> = 1.2 kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>D</sub> = สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag Coefficient)

V = ความเร็วของรถเข็นไฟฟ้า (km/hr)

A = พื้นที่หน้าตัดของรถเข็นไฟฟ้า (m<sup>2</sup>)

โดยที่พื้นที่หน้าตัดสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$\begin{aligned} A &= 0.8(W \times L) \\ &= 0.8(0.65 \times 1.4) \\ &= 0.54 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของรถเข็นไฟฟ้า (m<sup>2</sup>)

W = ความกว้างของรถเข็นไฟฟ้า (m)

L = ความยาวของรถเข็นไฟฟ้า (m)

และเมื่อแทนค่า

$$K_a = \frac{1}{2} \rho C_D \quad (4)$$

จะได้สมการของแรงต้านอากาศดังสมการ (5)

$$\begin{aligned} R_a &= K_a A v^2 \\ &= 0.18 \times 0.54 \times 5^2 \\ &= 2.43 \text{ N} \end{aligned} \quad (5)$$

#### 3.2.1.2 แรงต้านจากทางชัน

หาค่าแรงต้านจากทางชัน (R<sub>g</sub>)

$$\begin{aligned} R_g &= Mg \sin \theta \\ &= (120 \times 9.81) \sin(10) \\ &= 204.42 \text{ N} \end{aligned} \quad (6)$$

จากแรงต้านทั้ง 2 ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถนำมา

วิเคราะห์หาแรงต้านทั้งหมดได้สมการ (7)

$$\begin{aligned} R_t &= R_r + R_a + R_g \\ &= 2.69 + 2.43 + 204.42 \\ &= 209.54 \text{ N} \end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อ  $R_t$  = แรงต้านทั้งหมด (N)

### 3.2.2 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์

หากำลังขับเคลื่อนของล้อจากสมการการหาลำกำลังขับเคลื่อน

$$P_w = \frac{FV}{3.6} \quad (8)$$

แต่เนื่องจากในการส่งกำลังโดยทั่วไปนั้นไม่สามารถส่งกำลังไปสู่ชิ้นส่วนอื่นๆ ได้ถึง 100% ดังนั้น เราจะมาวิเคราะห์หาลำกำลังของมอเตอร์ที่ต้องใช้โดยใช้ค่าประสิทธิภาพในการส่งกำลังเพื่อใช้การออกแบบจะได้ประสิทธิภาพการส่งกำลังได้สมการ (9)

$$\eta_t = \frac{P_w}{P_m} \quad (9)$$

เมื่อแทนค่ากำลังการขับเคลื่อนของล้อแล้วจะได้สมการ (10)

$$P_m = \frac{FV}{3.6\eta_t} \quad (10)$$

จากสมการ (10) เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ ( $P_m$ ) แต่จากสมการจะเปลี่ยนค่าจาก F เป็น  $R_t$  เมื่อแทนค่าในสมการจะได้

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{R_t V}{3.6\eta_t} \\ &= \frac{209.54 \times 5}{3.6 \times 0.9} \\ &= 323.36 \text{ W} \end{aligned} \quad (11)$$

### 3.2.3 การคำนวณหาความเร็วรอบ

ในการเคลื่อนที่ของรถเข็นไฟฟ้านั้นอัตราเร็วของรถเข็นจะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราเร็วรอบโดยขึ้นอยู่กับอัตราทดเฟืองซึ่งสามารถวิเคราะห์หาอัตราเร็วของรถเข็นไฟฟ้าได้โดย

d1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองขับ = 65 mm

d2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองตาม = 160 mm

n1 คือ ความเร็วรอบก่อนทดเฟือง = 2950 rpm

n2 คือ ความเร็วรอบหลังทดเฟือง

$$d1 \cdot n1 = d2 \cdot n2 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} n2 &= \frac{d1 \cdot n1}{d2} \\ &= \frac{65 \times 2950}{160} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเร็วรอบหลังทดเฟืองเท่ากับ 1198.43 rpm และการคำนวณหาอัตราทด i คือ อัตราทดเฟือง

$$\begin{aligned} i &= \frac{n1}{n2} = \frac{d2}{d1} \\ &= \frac{2950}{1198.43} \\ &= 2.46 \end{aligned} \quad (13)$$

ดังนั้น จึงเลือกมอเตอร์เกียร์สเกดเดอร์ ขนาด 24 V 330 RPM 250 W จำนวน 2 ตัว มีกำลังรวมกันเท่ากับ 500 W ซึ่งมีขายตามท้องตลาด ในการขับเคลื่อนรถเข็นไฟฟ้านี้

### 3.2.4 การคำนวณหาแบตเตอรี่

1. ใช้มอเตอร์ 250 วัตต์ 2 ตัว เท่ากับ 500 วัตต์

2. ใช้กับวงจรอื่นๆ 20 วัตต์

รวมขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้ทั้งหมด 520 วัตต์

หา A (ขนาดกระแสต่อชั่วโมงของแบตเตอรี่) สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} A &= \text{ค่าพลังงานรวม/แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่} \quad (14) \\ &= 520/12 \\ &= 43 \text{ A} \end{aligned}$$

ดังนั้น เลือกแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 50 แอมแปร์-ชั่วโมง

### 3.2.5 พิกัดของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

ใช้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์รุ่นโมดูลขับเคลื่อนมอเตอร์ H-Bridge Driver SE-HB-80 เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์เกียร์ 1 ตัว เป็นโมดูลขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ H-Bridge 12 โวลต์ 2 ช่อง จำนวน 2 ตัว โดยรับสัญญาณอินพุตจากไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 3 บิต อันได้แก่ ขา 30, ขา 32 และ ขา 2 โดยที่

ขา 30, ขา 32 ซึ่งส่งสัญญาณ Low หรือ High ออกมาจะทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ส่วนขา 2 ซึ่งส่งสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันออกมาจะควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งมีตารางการทำงาน ดังนี้

ตารางที่ 2 การทำงานวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ H-Bridge Driver SE-HB-80

| Inputs |                | Function   |
|--------|----------------|------------|
| 2 = H  | 30 = H, 32 = L | Forward    |
|        | 30 = L, 32 = H | Backward   |
|        | 30 = 32        | Motor Stop |
| 2 = L  | 30 = X, 32 = X | Motor Stop |

L = Low      H = High      X = Don't care



รูปที่ 3 โครงสร้างของรถเข็นไฟฟ้าที่ควบคุมการทำงานด้วยมือที่ถ่ายจากภาพจริง

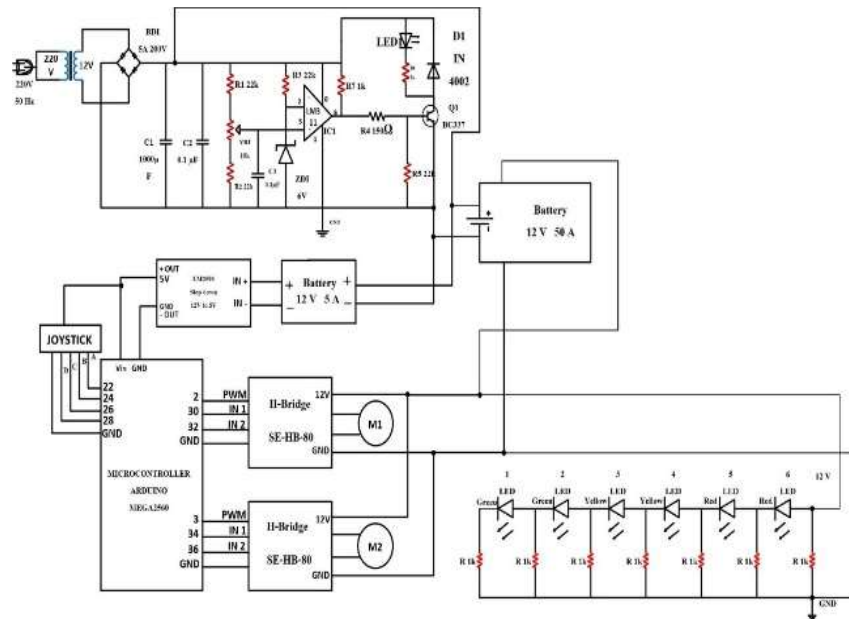
### 3.3 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมในที่นี้จะประกอบด้วยวงจร 4 ส่วน อันได้แก่ วงจรตรวจจับระดับแรงดันแบตเตอรี่ วงจรอัดประจุ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560 และ

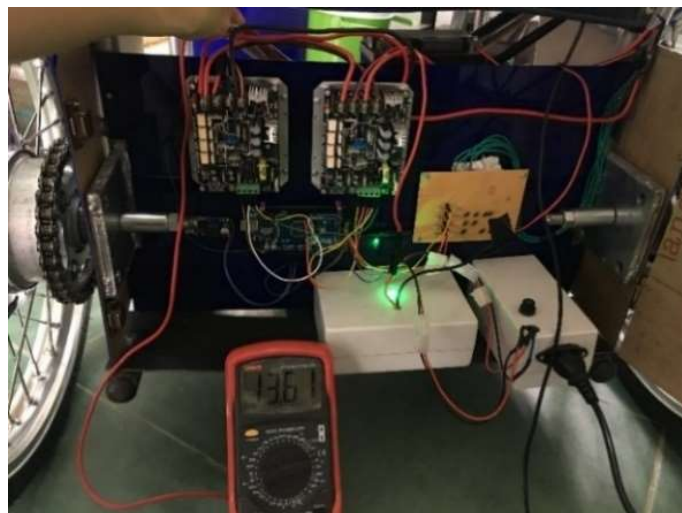
วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ดังนี้ ส่วนที่ 1 วงจรตรวจจับระดับแรงดันแบตเตอรี่เพื่อวัดระดับแบตเตอรี่ ส่วนที่ 2 วงจรอัดประจุ เราจะทำการอัดประจุเมื่อในส่วนที่ 1 แจ้งไฟแรงดันแบตเตอรี่ต่ำ

ส่วนที่ 3 วงจรควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560 โดยรับค่าเพื่อเริ่มการทำงานจากคันโยกบังคับมือ และส่วนที่ 4 วงจรควบคุมผ่าน H-Bridge เป็นโมดูลขับเคลื่อนแบบ H-

Bridge 12 โวลต์ 2 ช่อง จำนวน 2 ตัว เป็นโมดูลขับเคลื่อนมอเตอร์ชุดขับเคลื่อนทั้ง 2 ตัว โดยรับสัญญาณควบคุมการทำงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560



รูปที่ 4 วงจรรวมของรถเซ็นไฟฟ้าสำหรับคนพิการ



รูปที่ 5 วงจรควบคุมรถเซ็นไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยมือที่ถ่ายจากภาพจริง



### 3.4 โปรแกรมควบคุมการทำงาน

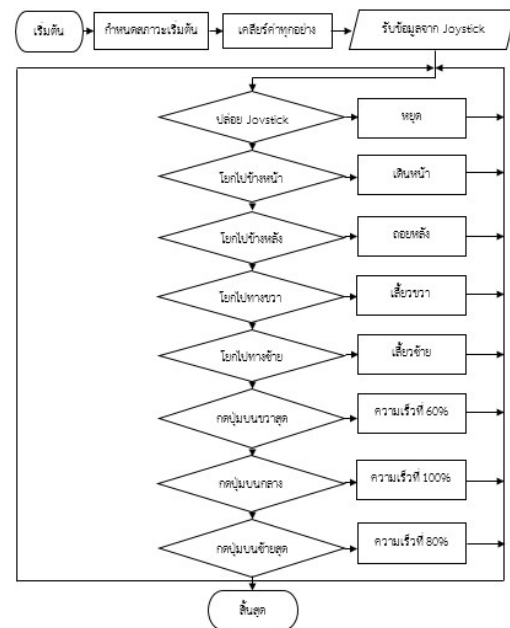
โปรแกรมควบคุมการทำงานของรถเข็นไฟฟ้า เริ่มจากการรับคำสั่งมาจากคันโยกบังคับมือ แล้วส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560 ที่อยู่ในตัวรถเข็นเป็นตัวควบคุมอีกทีหนึ่ง ซึ่งใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบทั้งหมด โดยสามารถแสดงให้เห็นได้ดังในรูปที่ 6 ซึ่งอธิบายการทำงานได้ ดังนี้ เมื่อคันโยกบังคับมือโยกไปข้างหน้าก็จะสั่งให้รถเข็นไฟฟ้าเดินหน้า เมื่อโยกคันโยกบังคับมือไปข้างหลัง ก็จะสั่งให้รถเข็นไฟฟ้าถอยหลัง และเมื่อโยกคันโยกบังคับมือ ไปทางขวา ก็จะสั่งให้รถเข็นไฟฟ้าเลี้ยวขวา เมื่อโยกคันโยกบังคับมือไปทางซ้าย ก็จะเป็นการสั่งให้รถเข็นไฟฟ้าเลี้ยวซ้าย เมื่อกดปุ่มบนทางขวาสุดที่อยู่บนปลายคันโยก จะเป็นการสั่งให้รถเข็นไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดร้อยละ 60 เมื่อกดปุ่มบนกลางที่บนปลายคันโยกบังคับมือ จะเป็นการสั่งให้รถเข็นไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วร้อยละ 100 เมื่อกดปุ่มบนทางซ้ายสุดที่อยู่บนปลายคันโยกบังคับมือ ก็จะเป็นการสั่งให้รถเข็นไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วร้อยละ 80 และเมื่อทำการปล่อยคันโยกบังคับมือ ก็จะเป็นการสั่งให้รถเข็นไฟฟ้าค่อยๆ ลดความเร็วลงที่ละร้อยละ 10 เป็นเวลา 150 ms จากความเร็วที่ต้องการจนถึงความเร็วศูนย์ตามลำดับ

## 4. ผลการทดสอบ

### 4.1 การทดสอบความสามารถของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้พิการ

การทดสอบความสามารถของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้พิการ ดังแสดงในรูปที่ 7 ได้ดังนี้

- รถเข็นไฟฟ้าวิ่งได้นานต่อเนื่อง 1 ชั่วโมง หรือระยะทาง 20 กิโลเมตรต่อการชาร์จ 1 ครั้ง
- ระยะเวลาในการชาร์จ 3 - 6 ชั่วโมง
- สามารถปรับระดับความเร็วได้ 3 ระดับ
- สามารถข้ามสิ่งกีดขวางที่มีความสูงประมาณ 4 ซม.
- ไตระดับความชันได้ 10 องศา



รูปที่ 6 โปรแกรมการทำงานของรถเข็นไฟฟ้า



รูปที่ 7 การทดสอบรถเข็นไฟฟ้า

### 4.2 การทดสอบการรับน้ำหนักได้ของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้พิการ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบให้ผู้ใช้งานที่มีน้ำหนักที่ต่างกันทดสอบการใช้งานของรถเข็นไฟฟ้าสำหรับผู้พิการ โดยให้ทดสอบเคลื่อนที่ในระยะทาง 10 เมตร ที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 80 ดังแสดงในตารางที่ 3

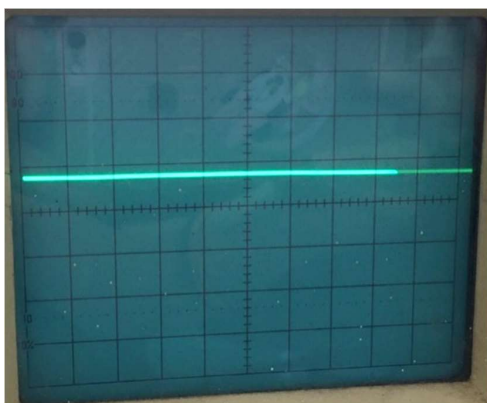
ตารางที่ 3 การทดสอบผู้ใช้งานที่มีน้ำหนักที่ต่างกัน

| น้ำหนัก (กิโลกรัม) | ความสามารถในการรับน้ำหนักได้ |
|--------------------|------------------------------|
| 49                 | ✓                            |
| 65                 | ✓                            |
| 67                 | ✓                            |
| 77                 | ×                            |
| 90                 | ×                            |

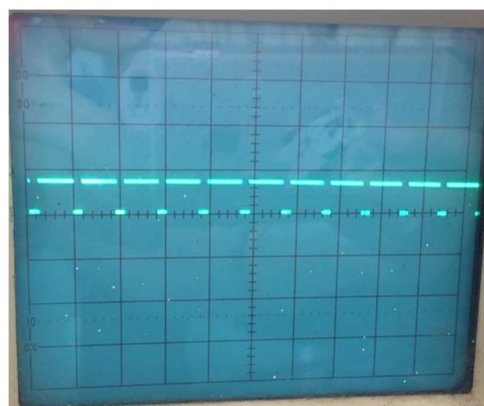
การทดสอบการรับน้ำหนักได้ของรถเข็นไฟฟ้าสามารถรับน้ำหนักคนพิการได้สูงสุด 67 กิโลกรัม (หมายเหตุ เครื่องหมาย ✓ คือ สามารถใช้งานได้ เครื่องหมาย × คือ ไม่สามารถใช้งานได้)

#### 4.3 การทดสอบการทำงานของรถเข็นไฟฟ้า

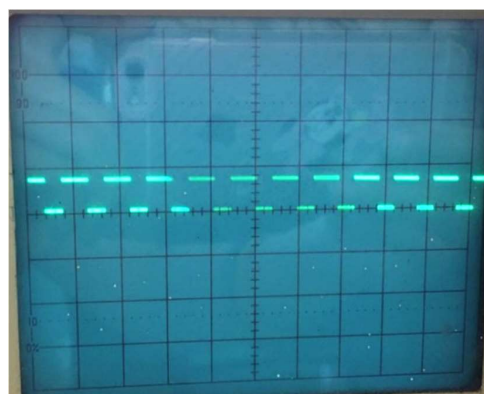
การทดสอบการทำงานของรถเข็นไฟฟ้านี้โดยส่งคำสั่งจากคันโยกบังคับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วใช้ออสซิลโลสโคปรุ่น LG OS-5040A 40 MHz ANALOG OSCILLOSCOPE วัดสัญญาณคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ในตัวรถเข็นไฟฟ้าที่ความกว้างพัลส์ต่างๆ ที่ Volt/Div เท่ากับ 5 V และ Time/Div เท่ากับ 1 mS ดังแสดงในรูปที่ 8 9 และ 10



รูปที่ 8 คำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 100 ที่ Volt/Div เท่ากับ 5 V และ Time/Div เท่ากับ 1 mS



รูปที่ 9 คำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 80 ที่ Volt/Div เท่ากับ 5 V และ Time/Div เท่ากับ 1 mS



รูปที่ 10 คำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 60 ที่ Volt/Div เท่ากับ 5 V และ Time/Div เท่ากับ 1 mS

#### 4.4 การวัดค่าแรงดันเฉลี่ยที่ค่าความกว้างของพัลส์ต่างๆ

การวัดค่าแรงดันเฉลี่ยที่ค่าความกว้างของพัลส์ต่างๆ ด้วยดิจิตอลมิเตอร์รุ่น UNI-T UT55 MULTIMETER แล้วทำการเปรียบเทียบกับแรงดันที่คำนวณได้ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ค่าความกว้างของพัลส์ต่างๆ

| ความกว้างพัลส์ (%) | ค่าแรงดันที่คำนวณได้ (V) | ค่าแรงดันที่วัดค่าได้ (V) |            |            | ค่าแรงดันเฉลี่ยที่วัดค่าได้ (V) |
|--------------------|--------------------------|---------------------------|------------|------------|---------------------------------|
|                    |                          | ครั้งที่ 1                | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |                                 |
| 60                 | 7.2                      | 9.70                      | 9.74       | 9.75       | 9.73                            |
| 80                 | 9.6                      | 10.61                     | 10.57      | 10.55      | 10.57                           |
| 100                | 12                       | 11.29                     | 11.31      | 11.35      | 11.31                           |

จากการทดสอบในตารางที่ 4 จะพบว่า ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ค่าความกว้างของพัลส์ที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงดันที่คำนวณได้ 7.2 โวลต์ จะได้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่วัดได้ 9.73 โวลต์ มีค่าผิดพลาด 35.14% ที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงดันที่คำนวณได้ 9.6 โวลต์ จะได้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่วัดได้ 10.57 โวลต์ มีค่าผิดพลาด 10.10% และที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงดันที่คำนวณได้ 12 โวลต์ จะได้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 11.31 โวลต์ มีค่าผิดพลาด 5.75% ซึ่งค่าผิดพลาดนี้เกิดจากความผิดพลาดเนื่องจากเครื่องวัด (Instrumental Errors) คือ ความผิดพลาดที่มีสาเหตุเกิดจากโครงสร้างระบบกลไกของเครื่องวัดใช้งานมานาน ขาดการบำรุงรักษา ทำให้เครื่องวัดเสื่อมประสิทธิภาพและได้ค่าการวัดที่คลาดเคลื่อน

#### 4.5 การทดสอบความเร็วของรถเข็นไฟฟ้าที่ระดับความเร็วต่างๆ

การทดสอบความเร็วของรถเข็นไฟฟ้าที่ระดับความเร็วต่างๆ ด้วยโหลดคนนั่งน้ำหนัก 65 กก. และกำหนดระยะทางคงที่ไว้เท่ากับ 10 เมตร บนพื้นปูนซีเมนต์ โดยค่าความเร็วหาได้จากสูตร  $\text{ความเร็ว} = \text{ระยะทาง} / \text{เวลา}$  (m/s) ดังแสดงในตารางที่ 5

#### 4.6 การทดสอบค่าความเร็วสูงสุด ความเร่ง และความหน่วง

การทดสอบค่าความเร็วสูงสุด ความเร่ง และความหน่วงตามมาตรฐาน ISO 7176-6:2001 [6] ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 การทดสอบความเร็วของรถเข็นไฟฟ้าที่ระดับความเร็วต่าง ๆ

| ระดับความเร็ว (%) | ครั้งที่ | เวลา (วินาที) | ความเร็ว (เมตร/วินาที) | ความเร็วเฉลี่ย (เมตร/วินาที) |
|-------------------|----------|---------------|------------------------|------------------------------|
| 100               | 1        | 6.22          | 1.61                   | 1.61                         |
|                   | 2        | 6.25          | 1.60                   |                              |
|                   | 3        | 6.16          | 1.62                   |                              |
| 80                | 1        | 6.35          | 1.57                   | 1.53                         |
|                   | 2        | 6.62          | 1.51                   |                              |
|                   | 3        | 6.58          | 1.52                   |                              |
| 60                | 1        | 7.45          | 1.34                   | 1.35                         |
|                   | 2        | 7.32          | 1.37                   |                              |
|                   | 3        | 7.37          | 1.35                   |                              |

ตารางที่ 6 การทดสอบค่าความเร็วสูงสุด ความเร่ง และความหน่วงตามมาตรฐาน ISO 7176-6:2001

|                                         |                          |      |
|-----------------------------------------|--------------------------|------|
| Maximum speed ( $v_{\text{max}}$ ), m/s | Forward horizontal       | 1.61 |
|                                         | Forward downhill 3° ramp | 1.65 |
|                                         | Forward downhill 6° ramp | 1.76 |
|                                         | Forward uphill 3° ramp   | 1.40 |
|                                         | Forward uphill 6° ramp   | 1.21 |
|                                         | Rearward horizontal      | 1.61 |
| Acceleration, $\text{m/s}^2$            | Overall, $A_{\text{om}}$ | 0.47 |
|                                         | Maximum, $A_{\text{mm}}$ | 0.50 |
| Deceleration, $\text{m/s}^2$            | Overall, $R_{\text{om}}$ | 0.35 |
|                                         | Maximum, $R_{\text{mm}}$ | 0.40 |

#### 4.7 การใช้งานแบตเตอรี่

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบแรงดันแบตเตอรี่ว่าใช้งานได้นานแค่ไหน โดยทำการทดสอบที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ จนครบ 1 ชั่วโมง เป็นการทดสอบแรงดันแบตเตอรี่โดยจะวัดค่าทุก 10 นาที จนถึง 60 นาที แรงดันแบตเตอรี่ที่เวลา 60 นาที จะอยู่ที่ 12.52 โวลต์ ซึ่งสามารถใช้งานได้ตามปกติ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การทดสอบแรงดันแบตเตอรี่

| เวลา<br>(นาที) | ระดับแรงดันแบตเตอรี่<br>(โวลต์) |
|----------------|---------------------------------|
| ก่อนทำการทดสอบ | 13.11                           |
| 10             | 12.79                           |
| 20             | 12.71                           |
| 30             | 12.67                           |
| 40             | 12.61                           |
| 50             | 12.57                           |
| 60             | 12.52                           |

#### 5. บทสรุป

จากการทดสอบการทำงานของรถเข็นไฟฟ้านี้ พบว่า ผู้ใช้งานสามารถส่งคำสั่งจากคันโยกบังคับมือไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ และไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับคำสั่งจากคันโยกบังคับมือมาประมวลผลและควบคุมการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าได้ทุกฟังก์ชัน อาทิเช่น เดินหน้า ถอยหลัง หยุด เลี้ยวขวา เลี้ยวซ้าย แบบความเร็วนุ่มนวลที่เวลาใดๆ ก็ได้ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1.35 m/s หรือ 4.860 km/hr ที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 60 เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1.53 m/s หรือ 5.508 km/hr ที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 80 และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1.61 m/s หรือ 5.796 km/hr ที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 100 แบบความเร็วนุ่มนวลที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 10 เป็นเวลา 150 ms แต่เนื่องจากที่ความกว้างพัลส์ร้อยละ 100 ไม่สามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติอันเนื่องมาจาก

การออกแบบเป็นเวลานานส่งผลให้สวิตช์มีปัญหาจึงเห็นว่าไม่ควรใช้งาน รถเข็นไฟฟ้านี้สามารถเคลื่อนที่ได้ในบริเวณที่ต้องการ อาทิเช่น พื้นปูนซีเมนต์ พื้นดิน และพื้นหญ้า และผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้นานถึง 1 ชั่วโมงต่อการอัดประจุ 1 ครั้ง ทำให้ปลอดภัยและประหยัดแรงงานของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างมาก และทำให้ลดภาระการช่วยเหลือดูแลจากคนรอบข้าง สังคม และภาครัฐได้ วัสดุ อุปกรณ์ ในการสร้างรถเข็นไฟฟ้านี้สามารถหาซื้อได้ในท้องถิ่นหรือภายในประเทศ ทำให้ประหยัดต้นทุนลงได้เป็นอย่างมากอีกด้วย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Kotesopa, "Electric Wheelchair Control and Wireless Health Status Monitoring for the Handicapped and the Elderly", M.S. Thesis, Department of Computer and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Dhurakij Pundit University, 2012.
- [2] K. Muisi, K. Chanthasit and S. Jitpattanakul, "The Application of Control System for Hand Control Wheelchair", *Rambhai Barnee Research Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 190-199, May - August 2018.
- [3] C. Addoddorn, T. Siramongkolkan and N. Ariyapim, "The Design and Construction of Wireless Area Surveying Robot Controlled by Microcontroller", *CASNIC 2020*, pp. 1165 - 1176, 2020.
- [4] Y. Pititeeraphab, T. Chaichana, and N. Thongpance, "Implementation of Electric Wheelchair with Microcontroller", *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 253 - 257, June 2016.

- [5] S.U. Ufoaroh., O.S. Nnamonu, A.N. Aniedu and G.N. Okechukwu, “Design and Construction of a Battery-Powered Microcontroller-based Wheelchair”, *African Journal of Computing & ICT*, vol 8, no. 3, pp. 153-162, Oct. 2015.
- [6] International standard ISO 7176-6. Second edition 2001-10-01. part 6: Determination of maximum speed acceleration and deceleration of electric wheelchairs.

## Customer Satisfaction with Service Quality of the Bangkok Mass Rapid Transit System

Dussadee Satirasetthavee<sup>1</sup> Israh Malabanan<sup>2\*</sup> Songyot Kitthamkasom<sup>3</sup> Jiranan Panpaksorn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

<sup>2</sup> InfraTrans Consultants Co. Ltd., Lat Phrao, Bangkok 10230, Thailand

<sup>3</sup> Department of Civil Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

\*Corresponding author Email: israhmalabanan@gmail.com

(Received: July 24, 2022; Revised: January 9, 2023 ; Accepted: March 16, 2023)

### ABSTRACT

With the increasing number of rail lines being developed in Thailand for economic growth, it is imperative that the service provided meet the expectations of its customers. To help public agencies and rail transport operators improve the quality of service of the country's rail transport system, the present study aims to determine the service quality indicators used to effectively measure rail transport passenger satisfaction; identify which aspects of service quality are the passengers most and least satisfied with; and assess how different are the levels of satisfaction of the passengers across their socio-demographic groups using Bangkok's mass rapid transit system as a case study. The Principal Component Analysis (PCA) and cross tabulation analysis with comparison statistical tests are adopted. The PCA results in 7 components which are ticket sales, station facilities, station safety and security, station staff, public relations, rolling stock, and ride comfort. Overall, the average level of satisfaction for the transit system is high with value of 4.25 out of 5.00; but interestingly, passengers are least satisfied with ticket sale factors. The differences in satisfaction of the respondents according to their gender, age, income, and trip purpose are also observed. The results suggest that relatively low satisfaction levels are found from females, young passengers, those earning less than 30,000 Baht/month, and travelers who use the train for shopping-related trips. Considering that these groups represent a large proportion of the respondents, some recommendations are summarized as drawn from the result interpretations such as further in-depth studies on the value of money of ticket prices to be appropriate for travel distance and service quality as well as enhanced information dissemination practices.

**Keyword:** Customer satisfaction, mass rapid transit system, principal component analysis, service quality.

## 1. Introduction

The rail transportation industry in Thailand continues to grow in accordance with the National Strategy 2018-2037 [1] and Thai Transport Infrastructure Development Plan 2015 – 2022 [2]. In Bangkok, the mass rapid transit system has been continuously developed from the Bangkok Transport Study in 1972 to the currently ongoing Second Mass Rapid Transit Master Plan [3]. Currently, there are seven operating urban lines while three more are expected to be open for public use in the next couple of years. To ensure this fast-paced growth of the country's rail transport system, it is imperative to provide quality service to its users. One important performance indicator which reflects demand feedback is the level of satisfaction of customers [4]. Customer satisfaction is not just one of the effective means of measuring performance but also serves as an avenue to identify the system's areas of improvement through the viewpoint of its passengers.

The current study aims to evaluate the level of satisfaction of the passengers of Thailand's rail transport system through a case study covering five lines (commuter, airport link transit, and feeder lines) of the mass rapid transit system in the Bangkok Metropolitan Region. Specifically, the goals of this study are as follows:

1. To identify the service quality indicators that can effectively measure rail transport passenger satisfaction;

2. To determine which of the service quality indicators are the passengers most/least satisfied with; and

3. To evaluate the differences among the satisfaction of the passengers across their socio-demographic groups.

This research contributes to the existing knowledge through the identification of service quality indicators of rail transport customer satisfaction in the context of Thailand's fast-growing mass rapid transit system. Through the analysis of the level of satisfaction of the passengers, guidance to the areas of improvement of the mass rapid transit system can be provided to the public agencies and rail transport operators. The indicators identified and methods used in this study may also be applied in other similar transport systems.

## 2. Review of Literature

### 2.1 Mass Rapid Transit in Bangkok

The government of Thailand has developed numerous plans for the improvement of the rail transport system in the Bangkok Metropolitan Region. The goal of these plans is to promote the use of public transportation through the mass rapid transit system. The latest of these plans is the Mass Rapid Transit Master Plan (M-Map) prepared by the Office of Transport and Traffic Policy and Planning (OTP) [2] which represents a 20-year development plan for the rail transport system from 2010 to 2029. It consists of 12 lines (two commuters, one airport rail link, five transit lines, and five feeder lines) with a total length of approximately 556 km [5]. Due to the constantly changing conditions as well as

challenges faced during the first ten years of implementation of the M-Map, a second mass rapid transit master plan (M-Map2) which has better integration and connection with other modes of public transportation has been started [5]. The summary of the urban railway lines under these plans which are currently operating and are under construction is presented in Table 1. In the current study, five currently operating heavy rail lines from the mass rapid transit system were evaluated. These are composed of transit lines, commuter lines, airport rail link, and a feeder line.

## 2.2 Customer Satisfaction

Customer satisfaction has been found to be one of the many effective performance indicators of rail transportation. The Community of Metros, the world's metro benchmarking community, conducts an annual customer satisfaction survey on multiple aspects of service quality with the goal of achieving a better understanding on how the public transit's services meet the expectations of its customers as well as to determine ways to improve the areas where passengers are least satisfied with [6]. Another standard, EN13816, which is the European standard for measuring the service quality of public transport services, also focuses on customer-centered indicators which are composed of eight main criteria (availability, accessibility, information, time, customer care, comfort, safety, and environmental impact) [7]. It defines customer satisfaction to be the measure of how congruent the service quality received by the customer is to the customer's expectations. The International Transport Forum, an

intergovernmental organization that organizes global dialogue regarding developments on transport policies, also emphasizes the importance of customer satisfaction in evaluating the performance of rail transport systems [8]. Domestically, the OTP reiterates the need to measure the level of satisfaction of customers as an indicator of the system's service quality [4].

## 2.3 Service Quality Indicators of Customer Satisfaction

The service quality indicators, factors that significantly affect the level of satisfaction of customers, have been widely studied by researchers. The general factors include those related to on-board experience, service delivery, waiting conditions, customer service, and passenger costs. Table 2 presents the summary of indicators found significant or highly affects the level of satisfaction of public transport commuters.

## 2.4 Principal Component Analysis

Principal component analysis (PCA) is a non-parametric statistic and dimension reduction process used to examine the interrelationships among a set of variables for the purpose of identifying the underlying structure of those variables [9]. The PCA provides a set of simplified explainable variables, called principal components, which facilitates interpretation without losing too much information from the original data.

In producing such simple structure, rotation is most often than not, necessary. Rotation is the process of performing arithmetic in analyzing further the initial results of the PCA by rotating



the factors so that a simpler structure is obtained [21]. Depending on the nature of the factors in the analysis, rotation methods can be orthogonal or oblique. Orthogonal methods assume that the factors are uncorrelated while oblique assumes the opposite [22].

In this study, PCA was used to group the identified service quality indicators into simpler groups of components. In the data analysis, the indicators were analyzed by these components for clearer and easier interpretation of results.

TABLE I  
Current and under construction rail lines in Bangkok

| Line              | System                   | Section                  | Opening Year | Distance (km) |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|---------------|
| Dark Green        | Heavy Rail               | Initial Section          | 1999         | 6.5           |
|                   |                          | South Extension 1        | 2009         | 7.5           |
|                   |                          | South Extension 2        | 2013         |               |
| Light Green       | Heavy Rail               | Initial Section          | 1999         | 17            |
|                   |                          | East Extension 1         | 2011         | 5.3           |
|                   |                          | East Extension 2         | 2018         | 13            |
|                   |                          | North Extension 1        | 2019         | 19            |
|                   |                          | North Extension 2        | 2020         |               |
| Blue              | Heavy Rail               | Initial Section          |              | 20            |
|                   |                          |                          | 2004         |               |
|                   |                          | Extension to Tao Poon    | 2017         | 1.2           |
|                   |                          | Hua Lamphong to Lak Song | 2019         | 15.9          |
|                   |                          | Tao Poon to Tha Phra     | 2020         | 11            |
| Airport Rail Link | Heavy Rail<br>(commuter) | East Section             | 2010         | 28.5          |
|                   |                          | Phase II                 | 2024-2025    | 171.9         |
|                   |                          | Phase III                |              | 7.8           |
| Purple            | Heavy Rail               | North Section            | 2016         | 23            |
|                   |                          | South Section            | (2027)       | 23.6          |
| Dark Red          | Heavy Rail               | North Section            | 2021         | 26            |
| Light Red         | Heavy Rail               | West Section 1           | 2021         | 15            |
| Pink              | Monorail                 | Full Line                | (2023)       | 34.5          |
| Yellow            | Monorail                 | Full Line                | (2023)       | 30.4          |
| Orange            | Heavy Rail               | East Section             | (2025)       | 21.2          |

### 3. Methodology

The methodological framework is presented in Figure 1. A triangulation research strategy was used in this study consisting of literature review,

expert validation, and survey questionnaire. The list of service quality indicators was verified for its suitability to the case study through expert consensus. A series of physical and online

meetings with various experts from both the public and private sections in Bangkok were made. Discussions over the list of important indicators were held. The list was edited and refined until a consensus was reached. This list

that has been deemed appropriate for the study area, together with the indicators' corresponding detailed descriptions are presented in Appendix 1.

TABLE II  
Service quality indicators from literature

|                            |                             | References |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|-----------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Service Quality Indicators |                             | [10]       | [11] | [12] | [13] | [14] | [15] | [16] | [17] | [18] | [19] | [20] |
| On-board experience        | Cleanliness                 | x          |      | X    | x    | x    |      | x    |      | x    | X    | x    |
|                            | Comfort                     |            | X    | X    |      | x    | x    |      |      |      | X    | x    |
|                            | Seating capacity            |            |      | x    |      | x    |      |      |      | x    |      |      |
|                            | Accessibility (physical)    | x          |      | x    |      | x    |      |      |      | x    |      | x    |
|                            | On-board information        | x          |      | x    |      |      |      | x    |      | x    |      | x    |
|                            | Crowding                    |            |      |      | x    |      |      |      |      |      | X    | x    |
|                            | Quality of vehicle          | x          |      |      |      | x    |      |      |      |      | X    |      |
|                            | Safety                      | x          | X    | x    |      |      | x    | x    |      | x    | X    | x    |
|                            | Temperature                 |            |      |      | x    |      |      |      |      | x    |      | x    |
| Service delivery           | Reliability                 |            |      |      |      |      | x    | x    |      | x    |      | x    |
|                            | Punctuality                 | x          | X    | x    | x    |      | x    | x    |      | x    | X    | x    |
|                            | Frequency                   | x          | X    |      |      | x    |      | x    |      | x    | X    | x    |
|                            | Travel time                 |            |      |      |      | x    |      |      |      | x    |      | x    |
|                            | Network coverage            | x          |      | x    | x    | x    |      |      |      |      |      | x    |
|                            | Stop location               |            | X    |      |      |      |      |      |      | x    | X    | x    |
|                            | Station parking             |            |      | x    |      |      |      |      | x    | x    |      | x    |
|                            | Waiting time                | x          |      |      | x    | x    |      |      |      | x    |      | x    |
| Waiting conditions         | Waiting conditions          | x          | X    | x    |      | x    |      |      |      |      | X    | x    |
|                            | Information at stops        | x          |      |      |      |      |      | x    |      | x    | X    | x    |
|                            | Safety at stops             |            |      |      |      |      | x    | x    | x    | x    | X    | x    |
|                            | Cleanliness at stops        |            |      |      |      |      |      | x    | x    | x    | X    | x    |
| Customer service           | Staff behavior and attitude | x          | X    |      | x    |      | x    |      | x    | x    | X    | x    |
|                            | Personnel skills            |            |      |      |      |      | x    |      | x    | x    | X    | x    |
|                            | Complaint handling          |            |      |      |      |      | x    |      | x    | x    | X    | x    |
| Costs                      | Value                       | x          | X    |      | x    |      |      |      |      |      | X    |      |
|                            | Types of tickets and passes | x          | X    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                            | Ticket selling network      |            |      | x    |      |      |      |      | x    |      | X    | x    |

Source: Authors

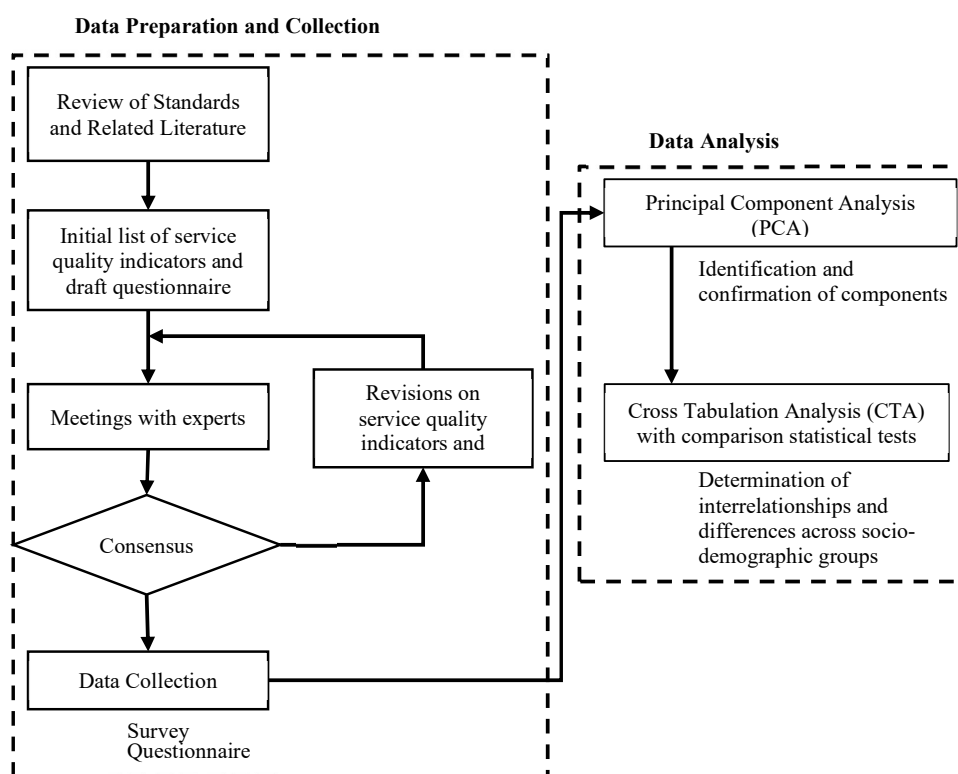


Fig. 1 Methodological framework

The survey questionnaire distributed was composed of two sections. The first section asked about the respondents personal and trip information. In the second section, the respondents were asked to rate their level of satisfaction on the service quality indicators using a 5-point Likert scale with 1 being very dissatisfied and 5 being very satisfied. The survey questionnaires were handed out to passengers of the mass rapid transit system in Bangkok. A total of 1905 usable responses were collected. The socio-demographic characteristics of the respondents are shown in Figure 2.

It can be seen that majority of the responses came from young to middle-aged working-class individuals. This can be caused by the restrictions amid the COVID-19 pandemic during the data collection of this study. The age distribution shows that very young people (< 20 years old) and older generations (> 50 years old) use the rail transit systems less, as they are recommended to avoid traveling to public areas for their safety. The small percentages of shopping and study-related trips are also attributed to the pandemic given that schools were operating online and leisure travels were discouraged.

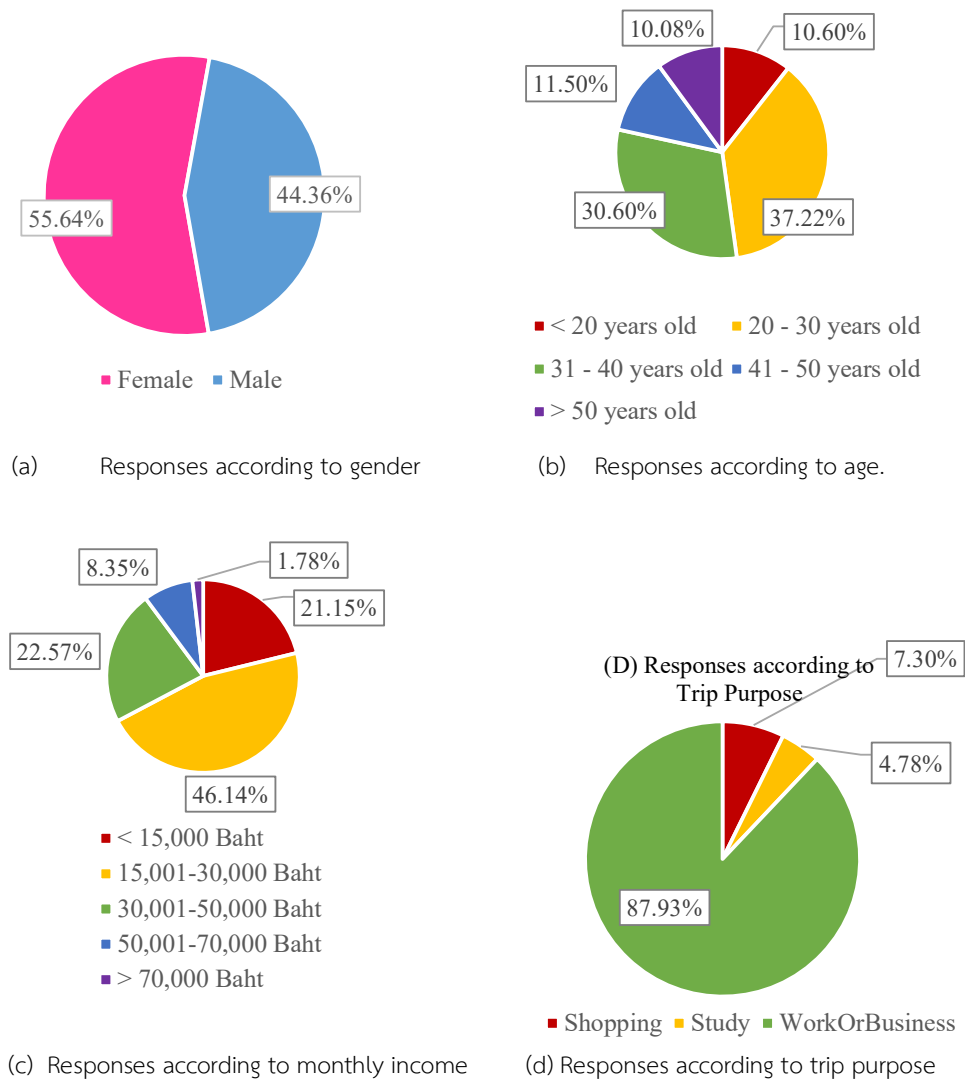


Fig. 2 Responses by socio-demographic groups

### 3.1 Principal Component Analysis

PCA was conducted on the 38 questions in the survey questionnaire using IBM SPSS Statistics 26. Variable collinearity was first checked to determine how strongly a single variable is correlated with other variables. To check the sampling adequacy of the data, the Kaiser-Meyer-

Olkin (KMO) measure of sampling adequacy was used for the overall data set. In addition, Bartlett's test of sphericity was used to assure that the data has adequate correlations among the variables for data reduction. The results of these tests are shown in Table 3.

TABLE III

Results of KMO and Bartlett's test

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| Kaiser-Meyer-Olkin Measure of      | .955      |
| Sampling Adequacy.                 |           |
| Bartlett's Test Approx. Chi-Square | 58679.550 |
| of Sphericity Df                   | 703       |
| Sig.                               | 0.000     |

The KMO value of 0.955 indicates that there is enough variance in the data, considering that values between 0.8 and 1.0 indicate sampling adequacy and those between 0.9 to 1.0 are considered marvelous. The Bartlett's test of sphericity sig. value of 0.000 suggests that the items have good correlation. Such results show that the data of the study can be partitioned using PCA.

The number of principal components to be extracted was determined using Kaiser's stopping rule which states that the number of factors to be considered in the analysis are only those with eigenvalues greater than 1.00 [23]. Using this criterion, a total of 7 components were extracted from the 38 questions in the survey. The scree plot in Figure 3 shows the graphic representation of the determination of the number of principal components analyzed.

Upon checking the correlation values among the factors, enough variance was observed to warrant oblique rotation [21]. The direct oblimin oblique rotation method was then used in the analysis. Out of the 38 questions analyzed, one question (Q33) was found to be a complex factor, i.e., it loads heavily in two components. It was

then excluded and the final results of the reran model produced a simple structure.

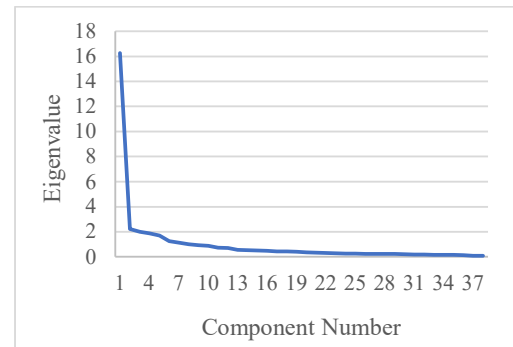


Fig. 3 Scree plot

The rotated factor loadings are shown in Table 4. Loading values that are less than 0.32 [24] are excluded for a simpler demonstration of how the questions load highly on only one component.

Analyzing the nature of the questions that fall on each component, the 7 service indicators are concluded and summarized in Table 5. The reliability of the data was also checked by calculating the Cronbach's alpha of each component to estimate of the data's internal consistency. It is important to note that the Cronbach's alpha coefficient values of 0.6-0.7 are accepted, values of 0.8 or greater are considered very good, and those greater than 0.95 are not necessarily good due to the probable indication of redundancy [25]. The Cronbach's alpha coefficients of the service quality indicators were found to have values between 0.6 and 0.95, indicating acceptable levels of reliability.

TABLE IV  
Rotated factor loadings from PCA

| Indicator  | Component |       |        |       |        |        |        |
|------------|-----------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
|            | 1         | 2     | 3      | 4     | 5      | 6      | 7      |
| Q1         | 0.691     |       |        |       |        |        |        |
| Q2         | 0.721     |       |        |       |        |        |        |
| Q3         | 0.421     |       |        |       |        |        |        |
| Q4         | 0.363     |       |        |       |        |        |        |
| Q5         | 0.548     |       |        |       |        |        |        |
| Q6         | 0.735     |       |        |       |        |        |        |
| Q7         |           | 0.488 |        |       |        |        |        |
| Q8         |           | 0.583 |        |       |        |        |        |
| Q9         |           | 0.653 |        |       |        |        |        |
| Q10        |           | 0.695 |        |       |        |        |        |
| Q11        |           | 0.773 |        |       |        |        |        |
| Q12        |           | 0.833 |        |       |        |        |        |
| Q13        |           | 0.788 |        |       |        |        |        |
| Q14        |           | 0.801 |        |       |        |        |        |
| Q15        |           | 0.739 |        |       |        |        |        |
| Q16        |           | 0.615 |        |       |        |        |        |
| Q17        |           |       | -0.600 |       |        |        |        |
| Q18        |           |       | -0.679 |       |        |        |        |
| Q19        |           |       | -0.672 |       |        |        |        |
| Q20        |           |       | -0.655 |       |        |        |        |
| Q21        |           |       |        | 0.873 |        |        |        |
| Q22        |           |       |        | 0.905 |        |        |        |
| Q23        |           |       |        | 0.898 |        |        |        |
| Q24        |           |       |        |       | -0.884 |        |        |
| Q25        |           |       |        |       | -0.919 |        |        |
| Q26        |           |       |        |       | -0.974 |        |        |
| Q27        |           |       |        |       | -0.973 |        |        |
| Q28        |           |       |        |       |        | -0.655 |        |
| Q29        |           |       |        |       |        | -0.632 |        |
| Q30        |           |       |        |       |        | -0.578 |        |
| Q31        |           |       |        |       |        | -0.591 |        |
| Q32        |           |       |        |       |        | -0.551 |        |
| Q34        |           |       |        |       |        |        | -0.566 |
| Q35        |           |       |        |       |        |        | -0.656 |
| Q36        |           |       |        |       |        |        | -0.706 |
| Q37        |           |       |        |       |        |        | -0.751 |
| Q38        |           |       |        |       |        |        | -0.736 |
| % variance | 42.823    | 5.842 | 5.243  | 4.892 | 4.487  | 3.284  | 2.905  |

TABLE V  
Service quality indicators from PCA

| Component | Service Quality Indicator |                             | Description                                                                                                                                                                              | Cronbach's alpha |
|-----------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 1         | TS                        | Ticket Sales                | TS indicates the satisfaction on the method of sales of tickets as well as the value of money of the ticket prices.                                                                      | 0.680            |
| 2         | SF                        | Station Facilities          | SF indicates the satisfaction on the accessibility of the station, quality and availability of facilities, information available for users, and inclusivity to people with disabilities. | 0.926            |
| 3         | SSS                       | Station Safety and Security | SSS pertains to the satisfaction on how safe and secured passengers feel when using the rail transport services.                                                                         | 0.908            |
| 4         | SS                        | Station Staff               | SS relates to the satisfaction of respondents regarding the personality, politeness, and service offered by staffs at the station.                                                       | 0.945            |
| 5         | PR                        | Public Relations            | PR indicates the satisfaction with information dissemination, unusual events notification, and complaints handling.                                                                      | 0.946            |
| 6         | RS                        | Rolling Stock               | RS pertains to the satisfaction with the operations of the rail transport system and readiness and cleanliness of the trains.                                                            | 0.915            |
| 7         | RC                        | Ride Comfort                | RC relates to the inclusivity of train facilities, ambiance, and safety and security inside the trains.                                                                                  | 0.902            |

### 3.2 Cross Tabulation with Comparison Statistical Tests

The level of satisfaction differs among socio-demographic characteristic groups of passengers [9]. Cross tabulation analysis (CTA) is one method to quantitatively analyze how the variables are related to each other and how they differ across groups of respondents. In this study, CTA was used to examine the relationship of customer satisfaction on the service indicators identified through PCA and the socio-demographic characteristics of the respondents. The results are divided into gender, age group, monthly income, and trip purpose. Since CTA is empirical in nature,

comparison statistical tests were also conducted. Upon checking if the data meets the assumptions of parametric and non-parametric tests, it was determined that the comparison tests of t-test and Kruskal-Wallis (KW) tests with pairwise comparisons were to be used to determine if the differences among the groups are statistically significant.

## 4. Results and Discussion

The respondents are found to be relatively satisfied with the service quality of the mass rapid transit lines with majority of the mean values of level of satisfaction being greater than 4 (Figure

4). It is noteworthy, however, to find that passengers are significantly least satisfied with ticket sales (TS) with a mean of 3.719. This indicates that the method of sales and value of money passengers receive in purchasing the train tickets need improvement. This result is similar to the findings of Petrovic et al. [26] where the authors found that ticket price is amongst the service quality elements that passengers were most dissatisfied with. It is then recommended that the method of sales such as ticket booths, ticket vending machines, applications, and internet banking be maintained well and also enhanced to accommodate the increasing demand. Ibrahim et al. [27] also recommended the improvement of the value of the trip in order to produce higher levels of passenger satisfaction.

Public relations (PR) was found to be the indicator with the second lowest mean level of satisfaction (4.128). This result suggests that improvements be made to the dissemination of information methods, notification of unusual events, and handling of complaints. This can include proper planning in cases of potential schedule disruptions, real-time decisions leading to advanced and updated announcements, enhanced information dissemination quality and delivery methods, and more efficient complaint management [28, 29].

The indicator with the highest level of satisfaction is found to be station staff (SS) with a mean value of 4.540 which indicates that the personality, politeness, and services offered by staffs at the station are commendable.

Overall, the average satisfaction considering equal weights to the service quality indicators was found to be 4.250 out of 5.000. This indicates high level of satisfaction from customers of the Bangkok Mass Rapid Transit System.

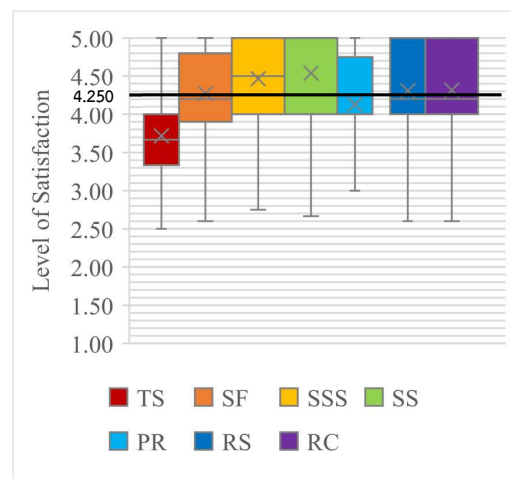


Fig. 4 Overall level of satisfaction on service quality indicators

#### 4.1 Gender

The level of satisfaction was found to be different across gender groups of male and female as shown in Appendix 2A. Independent t-tests showed that there is significant difference among the groups in all service quality indicators except station staff (SS) and public relations (PR). In general, it can be seen that females have lower level of satisfaction. From the results of the indicators SSS and RC, it can be deduced that females are less satisfied with the safety and security of both the trains and train stations. The result suggests that females are less satisfied with their feeling of being safe relating to presence of security guards, safety zones at platforms, and



baggage inspections. For security, this pertains to crime and theft of valuables especially at dimly lit areas and blind spots. This complements the findings in other countries where females were found to feel less safe and more at risk at metro stations and trains compared to males [9]. Ibrahim, et al. [27] recommended the following to enhance the satisfaction of females in terms of safety and security: installation of more security cameras for monitoring, ease of reporting of suspicious activities, increased number of security staff, and designated exclusive coaches for females.

#### 4.2 Age

The results of the CTA with KW tests showed that in all service indicators, the null hypothesis that the level of satisfaction is the same across the categories of age is rejected. As shown in Appendix 2B, the consequent pairwise comparisons reveal that except for ticket sales (TS) and public relations (PR), younger age groups (respondents younger than 30 years old) are significantly less satisfied with the service quality compared to the older generations. Similar to the results of the study of [9], a trend can be found where lower satisfaction levels are observed in the younger age groups.

Considering that the younger generation are a majority of the passengers, that they were found to be the respondents least satisfied with the service quality, and that they are considered the most technologically literate, it is highly recommended that their levels of satisfaction be increased by taking advantage of technological techniques such as provisions of real-time transit

information online, mobile application discounts, and social media promotions [30].

#### 4.3 Income

Appendix 2C shows the CTA results across the monthly income of respondents. In majority of the service quality indicators, it can be observed that the respondents who earn 30,001 – 50,000 Baht per month are significantly the most satisfied especially when compared to lesser earning groups. To increase the level of satisfaction of the lesser earning groups, it is recommended that promotions be provided such as cheaper weekly and monthly ticket price bundles [28].

#### 4.4 Trip Purpose

Except for station safety (SS) indicator, the level of satisfaction across trip purpose showed that there is no significant difference among the groups (Appendix 2D). This suggests that regardless of the trip purpose, the respondents have the same level of satisfaction for the ticket sales, station facilities, station safety and security, public relations, rolling stock, and ride comfort.

It is noteworthy to find that in regard to the station staff (SS) indicator, passengers who travel for shopping purposes are significantly the least satisfied. One explanation can be attributed to how these customers communicate with the staff more often considering that those who use the train for study and work trips most likely do so on a regular basis, and thus the latter need not ask for further assistance. This finding is also important especially for tourists who avail of the service for shopping-related trips. It is

recommended that the SS indicator be better improved to cater the needs of shopper travelers.

In summary, across the socio-demographic characteristics of the respondents, it was found that the relatively lowest satisfaction levels were found in females, passengers younger than 30 years old, those who earn less than 30,000 Baht/month, and people who travel for shopping purposes. Considering that these groups represent a majority of the responses, it is highly recommended that the service quality of the mass rapid transit system be improved to raise their levels of satisfaction.

## 5. Conclusion and Recommendations

The rail transport system in Thailand was evaluated based on a case study on the customer satisfaction of passengers of the mass rapid transit system in the capital. Principal component analysis followed by cross tabulation analysis with comparison statistical tests were conducted to assess the level of satisfaction of the respondents. The results showed that the service quality indicators of satisfaction are ticket sales, station facilities, station safety and security, station staff, public relations, rolling stock, and ride comfort. Among these indicators, passengers are significantly least satisfied with the method of ticket sales and ticket prices followed by the public relations. On the contrary, they are generally most satisfied with the service received from the station staff. The results also suggest that there are significant differences among the socio-demographic groups of respondents. Relatively low satisfaction levels were found from

females, young passengers (< 30 years old), those earning less than 30,000 Baht/month, and travelers who avail of the train services for shopping-related trips. Considering that these groups represent a large number of passengers who use the mass rapid transit system, improvements must be made to meet their expected service quality, consequently increasing their levels of satisfaction.

The limitations of this study include the following: transfer between and across other lines and modes were not considered; the importance of each service quality indication was assumed to be of equal weights; more disaggregate levels of income across respondents can be used; and level of educational attainment could have also been asked. It is recommended that further studies incorporate these changes for more in-depth analysis of the customer satisfaction in rail transport.

In summary, the following recommendations to public agencies and rail transport operators are summarized upon assessing the survey results:

- With regard to ticket sales, it is recommended that the method of sales such as ticket booths, ticket vending machines, applications, and internet banking be maintained well and also improved to accommodate the increasing demand. It is also recommended that further in-depth studies be conducted focusing on the value of money of the ticket prices and their appropriateness to passengers' traveling distance and service quality received.
- Considering public relations, it is suggested that improvements be made to the dissemination

of information methods, notification of unusual events, and handling of complaints. This includes proper delay planning, real-time updates on trip schedules, enhanced information dissemination quality and delivery, and more efficient complaint management.

- Complementary to previous research recommendations, it is suggested that safety and security for females be enhanced and encouraging strategies such as online or mobile application promotions, regular rider discounts, and shopping rebates be made to increase the level of satisfaction of the socio-demographic groups found to be relatively least satisfied with the rail transport services.

## 6. References

- [1] Office of the National Economic and Social Development Council (NESDC). (2019). National Strategy 2018 - 2037 [Online]. Available: <http://nscr.nesdb.go.th/wp-content/uploads/2019/10/National-Strategy-Eng-Final-25-OCT-2019.pdf>
- [2] Office of Transport and Traffic Policy and Planning (OTP). (2015). Thailand's Transport Infrastructure Development Strategy 2015-2022 [Online]. Available: <http://www.thaitransport.org/news/2558.07.01>
- [3] Japan International Cooperation Agency (JICA), "Data collection survey on the development of blueprint for the second mass rapid transit master plan (M-Map2) in the Kingdom of Thailand," OTP, Thailand. Final Report 2019.
- [4] J. Liangrokapart, "Metro performance indicators for service operations in Thailand," in: *Urban Rail Transit. Lecture Notes in Mobility*, W. Weerawat, P. Kirawanich, A. Fraszczyk, M. Marinov, Ed., Singapore: Springer, 2021. pp. 99-113.
- [5] V. Vichiesan, V. Wasuntarasook, Y. Hayashi, M. Kii, T. Prakayaphun, "Urban rail transit in Bangkok: chronological development review and impact on residential property value," *Sustainability*, vol. 14, p. 284, 2022.
- [6] M. Trompet, R. Parasram, R. J. Anderson, "Benchmarking disaggregate customer satisfaction scores of bus operators in different cities and countries," *Transp. Res. Rec.* vol. 2351, pp. 14-22, 2013.
- [7] A. M. Ngoc, K. V. Hung, V. A. Tuan, "Towards the development of quality standards for public transport service in developing countries: analysis of public transport users' behavior," *Transp. Res. Rec.* vol. 25, no. 2017, pp. 4560-4579, 2017.
- [8] International Transport Forum (ITF), "Efficiency in railway operations and infrastructure management," OECD Publishing; Paris. ITF Roundtable Reports No. 177, 2019.
- [9] Y. Q. Saw, D. Dissanayake, F. Ali, T. Bentotage, "Passenger satisfaction towards metro infrastructures, facilities and services," *Transp. Res. Rec.* vol. 48, pp. 3980-3995, 2020.
- [10] Y. Tyrinopoulos, C. Antoniou, "Public transit user satisfaction: variability and policy

- implications,” *Transp. Policy*. vol. 15, pp. 260-272, 2008.
- [11] J. N. Githui, T. Okamura, F. Nakamura, “The structure of users' satisfaction on urban public transport service in developing country: the case of Nairobi,” *J. East Asia Soc. Transp. Stud.* vol. 8, pp. 1288-1300, 2010.
- [12] A. M. Das, M. A. Ladin, A. Ismail, R. O. K. Rahmat, “Consumers satisfaction of public transport monorail user in Kuala Lumpur,” *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* vol. 8, no. 3, pp. 272-283, 2013.
- [13] D. Grujicic, I. Ivanovic, J. Jovic, V. Doric, “Customer perception of service quality in public transport,” *Transport*. vol. 29, no. 3, pp. 285-95, 2014.
- [14] A. A. Nwachukwu, “Assessment of passenger satisfaction with intra-city public bus transport services in Abuja, Nigeria,” *J. Public Trans.* vol. 17, no. 1, pp. 99-119, 2014.
- [15] M. Chowdhury, “Measuring commuters' satisfaction: the case of railway passengers of Bangladesh,” *ABAC J.* vol. 13, no. 2, pp. 11-27, 2015.
- [16] D. van Lierop, M. G. Badami, A. M. El-Geneidy, “What influences satisfaction and loyalty in public transport? a review of the literature,” *Transp. Rev.* vol. 38, pp. 52-72, 2018.
- [17] W. Kriswardhana, N. Hayati, D. Septiana, “Passenger satisfaction with railway station service quality: an ordinal logistic regression approach,” *MATEC Web Conf.* vol. 181, no. 07001, 2017.
- [18] M. Chaisomboon, S. Jomnonkwao, V. Ratanavaraha, “Elderly users' satisfaction with public transport in Thailand using different importance performance analysis approaches,” *Sustainability*. vol. 12, no. 21, p. 9066, 2020.
- [19] S. Jomnonkwao, T. Champahom, V. Ratanavaraha, “Methodologies for determining the service quality of the intercity rail service based on users' perceptions and expectations in Thailand,” *Sustainability*. vol. 12, no. 10, p. 4259, 2020.
- [20] International Transport Forum (ITF), “Measuring and valuing convenience and service quality: A review of global practices and challenges from the public transport sector,” OECD Publishing; Paris. Discussion Paper No. 2013-06, 2013.
- [21] J. D. Brown, “Choosing the right type of rotation in PCA and EFA,” Shiken: JALT Testing & Evaluation SIG Newsletter. vol. 13, no. 3, pp. 20-25, 2009.
- [22] I. T. Jolliffe, J. Cadima, “Principal component analysis: a review and recent developments,” *Phil. Trans. R. Soc. A*. vol. 374, no. 2065, 2016.
- [23] J. D. Brown, “Choosing the right number of components or factors in PCA and EFA,” Shiken: JALT Testing & Evaluation SIG Newsletter. vol. 13, no. 2, pp. 19-23, 2009.
- [24] P. Samuels, “Advice on exploratory factor analysis,” Birmingham City University: Centre for Academic Success, 2016.
- [25] G. Ursachi, I. A. Horodnic, A. Zait, “How reliable are measurement scales? external

- factors with indirect influence on reliability estimators,” *Procedia Econ.* Vol. 20, pp. 679-686, 2015.
- [26] D. Petrović, I. Ivanovic, J. Jović, V. Djoric, “Customer perception of service quality in public transport,” *Transport.* vol. 29, no. 3, 2014.
- [27] A. N. H. Ibrahim, M. N. Borhan, M. R. M. Yazid, R. A. Rahmat, S. Yukawa, “Factors influencing passengers’ satisfaction with the light rail transit service in alpha cities: evidence from Kuala Lumpur, Malaysia using structural equation modelling,” *Mathematics.* vol. 9, no. 1954, 2021.
- [28] A. Durand, N. Van Oort, S. Hoogendoorn, “Assessing and improving operational strategies for the benefit of passengers in rail-bound urban transport systems,” *Transp. Res. Rec.* vol. 2672, no. 8, 421-430, 2018.
- [29] F. Monsuur, M. Enoch, M. Quddus, S. Meek, “Modelling the impact of rail delays on passenger satisfaction,” *Transp. Res. A: Policy Pract.* Vol. 152, pp. 152:19-35, 2021.
- [30] J. Sneider. (2015). How transit agencies are trying to attract millennial riders [Online]. Available : [https://www.progressiverailroading.com/passenger\\_rail/article/How-transit-agencies-are-trying-to-attract-millennial-riders--44402](https://www.progressiverailroading.com/passenger_rail/article/How-transit-agencies-are-trying-to-attract-millennial-riders--44402)

## Appendix 1

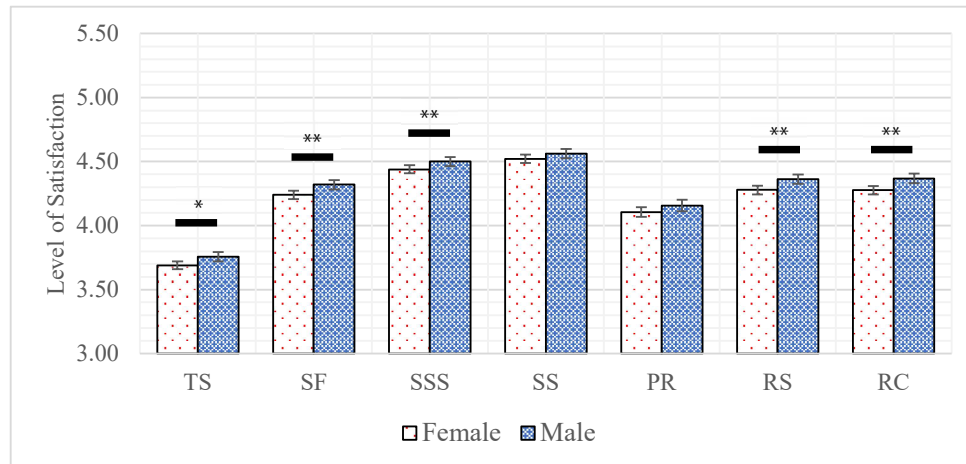
Initial list of service quality indicators

| Category                           | No. | Indicator               | Description                                                                                                                                                            |
|------------------------------------|-----|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ticket Price and Sales             | Q1  | Sales equipment         | Ticket booths and automatic ticket vending machines are properly serviced and ready to use.                                                                            |
|                                    | Q2  | Method of sales         | The method of selling and paying for ticket is convenient and fast.                                                                                                    |
|                                    | Q3  | Top-up options          | There are various methods and very convenient for topping-up tickets, such as ticket booths, automatic ticket vending machines, application, and internet banking.     |
|                                    | Q4  | Cost/distance           | Ticket price is appropriate for traveling distance.                                                                                                                    |
|                                    | Q5  | Value of comfort        | Ticket price is appropriate for comfortable and convenience.                                                                                                           |
|                                    | Q6  | Passenger rights        | Protection of passengers' rights is fair and appropriate, such as ticket cancellation and ticket refunding.                                                            |
| Facilities at the Station          | Q7  | Accessibility           | Easy and convenient to access a station.                                                                                                                               |
|                                    | Q8  | Parking                 | There is a proper Park-and-Ride facilities which are ready to use.                                                                                                     |
|                                    | Q9  | Walkways                | There is a proper walkway which are available and ready to use.                                                                                                        |
|                                    | Q10 | Pick-up/drop-off        | There is a convenient and safe passenger pick-up point.                                                                                                                |
|                                    | Q11 | Directional information | There is a clear direction sign and map showing the route inside station.                                                                                              |
|                                    | Q12 | Travel information      | There is an information display/audio announcing about travel information and necessary travel advices such as the next station, route, warnings and precautions.      |
|                                    | Q13 | Ticket gates            | There is an automatic ticket gate in service and ready for use.                                                                                                        |
|                                    | Q14 | Waiting area            | There is sufficient and suitable space for waiting trains on the platform.                                                                                             |
|                                    | Q15 | Vertical transport      | There is an escalator/elevator, and wheelchair ramps for handicapped which are available and ready to use.                                                             |
|                                    | Q16 | Other facilities        | Other facilities are adequate and appropriate, such as ATMs, shops and convenience stores.                                                                             |
| Security and Safety at the Station | Q17 | Station cleanliness     | The station and the area surrounding the station are clean.                                                                                                            |
|                                    | Q18 | Air quality             | There is a ventilation system/air conditioning system that is efficient, such as does not produce unpleasant odors, and do have the right temperature.                 |
|                                    | Q19 | Station safety          | It is safe to use the service, such as having a security guard, there is a yellow line indicating a safety zone around the platform, and passenger baggage inspection. |
|                                    | Q20 | Station security        | Safe from crime and theft. especially in dimly lit areas and blind spots.                                                                                              |

| Category                          | No. | Indicator                | Description                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------|-----|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Staff at the Station              | Q21 | Staff personality        | Staffs have nice personality and dress neatly.                                                                                                                   |
|                                   | Q22 | Staff attitude           | Provide polite and enthusiastic service/assistance.                                                                                                              |
|                                   | Q23 | Staff competence         | Provide accurate information when asking/can help solve immediate problems quickly.                                                                              |
| Public Relations, Information     | Q24 | Information availability | Accessibility to information/news on services is convenient and has various of channels.                                                                         |
| Provision, and Complaint Handling | Q25 | Notifications            | Notification of delays/disruptions/unusual events is clear and up-to-date.                                                                                       |
|                                   | Q26 | Complaint channels       | Complaints are convenient and there are various channels for complaints.                                                                                         |
|                                   | Q27 | Complaint management     | Able to resolve complaints with speed and efficiency.                                                                                                            |
| Rolling Stock                     | Q28 | Punctuality              | The service is punctual                                                                                                                                          |
|                                   | Q29 | Frequency                | The operating frequency is appropriate both during peak hour and off-peak hour                                                                                   |
|                                   | Q30 | Delay management         | Management during delay/disruption/unusual incident is appropriate                                                                                               |
|                                   | Q31 | Train cleanliness        | Vehicles are clean inside and out                                                                                                                                |
|                                   | Q32 | Seating                  | Sufficient seating/handrails are available with clean and ready to use                                                                                           |
|                                   | Q33 | On-board information     | There is an information display/audio announcing about travel information and necessary travel advices such as the next station, route, warnings and precautions |
|                                   | Q34 | Service application      | There is an application that provides sufficient and complete service information and up to date                                                                 |
|                                   | Q35 | Universal design         | Other facilities are adequate and appropriate, such as seats for the disabled, the elderly and pregnant women, and a lock for a wheelchair for the handicapped   |
|                                   | Q36 | On-board air quality     | There is an efficient ventilation/air conditioning system, such as. no unpleasant odors, and have the right temperature                                          |
|                                   | Q37 | On-board safety          | There is safety in using the service, such as having a security guard on the train, and inspection of suspicious or foreign objects                              |
|                                   | Q38 | On-board security        | Be safe from crime and theft problems such as preventing the loss of valuables, and preventing unrest on convoys                                                 |

## Appendix 2A

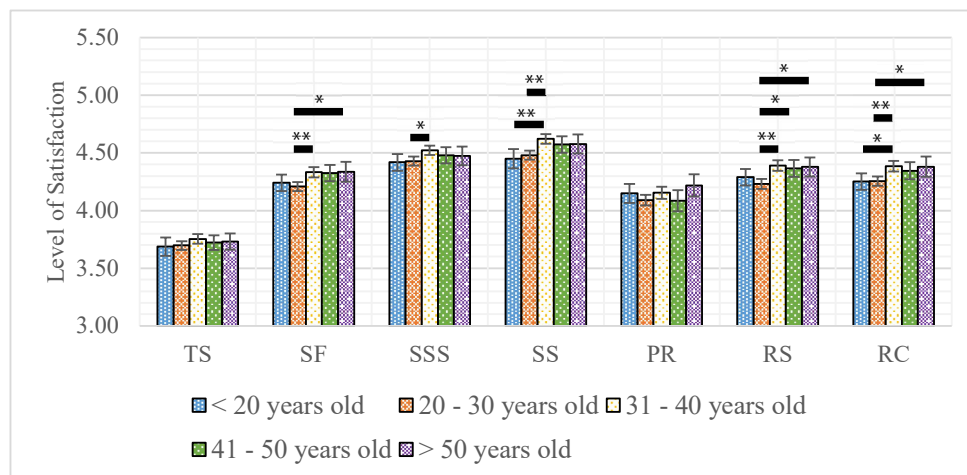
Level of satisfaction across gender



\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

## Appendix 2B

Level of satisfaction across age

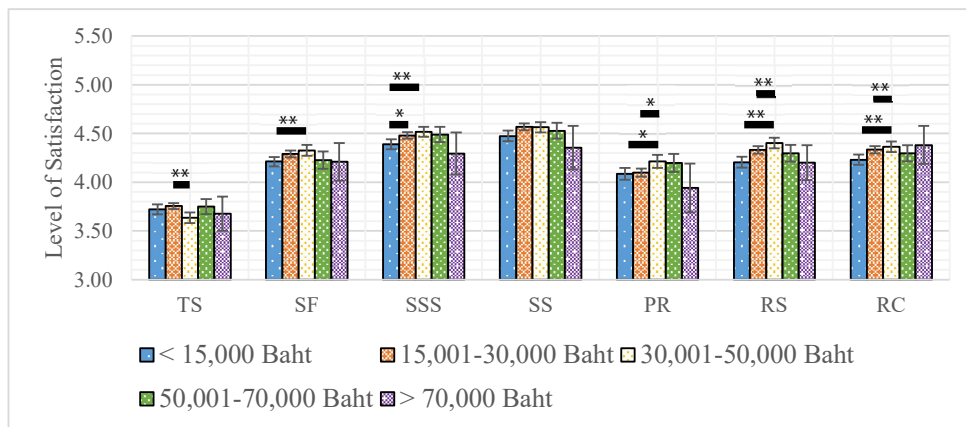


\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$



## Appendix 2C

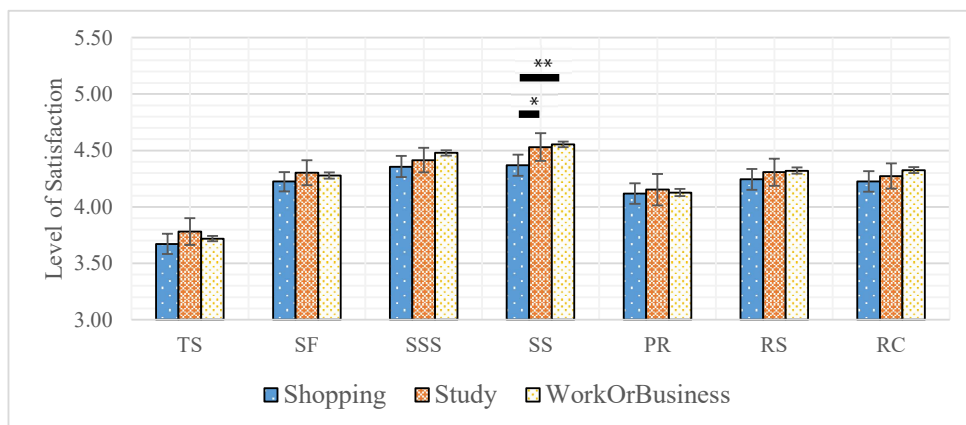
Level of satisfaction across income



\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

## Appendix 2D

Level of satisfaction across trip purpose



\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

**การกำหนดวิธีปฏิบัติการบินเข้าและออกของอากาศยานภายในเขตประชิดสนามบิน  
ระหว่างสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน และสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง  
อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน**

**Determination of the Method of Aircraft Inbound and Outbound Flight  
Operations within Terminal Control Area between  
the Current Chiang Mai Airport and the Second Chiang Mai Airport  
Banthi District, Lamphun Province**

พันศักดิ์ เนินทราย\* ณกร อินทรพวง

สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอมือฉ่างบุรี จังหวัดชลบุรี 20131

Pansak Nernsai\* Nakorn Indra-Payong

Logistics and Supply Chain Management Faculty of Logistics, Burapha University  
169 Long-hard Bangsean Road, Saensuk, Mueang, Chonburi 20131

\*Corresponding author, e-mail: pnernsai@gmail.com

(Received: March 10, 2023; Revised: March 22, 2022 ; Accepted: March 31, 2022)

**บทคัดย่อ**

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดวิธีปฏิบัติ (Procedure Design) ห้วงอากาศ โดยการใช้ Standard Instrument Departure : SID และ Standard Instrument Arrival : STAR เพื่อการบินเข้าและออกของอากาศยานภายในเขตประชิดสนามบินระหว่างสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบันและสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สอง โดยผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลพื้นฐานทางภูมิศาสตร์ อุปสรรคบริเวณโดยรอบของสนามบิน และข้อจำกัดของพื้นที่ทางอากาศที่จะส่งผลกระทบต่อการบินเข้า-ออกสนามบินของอากาศยาน รวมถึงรูปแบบการให้บริการการจราจรทางอากาศ ตลอดจนสถิติการให้บริการจราจรทางอากาศที่สามารถรองรับปริมาณอากาศยานได้สูงสุด ภายใต้กรอบแนวคิด และหลักการที่ใช้ประกอบการกำหนดวิธีปฏิบัติการบิน ผลจากการวิจัยสามารถกำหนดวิธีปฏิบัติของอากาศยานบิน เข้า-ออก ระหว่างสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน (VTCC) และสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน (VTCB) จำนวน 2 ทางวิ่ง รวม 4 ทิศทาง ที่ใช้สำหรับการบินของอากาศยานเข้าและออก โดยเชื่อมโยงไปจนถึงจุดรายงานหรือจุดส่งมอบการควบคุมอากาศยานระหว่างหน่วยงานจราจรทางอากาศ (Reporting Point/Transfer Point) ที่กำหนดขึ้น ประกอบด้วย VISES, LAMUN, ADLUS, MONLO, KABMU, ASAVI, PANTA, ENBAT, MARNI, GOGOP and PUMAM รวม 11 จุดรายงาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ

1. การกำหนดวิธีปฏิบัติการบินออกจากสนามบิน (Standard Instrument Departure : SID) ได้กำหนดเส้นทางหลักเพื่อควบคุมการบินของอากาศยานหลังจากวิ่งขึ้น (Path Descriptor/Waypoint Path) จำนวน 6 จุด คือ BANTI, DOILO, WEERA, FRANG, PHRAO และ YONOK ทำให้สามารถกำหนดแผนภูมิเส้นทางบินขาออก มีจำนวน 9 แผนภูมิ โดยกำหนด Climb Gradient 1 NM/300 ft หรือ 0.049 / 4.94% และกำหนดระยะสูงในแนวตั้ง (Vertical Separation)

ระหว่างอากาศยานที่กำลังบินออกจากสนามบิน ด้วยระยะสูง 1,000 ft หรือมากกว่า ตามมาตรฐานการจัดการจราจรทางอากาศ

2. การกำหนดวิธีปฏิบัติการบินเข้าสนามบิน (Standard Instrument Arrival : STAR) ได้กำหนดเส้นทางหลักเพื่อควบคุมการบินเข้าของอากาศยาน (Path Descriptor/Waypoint Path) จำนวน 8 จุดคือ PARNU, PASAK, SAKET, SUTEP, PINUM, SIAU, TAPAE และ WORAI ไปจนถึงจุดสุดท้ายของการบินเข้าสู่สนามบิน (Final Approach Fix: FAF) ทำให้สามารถกำหนดแผนภูมิเส้นทางบินเข้า มีจำนวน 11 แผนภูมิซึ่งกำหนด Descent Gradient ตามสมรรถนะของอากาศยาน แต่กำหนดช่วงระยะ Final Approach Segment ไว้ที่ 0.052 / 5.2% และกำหนดระยะสูงในแนวตั้ง (Vertical Separation) ระหว่างอากาศยานที่กำลังบินเข้าสู่สนามบิน ด้วยระยะสูง 1,000 ft หรือมากกว่า ตามมาตรฐานการจัดการจราจรทางอากาศ และความเร็วของ อากาศยานไม่เกิน 250 knots และเมื่อนำแบบวิธีปฏิบัติ (SID/STAR) มาทดสอบด้วยโปรแกรมแบบจำลองเสมือนจริง Air Traffic Control Radar Simulator โดยได้กำหนดรูปแบบการจราจรทางอากาศบินเข้า-ออก สำหรับ 2 สนามบิน ประกอบการทดสอบ จำนวน 3 รูปแบบ คือ อากาศยานบินออกจากสนามบิน อากาศยานบินเข้าสนามบิน และอากาศยานบินเข้าและออกจากสนามบินพร้อมกัน 2 สนามบิน โดยทดสอบกับตัวชี้วัดที่สามารถรองรับปริมาณการจราจรทางอากาศไม่น้อยกว่า 24 เที่ยวบิน/ชั่วโมง ตามสภาพการจราจรทางอากาศที่หนาแน่นสูงสุดในปัจจุบัน

ผลการทดสอบ ได้กำหนดเงื่อนไขการบินเข้า-ออก ตาม Profile ที่ได้กำหนดในวิธีปฏิบัติการบิน ภายใต้สภาพแวดล้อมการควบคุมการจราจรทางอากาศ พบว่า สามารถรองรับปริมาณการจราจรทางอากาศพร้อมกันทั้ง 2 สนามบินได้เฉลี่ย 40 เที่ยวบิน/ชั่วโมง ซึ่งเพิ่มขึ้นจากตัวชี้วัดที่กำหนด จำนวน 16 เที่ยวบิน คิดเป็นร้อยละ 66.67 ทั้งนี้ ปริมาณการจราจรทางอากาศสามารถเพิ่มขึ้นได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ ได้แก่ สภาพการจราจรทางอากาศ ในขณะนั้น การติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ควบคุมจราจรทางอากาศและนักบิน การโต้ตอบของนักบิน สมรรถนะของอากาศยาน ทิศทางการบินของอากาศยาน การกำหนดระยะห่างระหว่างอากาศยาน และความสามารถของผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศ ในการบริหารจัดการปริมาณการจราจรทางอากาศ ณ ขณะนั้น รวมถึงการประสานงานกันระหว่างหน่วยงานควบคุมจราจรทางอากาศ เป็นต้น

**คำสำคัญ:** การควบคุมการจราจรทางอากาศเขตประชิดสนามบิน, วิธีปฏิบัติการบินออกจากสนามบิน,วิธีปฏิบัติการบินเข้าสนามบิน

#### ABSTRACT

The objectives of this article was to determine the procedure design in the airspace by using Standard Instrument Departure: SID and Standard Instrument Arrival: STAR for aircraft inbound and outbound within Terminal Control Area between the current Chiang Mai Airport and the second Chiang Mai Airport, the researcher studied the geographical basis. Obstacles around the airport and restrictions on the air space will affect the aircraft's flight inbound and outbound of the airport.

This includes air traffic service models as well as air traffic service statistics that can handle the maximum aircraft volume. Within the framework of the concept and principles used to determine the method of flight operations. The results of the research can determine the operation of aircraft flying inbound and outbound between the current Chiang Mai Airport (VTCC) and the second Chiang Mai

Airport, Banthi District, Lamphun Province (VTGB) with 2 runways, including 4 directions used for the flight of aircraft inbound and outbound, linking to the reporting point/transfer point designated between air traffic service units (VISES, LAMUN, ADLUS, MONLO, KABMU, ASAVI, PANTA, ENBAT, MARNI, GOGOP and PUMAM), a total of 11 reporting points which can be divided into 2 main parts

1. The Standard Instrument Departure (SID) has established 6 main paths to control the flight of the aircraft outbound (Path Descriptor/Waypoint Path): BANTI, DOILO, WEERA, FRANG, PHRAO and YONOK. There are 9 charts that define climb Gradient 1 NM/300 ft or 0.049 / 4.94% and vertical separation between aircraft with a flight altitude above 1,000 ft or more.

2. Standard Instrument Arrival (STAR) has established 8 main paths to control the flight of the aircraft inbound (Path Descriptor/Waypoint Path) – PARNU, PASAK, SAKET, SUTEP, PINUM, SIAIU, TAPAE and WORAI to the final approach fix (FAF). There are 11 charts that define descent gradient according to the performance of the aircraft, but the final approach segment is set at 0.052 / 5.2% and the vertical separation between aircraft with a flight altitude above 1,000 ft or more and the speed of the aircraft does not exceed 250 knots.

The test results have determined the conditions of flight inbound and outbound according to the profile specified in the flight operation method. Under the air traffic control environment, it found that the air traffic volume at both airports was 40 flights per hour, an increase of 16 flights per hour, or 66.67 per cent.

The amount of air traffic can increase depending on key factors, including the air traffic conditions at that time. Communication between air traffic controllers and pilots Pilot interaction, aircraft performance flight direction of the aircraft determining the distance between aircraft and the capabilities of air traffic controllers to manage the air traffic volume at that time, including coordination between air traffic control agencies, etc.

**Keyword:** Approach control service, standard instrument departure, standard instrument arrival.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันจังหวัดเชียงใหม่มีปริมาณนักท่องเที่ยวและนักเดินทางเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง รวมทั้งรัฐบาลต้องการให้เชียงใหม่เป็นศูนย์กลางการคมนาคมในพื้นที่ภาคเหนือ จึงจำเป็นต้องวางแผนงาน เพื่อรองรับการขยายตัวของจำนวนผู้ใช้บริการ รวมทั้งเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหากระทบกับชุมชนที่อยู่อาศัยนอกจากนี้ยังสอดคล้องกับแนวทางของรัฐบาลที่มุ่งจะพัฒนาระบบโลจิสติกส์ ของประเทศในทุกด้าน ดังนั้นโครงการก่อสร้างสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สอง จึงต้องเริ่มวางแผนอย่างจริงจัง

เนื่องจากปริมาณผู้โดยสารที่ใช้บริการสนามบินเชียงใหม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ สนามบินเชียงใหม่มีความสามารถในการรองรับผู้โดยสารได้ 7-8 ล้านคนโดยผู้ใช้บริการได้เพิ่มขึ้นเป็น 5 ล้านคน ระหว่างปี 2555-2559 และจะขึ้นสู่ระดับ 8 ล้านคน ในปัจจุบัน หากตัวเลขยังคงเพิ่มขึ้นเช่นนี้ ในอนาคตก็จะเกินขีดความสามารถในการรองรับ โดยประเมินในเบื้องต้นว่า สนามบินเชียงใหม่จะสามารถรองรับผู้โดยสารได้อีก 5 ปี (2565) จึงจะเต็มศักยภาพ เนื่องจากการขนส่งทางอากาศหรือการจราจรทางอากาศในประเทศไทย ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก

การเพิ่มขึ้นของปริมาณการขนส่งทางอากาศนี้จะส่งผลให้เกิดความหนาแน่นของการจราจรทางอากาศ ในแต่ละสนามบิน โดยเฉพาะบริเวณสนามบินเชียงใหม่ ซึ่งในปัจจุบันมีข้อจำกัดหลายอย่าง และไม่สามารถขยายตัวเพื่อรองรับการเติบโตของปริมาณผู้ใช้บริการสนามบินได้ในอนาคตมากนัก อีกทั้งผู้ใช้บริการสนามบินได้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว รวมทั้งมีสายการบินจำนวนมากมาใช้บริการมากขึ้นเช่นกัน จึงจำเป็นต้องสร้างสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง สำหรับพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการสร้างสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สอง คือ พื้นที่ฝั่งตะวันออกของจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นพื้นที่ราบขนาดใหญ่ ซึ่งเดิมมีแนวคิดที่จะพัฒนาเป็นเมืองใหม่อยู่แล้ว รวมทั้งยังสามารถเชื่อมโยงไปสู่จังหวัดใกล้เคียงได้สะดวก เนื่องจากอยู่ใกล้กับถนนสายเชียงใหม่-ลำปาง และมีถนนวงแหวน ซึ่งสามารถรองรับการพัฒนาการขนส่งในพื้นที่ได้ บริษัทการทำอากาศยานแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน) (ทอท.) มีการจ้างบริษัทที่ปรึกษาสำรวจความเป็นไปได้ในการจัดสร้างสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สอง โดยมีสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย (กพท.) เป็นผู้ดำเนินการและสอดคล้องกับที่ ทอท.จ้างศึกษาวิจัยพื้นที่ ที่เหมาะสม ซึ่งมีอยู่หลายแห่งและมีความคิดเห็นตรงกันก็คือ พื้นที่ต่อเนื้อระหว่าง อ.สันกำแพง จ.เชียงใหม่ กับ อ.บ้านธิ จ.ลำพูน รวมพื้นที่ประมาณ 1 หมื่นกว่าไร่ เนื่องจากสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน เริ่มวิกฤติ ขณะนี้ได้รับงบประมาณอาคารผู้โดยสารเพิ่ม ขยายและต่อเติม รวมทั้งปรับปรุงอาคารผู้โดยสาร ทางวิ่ง ทางขับ ลานจอดอากาศยาน และลานจอดรถ ถึงแม้ว่าจะปรับปรุงสนามบินเชียงใหม่ ปัจจุบันแต่ก็รองรับได้เพียง 12 ล้านคนในอีก 5 ปี ข้างหน้าเท่านั้น หลังจากนั้นจะไม่มีพื้นที่รองรับได้อีก เนื่องจากได้ขยายจนเต็มพื้นที่แล้ว

ปัจจุบันขีดความสามารถของสนามบินเชียงใหม่ จากการสำรวจสภาพการให้บริการจราจรทางอากาศโดยศูนย์ควบคุมการบินเชียงใหม่ บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด สามารถรองรับเที่ยวบินได้ 24 เที่ยวบินต่อชั่วโมง ซึ่งหากคำนวณจากอัตราดังกล่าว

พบว่าใน 1 ปี สามารถรองรับเที่ยวบินได้ จำนวน 210,240 เที่ยวบิน ดังนั้นเมื่อสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สองเกิดขึ้น จะทำให้ปริมาณการจราจรทางอากาศบริเวณเขตประชิดสนามบินเพิ่มมากขึ้น ทำให้การจัดการจราจรทางอากาศของเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศทั้ง 2 สนามบินมีความซับซ้อนและยากต่อการให้บริการควบคุมจราจรทางอากาศ เนื่องจากอากาศยานมีจำนวนมากขึ้นกว่าเดิมและพื้นที่ในห้วงอากาศ ณ เขตประชิดสนามบินจำกัด ซึ่งพื้นที่ในห้วงอากาศของทั้ง 2 สนามบินทับซ้อนกัน จะมีอากาศยานวิ่งขึ้นและลงจอดจากทั้ง 2 สนามบิน ภายในเขตควบคุมการจราจรทางอากาศเดียวกัน (Terminal Control Area) โดยที่อากาศยานทั้งหมดจะต้องไม่บินเข้าใกล้กันต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด เพื่อความปลอดภัย เป็นระเบียบและมีความรวดเร็ว ตามวัตถุประสงค์ของการจัดการจราจรทางอากาศ จึงควรมีรูปแบบบริหารจัดการห้วงอากาศ บริเวณเขตประชิดสนามบินระหว่างสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบันและสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน เพื่อเป็นการเตรียมการขนส่งทางอากาศและการควบคุมการจราจรทางอากาศดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดกำหนดวิธีการปฏิบัติการบินเพื่อการบริหารจัดการห้วงอากาศ ณ บริเวณเขตประชิดสนามบิน ระหว่างสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบันและสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน โดยใช้วิธีปฏิบัติของ Standard Instrument Departure (SID) และ Standard Instrument Arrival (STAR) เข้ามาช่วยบริหารจัดการอากาศยานที่ทำการบินในห้วงอากาศดังกล่าว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบการบริหารสภาพคล่องของการจราจรทางอากาศ (Air Traffic Flow Management System) ทั้งนี้เพื่อให้การขนส่งทางอากาศ ณ สนามบินเชียงใหม่ มีความปลอดภัย รวดเร็ว และสิ้นเปลือง และไม่เกิดการคับคั่งหรือล่าช้าของอากาศยาน ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการควบคุมจราจรทางอากาศ

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 การบริหารห้วงอากาศ

เป็นแนวคิดที่ถูกตั้งขึ้นเพื่อเป็นการบริหารจัดการพื้นที่ในห้วงอากาศให้ถูกใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เหมาะสมกับประเภทและชนิดของผู้ใช้ห้วงอากาศ การบริหารห้วงอากาศ เป็นการจัดทำโครงสร้างในแต่ละด้านให้เหมาะสมกับปริมาณจราจรทางอากาศตามช่วงเวลา อาทิ การปรับโครงสร้างเส้นทางบิน การปรับโครงสร้างห้วงอากาศ และการปรับโครงสร้างพื้นที่ให้บริการ มีการดำเนินการได้หลายวิธี ดังนี้

2.1.1 การสร้างเส้นทางบินแบบ Area Navigation (RNAV) โดยใช้เทคโนโลยีด้านการบินแบบ PBN (Performance Based Navigation) เพื่อสร้างเส้นทางบินคู่ขนาน (ลดระยะห่างระหว่างเส้นทางบิน) และเพิ่มขีดความสามารถรองรับปริมาณเที่ยวบิน (ลดระยะต่อของอากาศยานบนเส้นทางบิน) และการจัดการจราจรแบบทางเดียว (Uni-Directional) เพื่อเพิ่มความปลอดภัยสำหรับอากาศยานที่บินสวนทางกัน และลดภาระงานให้กับเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศและนักบิน เช่น วิธีปฏิบัติแบบ Standard Instrument Departure (SID) คือ มาตรฐานการบินออกจากสนามบินด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน หมายถึง เส้นทางบินออกของอากาศยานที่เชื่อมต่อระหว่างสนามบินหรือทางวิ่งที่กำหนดไปยังเส้นทางบิน และวิธีปฏิบัติแบบ Standard Instrument Arrival (STAR) คือ มาตรฐานการบินเข้าสนามบินด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน หมายถึง เส้นทางบินเข้าที่เชื่อมต่อระหว่างจุดสำคัญบนเส้นทางบินไปยังจุดที่อากาศยานสามารถเริ่มทำการปฏิบัติการบินเข้าสู่สนามบินด้วยเครื่องวัดประกอบการบินได้ เข้ามาช่วยบริหารจัดการจราจรทางอากาศระหว่างอากาศยานที่ทำการบินอยู่ในห้วงอากาศนั้น

2.1.2 การบริหารและจัดแบ่งพื้นที่ควบคุมจราจรทางอากาศ (Sector design and Configuration) ให้เหมาะสมกับสภาพจราจรทางอากาศในแต่ละช่วงเวลาโดยการใช้ห้วงอากาศแบบคล่องตัว (Flexible Use of Airspace: FUA) เพื่อให้ห้วงอากาศมีความยืดหยุ่น มีการ

แบ่งช่วงเวลาการใช้งานระหว่างพื้นที่ทหาร-พลเรือนอย่างเหมาะสม สำหรับประเทศไทยมีการจัดทำความร่วมมือดังกล่าวระหว่างทหาร-พลเรือน ภายใต้ชื่อศูนย์ประสานงานบริหารจราจรทางอากาศระหว่างทหารและพลเรือน (Thai Civil/Military ATM Coordination Centre: Thai-CMAC

### 2.2 การบริหารสภาพคล่องของการจราจรทางอากาศ

การบริหารสภาพคล่องของการจราจรทางอากาศ คือ การทำให้การไหลของปริมาณการจราจรทางอากาศอยู่ในระดับที่ดีที่สุดผ่านพื้นที่ ที่ในเวลานั้นมีปริมาณความต้องการ การจราจรทางอากาศที่มากเกินไป หรือมีความคาดหวังว่าจะมากเกินไปเกินกว่าความสามารถในการรองรับที่ระบบการควบคุมจราจรทางอากาศจะมี ดังนั้นระบบการบริหารสภาพคล่องของการจราจรทางอากาศ จึงต้องลดปริมาณความล่าช้าของอากาศยานที่เกิดขึ้น ทั้งจากในห้วงอากาศ และภาคพื้นดิน รวมไปถึงการป้องกันการรองรับปริมาณการจราจรที่มากเกินไปของระบบ ซึ่งระบบการบริหารสภาพคล่องของการจราจรทางอากาศจะเป็นส่วนสนับสนุนการบริการควบคุมจราจรทางอากาศให้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ และสามารถทำให้การใช้งานความสามารถในการรองรับของ Airspace และ Airport เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งหน่วยการบริหารสภาพคล่องของการจราจรทางอากาศควรมั่นใจว่า ระดับความปลอดภัยไม่ถูกลดความเข้มงวดลงจากการเพิ่มขึ้นของระดับความคับคั่งของปริมาณการจราจรในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ และในเวลาเดียวกันก็จะต้องสามารถแสดงให้เห็นถึงการบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพโดยปราศจากข้อจำกัดต่างๆ ที่ไม่จำเป็นที่จะส่งผลต่อการไหลของปริมาณการจราจรทางอากาศ กระบวนการปฏิบัติการจัดการความคล่องตัวซึ่งเป็นกระบวนการที่คอยเฝ้าระวังการดำเนินไปของอากาศยาน และเข้าไปจัดการกับการปฏิบัติการบินเมื่อพบกับข้อจำกัดของระบบการบริหารจัดการจราจรทางอากาศ เช่น มาตรฐานการจัดระยะห่างของอากาศยาน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ระบบอัตโนมัติมีการใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้น เมื่อผู้ใช้ตัดสินใจว่าแผนการบินต้องการเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุง จะมี

การสร้างกระบวนการติดต่อสื่อสารระหว่างระบบคอมพิวเตอร์ที่จัดการข้อมูลการบินบนอากาศยาน กับระบบการจัดการภาคพื้น เพื่อหาเส้นทางใหม่ที่ดีที่สุดและตรงตามความต้องการของวัตถุประสงค์ของผู้ใช้ รวมไปถึงสามารถปฏิบัติการบินภายใต้ข้อจำกัดของระบบการบริหารจัดการจราจรทางอากาศในทางเดียวกัน เมื่อระบบการจัดการภาคพื้น ได้รับข้อมูลในการจัดการให้เส้นทาง การปฏิบัติการบินปราศจากอากาศยาน ระบบคอมพิวเตอร์ของระบบการบริหารจัดการจราจรทางอากาศ จะติดต่อสื่อสารกับระบบคอมพิวเตอร์ที่จัดการข้อมูลการบินบนอากาศยาน เพื่อกำหนดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ให้สามารถปฏิบัติการบินภายใต้ข้อจำกัดของระบบการบริหารจัดการจราจรทางอากาศด้วยความคลาดเคลื่อนจากเส้นทางที่ผู้ใช้ต้องการให้น้อยที่สุด ซึ่งกระบวนการติดต่อสื่อสารนี้จะเป็นการติดต่อสื่อสารที่ประกอบไปด้วย นักบิน และผู้ควบคุมจราจรทางอากาศซึ่งอยู่ในระดับที่ทำให้บุคคลทั้งสองสามารถฝึกฝนการจัดการและสามารถควบคุมความรับผิดชอบของตนเองได้ ซึ่งสิ่งสำคัญคือ การผนวกรวม การให้บริการจราจรทางอากาศกับการบริหารจัดการความคล่องตัวของอากาศยานให้เป็นระบบเดียว และมีทิศทางไปในทางเดียวกัน ดังนั้น ระบบการบริหารสภาพคล่องของการจราจรทางอากาศจึงต้องให้ความสำคัญลดภัยตามหลักเกณฑ์ ลดปริมาณความล่าช้าของอากาศยานที่เกิดขึ้น ทั้งจากในห้วงอากาศ และภาคพื้นดิน รวมไปถึงการป้องกันการรองรับปริมาณการจราจรที่มากเกินไปของระบบ ซึ่งระบบการบริหารสภาพคล่องของการจราจรทางอากาศจะเป็นส่วนสนับสนุนการบริการควบคุมจราจรทางอากาศให้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ และสามารถทำให้การใช้งาน ความสามารถในการรองรับของห้วงอากาศ และสนามบินให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.3.1 การศึกษาข้อมูลพื้นฐาน ความสำคัญของสิ่งที่ศึกษา ทั้งในระดับนโยบาย ระดับ ยุทธศาสตร์ ไปสู่หน่วยงาน ณ สนามบินเชียงใหม่ รวมถึงข้อมูลการให้บริการการเดินอากาศ เครื่องช่วยเดินอากาศ ข้อมูลด้าน

ภูมิศาสตร์ และอุปสรรคสิ่งกีดขวางที่ส่งผลกระทบต่อการบินอากาศ

2.3.2 การศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูล แนวคิดหลักการ ทฤษฎี วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดวิธีปฏิบัติสำหรับอากาศยาน เข้า-ออก ระหว่างสนามบิน

2.3.3 การกำหนดวิธีปฏิบัติในห้วงอากาศสำหรับอากาศยานเข้า-ออก สนามบิน ให้เป็นไปตามคุณลักษณะพื้นฐานของวิธีปฏิบัติการบินขององค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ภายใต้การให้คำปรึกษาโดยผู้เชี่ยวชาญ ในวิธีการปฏิบัติการบิน และการควบคุมจราจรทางอากาศ

2.3.4 การตรวจสอบมาตรฐาน และการทดลองสิ่งที่ได้ทำการกำหนดวิธีปฏิบัติด้วยอุปกรณ์เสมือนจริง (ATC Radar Simulator) โดยกำหนดให้สามารถรองรับปริมาณการจราจรได้สูงสุดไม่น้อยกว่า 24 เที่ยวบิน/ชั่วโมง ภายใต้การกำกับดูแลของผู้เชี่ยวชาญด้านการควบคุมจราจรทางอากาศ

2.3.5 สรุปผล และรายงานผลการวิจัย ผู้วิจัยจัดทำรายงานสรุปผลการวิจัย และอภิปรายผล ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัย พร้อมทั้งแสดงทรรศนะนำผลการวิจัยไปพัฒนาต่อยอดการวิจัยต่อไป

### 2.4 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ สิ่งที่ศึกษาคือ สภาพภูมิประเทศโดยรอบ และห้วงอากาศของสนามบินเชียงใหม่ ปัจจุบัน และสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สอง เพื่อนำมากำหนดวิธีปฏิบัติในห้วงอากาศระหว่างสนามบิน ได้แก่ ข้อมูลภูมิประเทศโดยรอบพื้นที่สนามบิน (Topographic Map) ระดับความสูงของพื้นที่ภูมิประเทศทางกายภาพ ทั้งภูเขา อาคารสูง หรือสิ่งกีดขวาง Obstacles ที่มีผลกระทบต่อการบิน ข้อมูลเส้นทางบิน (ATS Route) ของสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบันและสนามบินแห่งที่สอง โดยวัดรัศมีจากสถานีเครื่องช่วยเดินอากาศ VHF Omnidirectional Radio Range (VOR) ออกไป 200 ไมล์ ระบบเครื่องช่วยเดินอากาศ (Navigation Aids System), ข้อมูลการแจ้งเตือนการเดินอากาศ

(Navigation Warning) ในห้วงอากาศ (Airspace) เช่น การกำหนดพื้นที่อันตราย (Danger Area), พื้นที่หวงห้าม (Prohibited Area), พื้นที่จำกัด (Restricted Area) และสมรรถนะของอากาศยาน (Aircraft Performance), การเพิ่มศักยภาพของระบบการเดินอากาศในพื้นที่เส้นทางบิน และพื้นที่เข้า-ออกสนามบิน การกำหนดวิธีปฏิบัติสำหรับ แผนภูมิมาตรฐานการควบคุมอากาศยานออกจาก สนามบินด้วยเครื่องวัด (Standard Instrument Departure; SID) และแผนภูมิมาตรฐานการควบคุม อากาศยานเข้าสู่สนามบินด้วยเครื่องวัด (Standard Instrument Arrival; STAR) ภายใต้เงื่อนไข Standard, Safety, Efficiency and Quality

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากผลการทดสอบการกำหนดวิธีปฏิบัติสำหรับ อากาศยาน เข้า-ออก ระหว่างสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน และสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สองด้วยอุปกรณ์เสมือนจริง รวมทั้งกำหนดรูปแบบและปริมาณอากาศยานให้มีความ หลากหลาย และสอดคล้องกับสภาพการจราจรทาง อากาศของพื้นที่ที่ศึกษา เพื่อทดสอบแผนภูมิ (Chart) ที่ได้ กำหนดขึ้น ว่ามีความสามารถรองรับปริมาณการจราจร ทางอากาศได้เฉลี่ยในหนึ่งชั่วโมงจำนวนเท่าใด ตาม Profile ที่ได้กำหนดไว้ในวิธีปฏิบัติ SID/STAR ภายใต้ สภาพแวดล้อมการควบคุมการจราจรทางอากาศ (Air Traffic Control Environment) ซึ่งผู้วิจัยคาดหวังว่า ผล การกำหนดวิธีปฏิบัติการบินดังกล่าวจะสามารถรองรับ ปริมาณการจราจรทางอากาศได้มากกว่าสถิติปริมาณ การจราจรทางอากาศของศูนย์ควบคุมการบินเชียงใหม่ใน ปัจจุบัน ที่สามารถรองรับได้ในกรณีสภาพการจราจร หนาแน่น (Peak Hour) โดยเฉลี่ย 24 เที่ยวบิน/ชั่วโมง ซึ่งผลจากการทดสอบปริมาณการจราจรทางอากาศภายใต้ เงื่อนไขที่ผู้วิจัยได้กำหนดดังที่กล่าวข้างต้นสำหรับการบิน เข้า-ออก ระหว่างสนามบินได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

รูปแบบที่ 1 อากาศยานบินขึ้นพร้อมกัน ทั้งสอง สนามบิน (สนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน VTCC และสนามบิน เชียงใหม่ แห่งที่สอง อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน VTCB )

ผู้วิจัยได้ระบุเงื่อนไขในสภาพแวดล้อมการควบคุม การจราจรทางอากาศด้วยระบบเรดาร์ (ATC Surveillance System Environment) ให้เป็นไปตาม มาตรฐานของ ICAO ที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. อากาศยานบินขึ้นพร้อมกันทั้ง 2 สนามบิน (VTCC & VTCB)
2. ระยะห่างระหว่างอากาศยาน (Separation) อย่าง น้อย 5 NM
3. ความเร็วของอากาศยาน (Aircraft Speed) ที่ ระยะ Final Segment (up to 4 NM) จากจุดเริ่มต้นของ ทางวิ่ง (Threshold of Runway) ความเร็ว (IAS) 180 knot or 180 NM/hr ที่ระดับความสูงไม่เกิน 11,000 ft โดยอากาศยานสามารถบินได้ระยะทางเฉลี่ย  $(180 \text{ NM}) / (60 \text{ min}) = 3 \text{ NM/min}$

4. อ้างอิง Longitudinal separation minima based on time สำหรับ aircraft maintaining at the same level and same track ในเวลา 3 นาที อนุญาต ให้อากาศยานสามารถบินขึ้นได้ 1 ลำ ดังนั้นพิจารณา 2 สนามบิน (VTCC & VTCB) จึงสามารถให้อากาศยานบิน ขึ้นได้ 2 ลำ ซึ่งจากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

ผลการทดสอบ : เวลา 1 ชั่วโมง พบว่าอากาศยาน สามารถวิ่งขึ้นพร้อมกันทั้ง 2 สนามบิน (VTCC & VTCB) ได้ปริมาณเฉลี่ย 20 เที่ยวบิน/สนามบิน หรือ 40 เที่ยวบิน / 2 สนามบิน

เปรียบเทียบกับตัวชี้วัด 24 เที่ยวบิน/ชั่วโมง โดยการ กำหนดวิธีปฏิบัติใหม่ สามารถรองรับปริมาณเที่ยวบิน เฉลี่ย 40 เที่ยวบิน/ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าปัจจุบัน 16 เที่ยวบิน/ชั่วโมง

รูปแบบที่ 2 อากาศยานบินลงพร้อมกัน 2 สนามบิน (สนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน VTCC และสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน VTCB )

ผู้วิจัยได้ระบุเงื่อนไขในการควบคุมปริมาณการจราจร ทางอากาศให้เป็นไปตามมาตรฐานของ ICAO โดยเป็น เงื่อนไขเดียวกันกับที่ได้ระบุไว้ใน การทดสอบตามรูปแบบที่ 1 ซึ่งจากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ได้ผลการทดสอบดังนี้



ผลการทดสอบ : เวลา 1 ชั่วโมง พบว่าอากาศยานสามารถบินลงพร้อมกันทั้ง 2 สนามบิน (VTCC & VTCB) ได้ปริมาณเฉลี่ย 20 เที่ยวบิน/สนามบินหรือ 40 เที่ยวบิน / 2 สนามบิน

เปรียบเทียบกับตัวชี้วัด 24 เที่ยวบิน/ชั่วโมง โดยการกำหนดวิธีปฏิบัติใหม่ สามารถรองรับปริมาณเที่ยวบินเฉลี่ย 40 เที่ยวบิน/ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าปัจจุบัน 16 เที่ยวบิน/ชั่วโมง

รูปแบบที่ 3 อากาศยานบิน เข้า-ออก ระหว่าง 2 สนามบินพร้อมกัน (สนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน VTCC และสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน VTCB )

ผู้วิจัยได้ระบุเงื่อนไขของ Profile ตามรูปแบบวิธีปฏิบัติการบิน SID/STAR charts โดยเป็นเงื่อนไขเดียวกันกับที่ได้ระบุไว้ใน การทดสอบตามรูปแบบที่ 1 รวมทั้งเงื่อนไขการพิจารณาให้อากาศยานวิ่งขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออากาศยานที่บินเข้ามาก่อนทำการบินลงทางวิ่งจะต้องมีระยะห่างจากหัวทางวิ่ง (Threshold of runway) ไม่น้อยกว่า 5 NM ซึ่งจากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ได้ผลการทดสอบดังนี้

ผลการทดสอบ: เวลา 1 ชั่วโมงพบว่าอากาศยานสามารถบินขึ้น-ลง พร้อมกันทั้ง 2 สนามบิน (VTCC & VTCB) ได้ปริมาณเฉลี่ย 20 เที่ยวบิน/สนามบิน หรือ 40 เที่ยวบิน / 2 สนามบิน

เปรียบเทียบกับตัวชี้วัด: 24 เที่ยวบิน/ชั่วโมง โดยการกำหนดวิธีปฏิบัติใหม่ สามารถรองรับปริมาณเที่ยวบินเฉลี่ย 40 เที่ยวบิน/ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าปัจจุบัน 16 เที่ยวบิน/ชั่วโมง ผลจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีปฏิบัติในห้วงอากาศสำหรับ Standard Instrument Departure (SID) และ Standard Instrument Arrival (STAR) ระหว่างสนามบินเชียงใหม่ ปัจจุบัน Chiang Mai International Airport (VTCC) และสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สอง Ban Thi Airport (VTCB) โดยทำการกำหนดวิธีปฏิบัติการบินออกจากสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน VTCC\_RWY 18/36 จำนวน 2 ทางวิ่ง และสนามบินเชียงใหม่แห่งที่ 2 VTCB\_RWY

18/36 จำนวน 2 ทางวิ่ง ดังนั้นจึงได้กำหนดวิธีปฏิบัติของอากาศยานบิน เข้าและออกระหว่างสนามบิน VTCC และ VTCB รวม 4 ทิศทาง ที่ใช้สำหรับการบินเข้าและออก โดยมีการกำหนดวิธีปฏิบัติได้ ดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 การกำหนดวิธีปฏิบัติการบินออกจากสนามบิน (Standard Instrument Departure SID) ประกอบด้วย SID RWY 18/36 จำนวน 1 Chart, SID RWY 18 จำนวน 1 Chart, SID RWY 36 จำนวน 1 Chart และสามารถกำหนดแผนภูมิการบินขาออกของอากาศยานได้ดังนี้ BANTI, DOILO, WEERA, FRANG, PHRAO และ YONOK จำนวน 6 แผนภูมิ รวมการออกแบบในกลุ่มที่ 1 จำนวน 9 แผนภูมิ โดยมีหลักสำคัญที่ใช้ในการกำหนดดังนี้

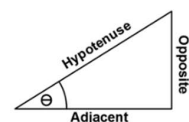
การกำหนดสมรรถนะของอากาศยาน (Aircraft Performance) โดยเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการออกแบบ คือ อากาศยานใช้ระยะทาง 1 NM สามารถบินได้ระดับความสูง (Step Climb) ได้ระดับความสูงเฉลี่ย 300 ft

การหาความชันในการบินไต่หาระยะสูง Climb Gradient โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของ Trigonometric Function เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวและมุมของรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่ใช้ร่วมกันสมมุติให้ชื่อ Theta ( $\theta$ ) ซึ่งอาศัยฟังก์ชันหนึ่งจากหลักการพื้นฐานดังกล่าว คือ Tangent Function = Opposite/Adjacent ดังแสดงในรูปที่ 1 – 2

จากการกำหนด Climb Gradient ในข้างต้นของอากาศยานโดยเฉลี่ยที่ระยะทาง 1 NM สามารถไต่ระดับความสูงที่ 300 ft จึงสามารถกำหนดการรูปแบบการคำนวณหาความสูงในลำดับถัดไปของการออกแบบวิธีปฏิบัติได้ดังรูปที่ 3 – 4

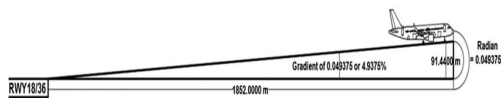
$$\tan \theta = \frac{\text{Opposite}}{\text{Adjacent}}$$

$$\text{Therefore; Climb Gradient} = \frac{\text{Height}}{\text{Distance}}$$



รูปที่ 1 Tangent Function for climb gradient

$$\begin{aligned}\text{Climb Gradient} &= \frac{\text{Height}}{\text{Distance}} \\ &= \frac{300\text{ft}}{1\text{NM}} \text{ or } \frac{91.44\text{ m}}{1\text{ NM}} \\ &= \frac{300\text{ft}}{6076\text{ ft}} \text{ or } \frac{91.44\text{m}}{1852\text{m}}; 1\text{NM} = 6076\text{ft}, 1852\text{m} \\ &= 0.049375 \\ &= 0.049375 \times 100 = 4.9375\%\end{aligned}$$

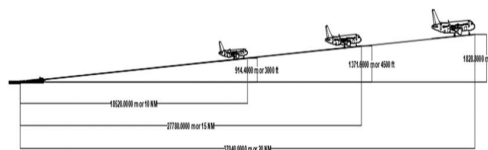


รูปที่ 2 Fundamental Model of Climb gradient

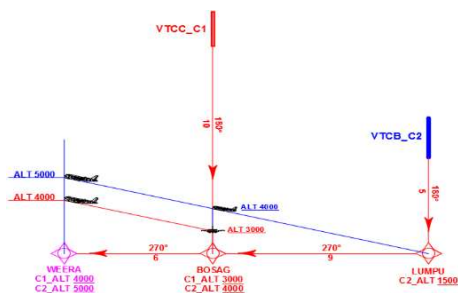
$$1\text{NM} = 300\text{ ft}$$

$$\text{Vertical Distance or Height} = \text{Distance (NM)} \times 300\text{ (ft)}$$

$$\text{Therefore; Vertical Distance or Height} = X \times 300\text{ (ft)}; = \text{Distance (NM)}$$



รูปที่ 3 Model Application of climb gradient  
in profile view



รูปที่ 4 Model Application of climb gradient  
in both plan and profile views

การกำหนดระยะสูงในแนวตั้ง (Vertical Separation) ระหว่างอากาศยานออกจากสนามบินด้วยระยะสูง 1,000 ft หรือมากกว่า ตามมาตรฐานการ

จัดการจราจรทางอากาศ การหาอัตราการใช้ระดับการบิน (Rate of Climb) โดยใช้หลัก Trigonometric functions มาประกอบการพิจารณา ควบคู่ไปกับความเร็วของอากาศยาน (Aircraft Speed) ดังนั้นการคำนวณอัตราการใช้ระยะสูง ( $\text{ft}/\text{min}$  or  $\text{m}/\text{sec}$ ) ดังนี้

Ground speed (GS) = Indicated Airspeed (IAS) or speed without wind component

If a unit of Rate of Climb in feet per minute

$$\text{ft/min} = \text{Tan}(angle) \times \text{GS or IAS}; 1\text{ kt or } \frac{\text{NM}}{\text{hr}}; \text{ and } 1\text{NM} = 6076\text{ ft}$$

$$\text{ft/min} = \text{Tan}(angle) \times 6076 \times \frac{\text{Distance(NM)}}{\text{Time(hr)}}$$

$$\text{ft/min} = \text{Tan}(angle) \times 6076 \times \frac{\text{Distance(NM)}}{60\text{ (min)}}$$

$$\text{ft/min} = \frac{\text{Tan}(angle) \times 6076 \times \text{Distance(NM)}}{60} \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

Where GS is ground speed in kt

If a unit of Rate of Climb in metres per second

$$\text{m/s} = \text{Tan}(angle) \times \text{GS or IAS}; 1\text{ kt or } \frac{\text{NM}}{\text{hr}}; \text{ and } 1\text{NM} = 1852\text{ m}$$

$$\text{m/s} = \text{Tan}(angle) \times \frac{\text{Distance(NM)} \times 1852\text{(m)}}{1000\text{m}} \frac{\text{m}}{\text{Time(hr)}}$$

$$\text{m/s} = \frac{\text{Distance(km)}}{\text{Time(hr)}}; \text{GS or IAS} = \text{km/hr}$$

$$\text{m/s} = \text{Tan}(angle) \times 1000 \times \frac{\text{Distance(km)}}{60 \times 60\text{ (s)}}$$

$$\text{m/s} = \frac{\text{Tan}(angle) \times 1000 \times \text{Distance(km)}}{3600} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Where GS is ground speed in km/hr

การจัดระยะห่างของอากาศยานในทางตั้ง (Vertical Separation) ตามมาตรฐานระหว่างอากาศยานมีระยะห่าง 300 เมตร หรือ (1,000 ฟุต) ที่ระดับบินต่ำกว่า 29000 ฟุต และระยะห่าง 600 เมตร (2,000 ฟุต) ที่ระดับบินสูงกว่า 29000 ฟุต

กลุ่มที่ 2 การกำหนดวิธีปฏิบัติการบินเข้าสนามบิน (Standard Instrument Arrival; STAR) ประกอบด้วย

STAR RWY 18/36 จำนวน 1 แผนภูมิ, STAR RWY 18 จำนวน 1 แผนภูมิ, STAR RWY 36 จำนวน 1 แผนภูมิ และสามารถกำหนดแผนภูมิการบินเข้าของอากาศยาน ได้ ดังนี้ PARNU, PASAK, SAKET, SUTEP, PINUM, SAI AU, TAPAE และ WORAI จำนวน 8 แผนภูมิ รวมการออกแบในกรณีที่ 2 จำนวน 11 แผนภูมิ

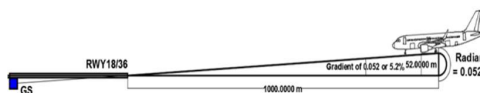
ดังนั้น ผู้วิจัยสามารถกำหนดวิธีปฏิบัติของอากาศยาน บิน เข้า-ออก ระหว่างสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน VTCC และสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง อำเภอบ้านธิ จังหวัด ลำพูน VTCC ได้จำนวนทั้งสิ้น 20 แผนภูมิ

การกำหนดแนวร่อนการบิน (Descent Gradient) และอัตราการลดระดับการบิน (Rate of Descent) ได้ กำหนดแนวทางการออกแบบโดยควบคุมการลดระดับ แนวร่อนโดยอาศัยหลักการพื้นฐาน Descent Gradient ตามเอกสารอ้างอิง (Doc 8168 OPS/611 Aircraft Operations Vol. I Flight Procedures, Section 4 Chapter 1, 1.9 Descent Gradient, 1.9.2 and 1.9.3) ซึ่งการพิจารณาหาค่าจาก Optimum Descent Gradient 5.2 percent/3.0° (52 m/km (318 ft/NM)) สามารถนำ หลักการที่ได้มาตรวจสอบค่า Descent Gradient ได้ดัง รูปที่ 5

$$\text{Descent Gradient} = \frac{\text{Height}}{\text{Distance}}$$

$$\text{Find from descent gradient } 52\text{m/km}; = \frac{52\text{ m}}{\text{km}} = \frac{52\text{ m}}{1000\text{ m}}$$

$$\text{Descent Gradient} = 0.052 = 5.2\%$$



รูปที่ 5 Fundamental Model of Descent gradient

เมื่อพิจารณาจากการผลการคำนวณในข้างต้น ซึ่งได้จากการนำ Tangent Function มาหาค่า Descent

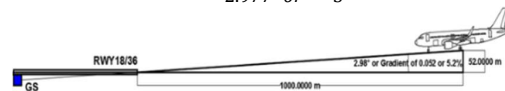
Gradient จากอัตราการลดระดับที่ ระยะทาง 1 km ต่อ ความสูง 52 m ได้ค่า 0.052 คิดเป็น 5.2 % โดยหากนำ ค่า Gradient = 0.052 มาแทนในส่วนกลับของ Tangent Function หรือ Arctan จะได้ค่าดังรูปที่ 6

$$\tan(\text{angle}) = \text{Gradient}$$

$$\text{Angle} = \frac{\text{Gradient}}{\tan}$$

$$\text{Angle} = \tan^{-1} \text{ or arctan (gradient)}$$

$$\begin{aligned} \text{Therefore: Angle in Degrees} &= \frac{1}{\tan(\text{gradient})} \text{ or } \tan^{-1} \text{ or arctan (gradient)} \\ &= \text{atctan}(0.052) \\ &= 2.977^\circ \text{ or } \approx 3^\circ \end{aligned}$$



รูปที่ 6 Conversion of descent gradient to degree

โดยที่การกำหนดระยะสูงในแนวตั้ง (Vertical Separation) ระหว่างอากาศยานเข้าสนามบิน ด้วย ระยะสูง 1,000 ft หรือมากกว่า ตามมาตรฐานการจัดการจราจรทางอากาศ การหาอัตราการลดระดับการบิน (Rate of Descent) โดยใช้หลัก Trigonometric functions มาประกอบการพิจารณา ควบคุมไปกับความเร็วของอากาศยาน (Aircraft Speed) ดังนั้นการคำนวณอัตราการลดระยะสูง ( $\text{ft}/\text{min}$  or  $\text{m}/\text{sec}$ ) ดังนี้

Ground speed (GS) = Indicated Airspeed (IAS) or speed without wind component

If a unit of rate of descent in feet per minute

$$\text{ft/min} = \tan(\text{angle}) \times \text{GS or IAS}; 1 \text{ kt or } \frac{\text{NM}}{\text{hr}}; \text{ and } 1 \text{ NM} = 6076 \text{ ft}$$

$$\text{ft/min} = \tan(\text{angle}) \times 6076 \times \frac{\text{Distance(NM)}}{\text{Time(hr)}}$$

$$\text{ft/min} = \tan(\text{angle}) \times 6076 \times \frac{\text{Distance(NM)}}{60 \text{ (min)}}$$

$$\text{ft/min} = \frac{\tan(\text{angle}) \times 6076 \times \text{Distance(NM)}}{60} \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

Where GS is ground speed in kt

If a unit of Rate of Climb in metres per second

รูปที่ 9 Holding Pattern of STAR in Profile

#### 4. บทสรุป

ผลที่ได้จากการกำหนดวิธีปฏิบัติการบินโดยใช้ (SID/STAR) เพื่อปฏิบัติการบินเข้าและออก ระหว่าง สนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน (VTCC) และสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง (VTCB) สำหรับเส้นทางบินที่เชื่อมต่อจาก เครื่องช่วยเดินอากาศ (CMA DVOR) ของสนามบิน เชียงใหม่ไปยัง Reporting point หรือ Transition point จำนวนทั้งสิ้น 11 จุด เพื่อส่งมอบหน้าที่การบริการควบคุม จราจรทางอากาศระหว่างหน่วยงานของแต่ละพื้นที่ โดย ภายหลังที่ทำการกำหนดวิธีปฏิบัติการบินแล้ว ได้มีการ ทดสอบภายใต้สภาพแวดล้อมการควบคุมจราจรทาง อากาศ ด้วยระบบเรดาร์ (Air Traffic Control Environment) โดย ATC Simulator ตามที่ระบุในวิธี ปฏิบัติการบินที่ได้กำหนดไว้ (Profile) กับรูปแบบสภาพ การจราจรทางอากาศ จำนวน 3 รูปแบบ คือ การบินเข้า ของอากาศยานพร้อมกันทั้ง 2 สนามบิน, การบินออกของ อากาศยานพร้อมกันทั้ง 2 สนามบิน และการบิน เข้า-ออก ของอากาศยานพร้อมกันทั้ง 2 สนามบิน พบว่าในเวลา 1 ชั่วโมงสามารถรองรับปริมาณการจราจรทางอากาศได้ เฉลี่ย 40 เที่ยวบินต่อชั่วโมง โดยมากกว่าปริมาณ การจราจรทางอากาศที่รองรับได้ในปัจจุบันเฉลี่ย 24 เที่ยวบินต่อชั่วโมง จำนวน 16 เที่ยวบิน แต่ผลที่ได้จาก การทดสอบของงานวิจัยในครั้งนี้ เป็นเพียงการทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ใน Profile ของวิธีปฏิบัติใน แผนภูมิ (Charts) ซึ่งนักบินจะต้องควบคุมอากาศยานให้ เป็นไปตามวิธีปฏิบัติอย่างเคร่งครัด แต่ในการปฏิบัติงาน จริงยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อปริมาณการเพิ่มขึ้นและลดลง ของขีดความสามารถในการให้บริการควบคุมจราจรทาง อากาศ ตามที่ปรากฏในประเด็นพิจารณาที่มีความสำคัญ ดังต่อไปนี้

1. ข้อกำหนดที่ระบุในวิธีปฏิบัติการบิน (Profile of SID/STAR charts)
2. สภาพการจราจรในแต่ละช่วงเวลาในขณะนั้น (Current Traffic)

3. การสื่อสารระหว่างผู้ควบคุมจราจรทางอากาศและ นักบิน

4. การโต้ตอบของนักบิน (Pilot Reaction) ภายหลัง จากได้รับการอนุญาต (ATC Clearance) ในการควบคุม อากาศยานตามวิธีปฏิบัติการบินในแต่ละพื้นที่

5. สมรรถนะของอากาศยาน (Aircraft Performance) ทั้ง รูปแบบของอากาศยาน (Type of Aircraft), ความเร็ว (Speed), อัตราการไต่ระดับการบิน (Rate of climb) และอัตราการร่อนลง (Rate of descend)

6. ทิศทาง (Direction) ของอากาศยานที่ทำการบิน

7. การกำหนดระยะห่างระหว่างอากาศยาน (Separation)

8. ความสามารถของผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศ (ATC Competency) ในการบริหารจัดการปริมาณ การจราจรทางอากาศ ณ ขณะนั้น

9. การประสานงานระหว่างหน่วยงานควบคุมจราจร ทางอากาศในแต่ละพื้นที่ (Aerodrome Control Tower- Approach Control Unit และ Approach Control Unit-Area Control Center)

ผลจากการอภิปรายในข้างต้นหากนำมาวิเคราะห์ใน เชิงเปรียบเทียบเพื่อศึกษาแนวโน้มความเชื่อมโยงของ สถานการณ์สามารถนำมาอภิปรายภาพรวมที่เกิดขึ้นใน งานวิจัยครั้งนี้ได้ดังต่อไปนี้

1. ขีดความสามารถปัจจุบัน จากการศึกษาพบว่า สนามบินเชียงใหม่ได้ให้บริการอากาศยานตลอดทั้งปี โดย ผลจากการสำรวจสภาพการให้บริการจราจรทางอากาศ โดยศูนย์ควบคุมการบินเชียงใหม่ พบว่าใน 1 ปี สามารถ รองรับเที่ยวบินได้ จำนวน 210,240 เที่ยวบิน โดยมี เที่ยวบินเฉลี่ย 24 เที่ยวบินต่อชั่วโมง โดยรูปแบบวิธี ปฏิบัติการบินเข้าและออกจากสนามบินเชียงใหม่ที่ ดำเนินการอยู่ปัจจุบัน ยังสามารถรองรับการให้บริการได้ แต่ในทางปฏิบัติ มีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อความคล่องตัวใน การให้บริการจราจรทางอากาศ ประกอบด้วยปัจจัยสำคัญ ดังต่อไปนี้

1.1 ข้อจำกัดของพื้นที่ให้บริการควบคุมจราจรทางอากาศ อุปสรรคที่ส่งผลต่อการบินเข้า-ออกสนามบินของอากาศยานที่สำคัญคือ ข้อจำกัดการใช้พื้นที่ห้วงอากาศ (Airspace Restriction) ในเรื่องกำหนดในพื้นที่เตือนภัยทางอากาศ Air Navigation Warning ประกอบด้วย Restricted Area และ Danger Area ของพื้นที่บริเวณโดยรอบสนามบิน ซึ่งเพิ่มเติมจากอุปสรรคที่มีอยู่เดิมตามสภาพภูมิศาสตร์ของพื้นที่ ที่มีภูเขาล้อมรอบ

1.2 ปัจจัยข้อจำกัดของพื้นที่ภายในสนามบิน ประกอบด้วยข้อจำกัดในด้าน ทางขับ (Taxiway) พื้นที่ลานจอด (Apron) และจำนวนหลุมจอดของอากาศยาน (Aircraft Stand) ที่สามารถรองรับปริมาณอากาศยานที่อยู่ในห้วงอากาศ จึงอาจส่งผลทำให้ต้องมีการควบคุมการบินให้อากาศยานบินวนรออยู่ในอากาศในกรณีที่มีสภาพการจราจรหนาแน่น ซึ่งอาจมีการคับคั่งของอากาศยานภาคพื้น

1.3 ความหนาแน่นของพื้นที่ชุมชนโดยรอบสนามบิน ที่เป็นอุปสรรคในการขยายตัวของพื้นที่ ทั้งทางวิ่ง (Runway) ทางขับ (Taxiway) ลานจอด (Apron) และหลุมจอด (Aircraft Stand) เพื่อให้สามารถรองรับการขยายตัวของจำนวนเที่ยวบิน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นตามมาคือการเกิดผลภาวะทางเสียงที่รบกวนพื้นที่พักอาศัยของชุมชนโดยรอบ และปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณโดยรอบสนามบิน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเชื่อมโยงการขยายตัวของการจราจรทางอากาศตลอดจนการเพิ่มขึ้นของปริมาณผู้โดยสารที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

2. จากผลการทดสอบปริมาณการจราจรทางอากาศกับรูปแบบวิธีปฏิบัติที่กำหนดขึ้น คือ SID/STAR สำหรับสนามบิน VTCC & VTCB พบว่า สามารถรองรับปริมาณอากาศยานได้เฉลี่ย 40 เที่ยวบินต่อชั่วโมง โดยสามารถรองรับได้ปริมาณ 350,400 เที่ยวบินต่อปี เพิ่มขึ้นจากเดิมที่รองรับได้เฉลี่ย 24 เที่ยวบินต่อชั่วโมง หรือ 210,240 เที่ยวบินต่อปี รวมจำนวนอากาศยานบินเข้า-ออกเพิ่มขึ้น 141,160 เที่ยวบินต่อปี คิดเป็น 66.67%

3. แนวโน้มการรองรับการขยายตัวในอนาคตจากสถิติข้อมูลที่เกิดขึ้นจากขีดความสามารถให้บริการ

ปัจจุบัน และผลจากการคาดการณ์ประสิทธิภาพการให้บริการจราจรทางอากาศในอนาคตหลังมีการจัดสร้างสนามบินเชียงใหม่แห่งที่ สอง จะทำให้สามารถรองรับปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้นเป็นอย่างน้อย จำนวน 40 เที่ยวบินต่อชั่วโมง และจะสามารถเพิ่มปริมาณเที่ยวบินจากเดิม 16 เที่ยวบิน/ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 66.67

จากการศึกษาพบว่าพื้นที่ตั้งของ สนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน (VTCC) ไม่สามารถขยายพื้นที่ของสนามบินเพิ่มเติมได้ เนื่องจากสภาพพื้นที่โดยรอบมีชุมชนอาศัยอยู่หนาแน่น และมีภูเขาล้อมรอบ จึงเป็นอุปสรรคต่อการขยายพื้นที่ ทั้งทางวิ่ง (Runway) ทางขับ (Taxiway) ลานจอด (Apron) และหลุมจอด (Aircraft Stand) ภายในสนามบิน แต่หากมีการก่อสร้างสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สอง ตามที่ได้มีการศึกษาและสำรวจของศูนย์วิจัยและบริหารวิชาการด้านการขนส่งทางอากาศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อจัดทำแผนแม่บทการจัดตั้งสนามบินพาณิชย์ของประเทศของสำนักงานการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ได้กำหนดพื้นที่ ที่มีความเหมาะสมที่สุดคือ พื้นที่บริเวณ ตำบลห้วยยาบ อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน ซึ่งอยู่ห่างจากสนามบินเชียงใหม่ออกไปเพียงประมาณ 10.31 NM หรือ 19.01 KM อีกทั้งยังมีทิศทางลมเดียวกันกับพื้นที่สนามบินแห่งเดิม จึงทำให้สามารถสร้างทางวิ่ง (Runway) ให้เป็นทิศทางเดียวกันกับสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน รวมถึงสามารถใช้ เครื่องช่วยเดินอากาศ (CMA DVOR) ร่วมกันได้พร้อมกันทั้งสองสนามบิน ผลที่จะเกิดขึ้นตามมาคือจะช่วยกระจายสภาพการจราจรทางอากาศให้เกิดความคล่องตัวเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการจราจรทางอากาศมากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งพื้นที่ตั้งของสนามบินเชียงใหม่แห่งที่สอง มีสภาพภูมิศาสตร์โดยรอบอยู่ไม่ไกลจากถนนสายหลักและแหล่งชุมชน โรงพยาบาล โรงเรียน ฯลฯ ซึ่งอาศัยอยู่อย่างกระจัดกระจาย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นภายนอกที่สนับสนุนประสิทธิภาพการให้บริการหากมีการร่วมลงทุนระหว่างภาครัฐและเอกชนเกิดขึ้น โดยมีการก่อสร้างระบบคมนาคมขนส่งทั้งทางบกและทางรางตามแผนงานที่ได้มี

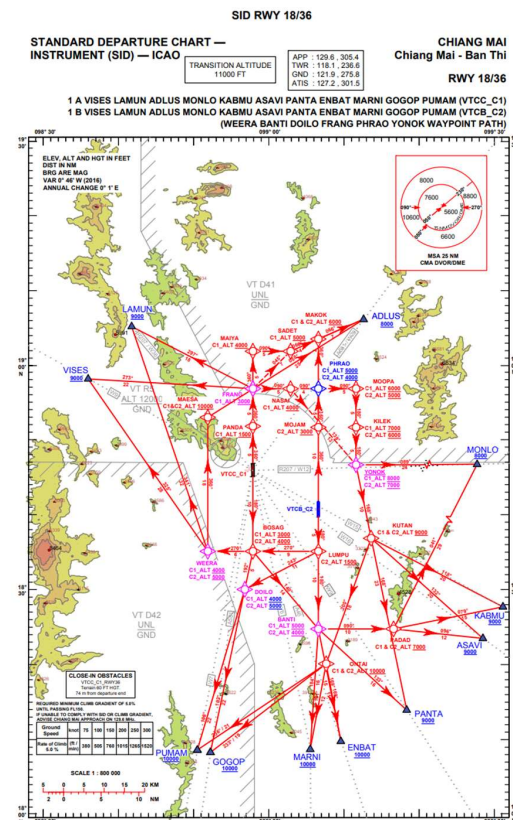
การศึกษาไว้จะทำให้บริหารจัดการการเชื่อมโยงระบบการขนส่ง (Logistic Systems Management) ทั้งทางอากาศทางบก และทางรางมีการบูรณาการอย่างสมบูรณ์ โดยจะส่งผลประโยชน์ในระดับมหภาค ซึ่งทำให้สามารถกระจายความเจริญสู่ชุมชน และยังเป็นการดึงดูดนักท่องเที่ยวไปยังพื้นที่ชุมชนเมืองรอง รวมทั้งช่วยลดความหนาแน่นของนักท่องเที่ยวจากเมืองหลักสู่เมืองรองตามลำดับ ซึ่งสนามบินเชียงใหม่มีที่ตั้งและพื้นที่ให้บริการครอบคลุมจังหวัดเมืองรอง คือ จังหวัดลำพูน และที่ตั้งของจังหวัดเชียงใหม่มีอาณาเขตติดต่อ และอยู่ไม่ไกลจากจังหวัดเมืองรองอื่น ๆ ในภาคเหนือ เช่น จังหวัดเชียงราย จังหวัดลำพูน จังหวัดแม่ฮ่องสอน จังหวัดตาก จังหวัดลำปาง จังหวัดพะเยา เป็นต้น จึงเป็นจุดหมายปลายทางของนักท่องเที่ยวทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติ ซึ่งจะช่วยกระตุ้นให้เศรษฐกิจของภาคเหนือมีการกระจายตัวไปสู่ระดับชุมชนเป็นไปตามนโยบายของภาครัฐที่มีการ สนับสนุน และส่งเสริมการท่องเที่ยวเมืองรอง โดยผลที่ตามมาจะทำให้มีการกระจายความเจริญ และรายได้ไปสู่ชุมชนช่วยเพิ่มระดับคุณภาพชีวิตของชุมชนเมืองรองในพื้นที่ให้ดียิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

## 5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณสถาบันการบินพลเรือน และได้รับความกรุณาจาก เรืออากาศโทวิระ ยัมถนอม ผู้เชี่ยวชาญด้านการควบคุมจราจรทางอากาศ และอาจารย์ภาณุวัฒน์ ผูกทอง ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบแผนภูมิการบิน รวมถึงศูนย์ควบคุมการบินเชียงใหม่ บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย, ท่าอากาศยานเชียงใหม่ บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน), กรมแผนที่ทหาร กองทัพบก ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้คำปรึกษา และเข้าพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลการวิจัยในครั้งนี้

รูปที่ 10 แสดงวิธีปฏิบัติการบินแบบ SID ที่กำหนดขึ้น โดยมีมาตรฐานการบินออกจากสนามบินด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน หมายถึง เส้นทางบินออกของอากาศยานที่เชื่อมต่อระหว่างสนามบินหรือทางวิ่งที่กำหนดไปยัง

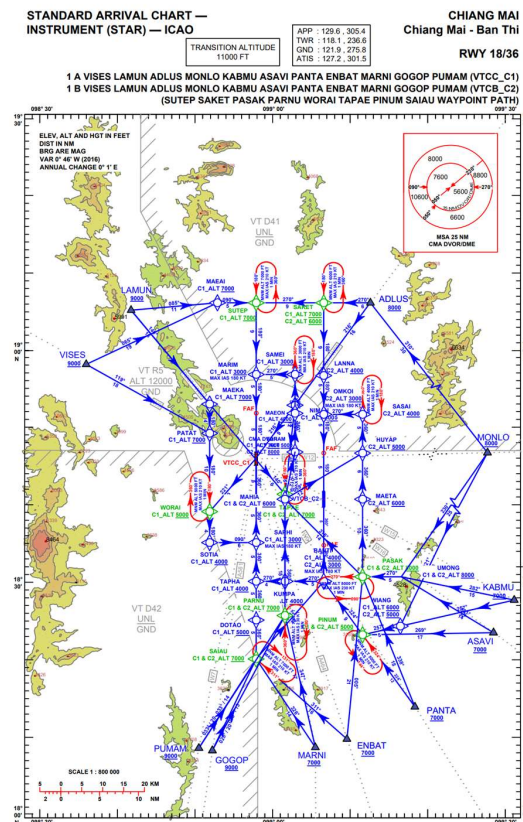
เส้นทางบินเพื่อบินไปยังสนามบินปลายทาง ซึ่งอำนวยความสะดวกในการให้บริการควบคุมจราจรทางอากาศแก่เจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศ ในพื้นที่เขตประชิดสนามบิน



รูปที่ 10 Standard Instrument Departure (SID)  
Runway18 and 36

รูปที่ 11 แสดงวิธีปฏิบัติการบินแบบ STAR ที่กำหนดขึ้น โดยมีมาตรฐานการบินเข้าสนามบินด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน หมายถึง เส้นทางบินขาเข้าที่เชื่อมต่อระหว่างจุดสำคัญบนเส้นทางบินไปยังจุดที่อากาศยานสามารถเริ่มทำการปฏิบัติการบินเข้าสู่สนามบินด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน ในพื้นที่เขตประชิดสนามบิน และทำการร่อนลงทางวิ่งด้วยความปลอดภัย





รูปที่ 11 Standard Instrument Arrival (STAR)  
Runway 18 and 36

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Air Transport Statistics. (2018, January). Airport of Thailand PLC. Annual Report [Online]. Available: [https:// www.airportthai.co.th/th/](https://www.airportthai.co.th/th/)
- [2] Airport Development Project. (2018, January). Airport of Thailand PLC. Annual Report [Online]. Available: [https:// www.airportthai.co.th/th/](https://www.airportthai.co.th/th/)
- [3] Mission. (2022, DEC 5). Air Traffic Management. [Online]. Available: [https:// www.aerothai.co.th/th/services/](https://www.aerothai.co.th/th/services/)
- [4] Recommendations on airspace usage and the impact of airspace usage around similar airports., “Preparation of the master plan for the establishment of the country’s commercial airports,” Air Transport Research and Academic Services Center Kasetsart University, June 2017.
- [5] Aeronautical Charts, Annex 4 International Civil Aviation Organization, 2016.
- [6] Units of Measurement to be Used in Air and Ground Operations, Annex 5, International Civil Aviation Organization, 2010.
- [7] Air Traffic Management, Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management, International Civil Aviation Organization, 2016.
- [8] Flight Procedures, Doc.8168/OPS/611 Aircraft Operations Vol.I, International Civil Aviation Organization, 2014.
- [9] Construction of Visual and Instrument Flight Procedures, Doc.8168/OPS/611 Aircraft Operations Vol.II, International Civil Aviation Organization, 2014.
- [10] Aeronautical Chart, Doc.8697 Aeronautical Chart Manual, International Civil Aviation Organization, 2016.
- [11] En-route, Aeronautical Information Publication Thailand, The Civil Aviation Authority of Thailand, 2019.



## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 (เดือนตุลาคม พ.ศ. 2565 – มีนาคม พ.ศ. 2566) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

|     |                                          |                                                                                                             |
|-----|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวิต์ ไชยชาณวาทิก | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต                                             |
| 2.  | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิรตล ศิริธร      | สาขาวิชาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล                                  |
| 3.  | รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์       | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยนเรศวร                                             |
| 4.  | อาจารย์ ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว            | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต                             |
| 5.  | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ | สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย                                   |
| 6.  | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสุระ อังกุลานนท์ | ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ และโลจิสติกส์<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 7.  | เรืออากาศโท ดร.ประพนธ์ จิตตะปุตตะ        | คณะวิศวกรรมศาสตร์ – เทคโนโลยี<br>สถาบันการบิน มหาวิทยาลัยรังสิต                                             |
| 8.  | รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล    | สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง               |
| 9.  | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง  | ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ                      |
| 10. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประทาน ศรีชัย      | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์                               |
| 11. | รองศาสตราจารย์ ดร.มณฑล ศาสนนันท์         | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต                             |
| 12. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ เมตไตรพันธ์      | สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา                                     |
| 13. | อาจารย์ปรัชญา บำรุงกุล                   | สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์          |
| 14. | อาจารย์สุรเชษฐ์ ไทวราภา                  | ภาควิชาคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยกรุงเทพ                                       |
| 15. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันฐณพงษ์ คงแก้ว   | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์                                      |

### รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 (เดือนตุลาคม พ.ศ. 2565 – มีนาคม พ.ศ. 2566) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

|     |                                       |                                                                                              |
|-----|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 16. | อาจารย์ ดร.ทฤทัย มาศโค้ง              | สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 17. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง | โปรแกรมวิชาการจัดการอุตสาหกรรม<br>คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม<br>มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา      |

**คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์**  
**วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

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

**1. การเตรียมต้นฉบับ**

- 1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
- 2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใด ๆ มาก่อน
- 3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือดัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 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** ขอบขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

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

## 2. วิธีการส่งบทความ

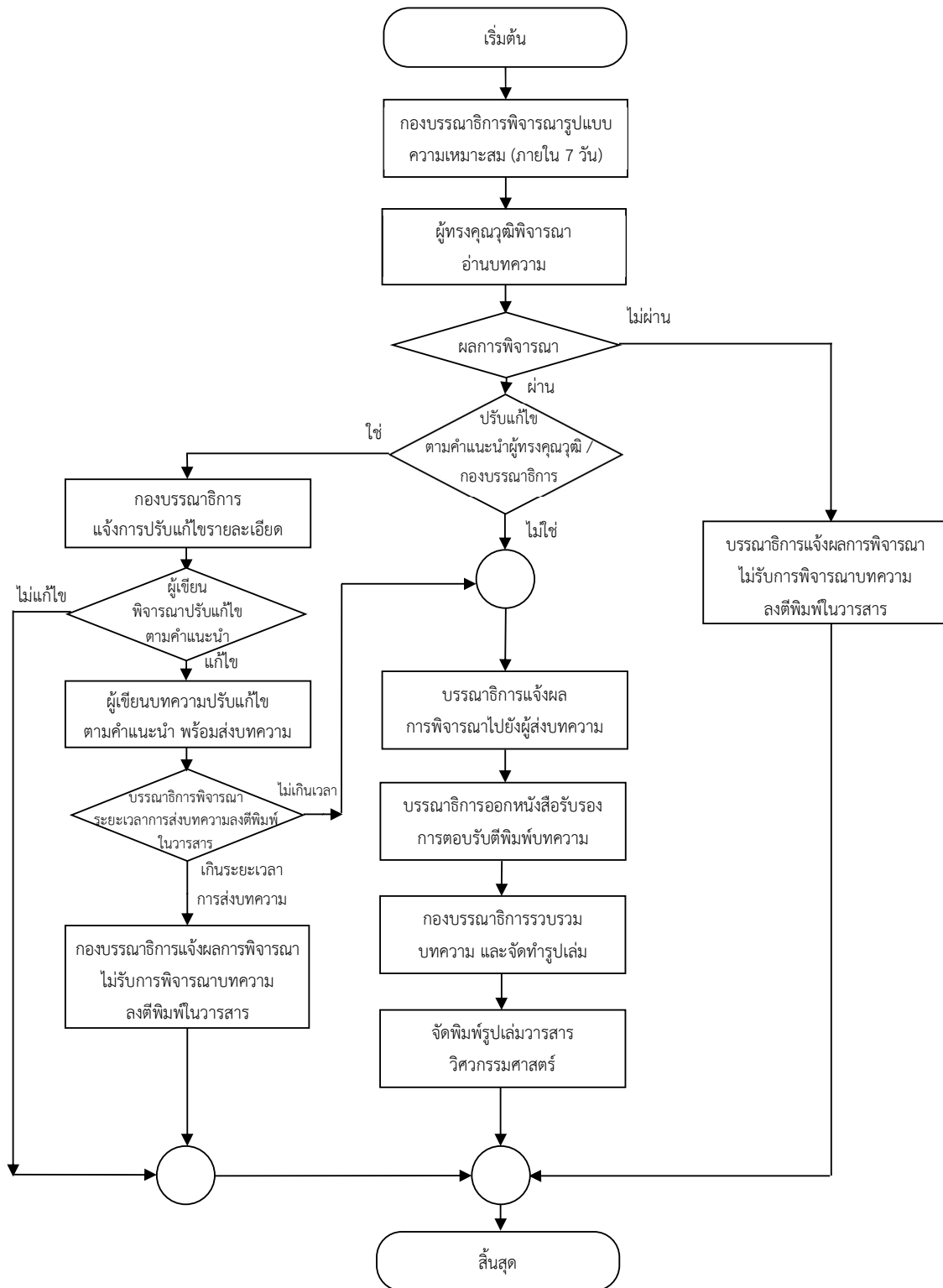
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่  
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม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

## 3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

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

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

# Srinakharinwirot University Engineering Journal

Vol. 18 No.1 (October 2022- March 2023)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)

## บทความวิจัย

- การประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่คุณภาพสำหรับการวางแผนการออกแบบเครื่องล้างผักและผลไม้  
Application of Quality Function Deployment for Fruit and Vegetable Washing Machine Design Planning  
ณัฐฐา วสุธิปกร พิรภาพ จอมทอง
- การจำลองสถานการณ์การให้บริการของรถสองแถวที่เหมาะสมในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน เพื่อรองรับระบบขนส่งมวลชนจังหวัดนครราชสีมา  
A Suitable Minibus Services Simulation in Rush Hour to Support the Public Transport System in Nakhon Ratchasima Province  
ศุภกฤต พรวิไลสง สงวน วงษ์ขวลิตกุล มารุต โคตรพันธ์
- วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูลระยะยาวของปริมาณยอดขายรถจักรยานยนต์ในประเทศด้วยอนุกรมเวลา; กรณีศึกษา ปี พ.ศ.2554-2564  
Long Term Trend Analysis of Domestic Car Sales Volume Using Time Series; 2011-2021 Case Study  
สุคนิรัตน์ เพชรรัตน์ รุ่งอรุณ บุญถ่าน รุ่งโรจน์ ฤกษ์ห่วย
- การพัฒนาระบบเฝ้าสังเกตการแทรกตัวของน้ำเค็มสำหรับพื้นที่ปลูกทุเรียน จังหวัดนนทบุรี  
ศิริชัย สาระมนัส วรินทร์ บุญยะโรจน์
- การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่ติดตั้งแผ่นปีกสามเหลี่ยมกับแผ่นปีกสามเหลี่ยมพรุน  
Comparison of Heat Transfer and Pressure loss between Circular Tube Heat Exchanger Installed the Delta-Winglet Tapes and Perforated Delta-Winglet Tapes  
นิวัฒน์ เกตุชาติ นพรัตน์ อมัตติรัตน์ บัณฑิต กฤดาคม
- การออกแบบและสร้างรถเข็นไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบความเร็ว 3 ระดับ ที่ควบคุมด้วยมือโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์  
The Design and Construction of 3 Speed Levels Electric Wheelchair for Disabilities Controlled with Hand by using Microcontroller  
ชัยพร อัดโตดดร นิตติคม อริยพิมพ์ ธนัช เอกเกื้อกุล พงศกร ชิตชอบ จิรวัดน์ วรณโรจน์ ธนกร ศิริมงคลกานต์
- Customer Satisfaction with Service Quality of the Bangkok Mass Rapid Transit System  
Dussadee Satirasetthavee1 Isrrah Malabanon Songyot Kitthamkasorn Jiranan Panpaksorn
- การกำหนดวิธีปฏิบัติการบินเข้าและออกของอากาศยานภายในเขตประชิดสนามบิน ระหว่างสนามบินเชียงใหม่ปัจจุบัน และสนามบินเชียงใหม่ แห่งที่สอง  
อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน  
พันศักดิ์ เนินทราย ณกร อินทรพวง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560

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