

|                                                                                                                                                                                                                                                                    |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| การจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของใบกวนผสมรูปแพนอากาศในถังผสมของไหล<br>CFD Simulation of Airfoil Shape Blade for Mixing in Tank for Mixing Fluid<br>โดย : วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล                                                                              | หน้า 1 |
| การใช้เศษไม้ยางพารา ใบยางพารา และน้ำยางพารา เป็นระบบผนังฉนวนความร้อน<br>Using Rubber Wood Chips, Rubber Leaves and Rubber Latex as a Heat Insulating Wall System<br>โดย : ประชุม คำพุด                                                                             | 13     |
| การพัฒนาอุปกรณ์วัดชุดสายไฟ กรณีศึกษาโรงงานผลิตชุดสายไฟในรถยนต์<br>Development of Measurement Tools A Case Study Automotive Wire Harness Manufacturer<br>โดย : เฉลิมศักดิ์ ถาวรวัตร และ ก้าวหน้า จงวัฒนารักษ์                                                       | 25     |
| การศึกษารูปแบบการใช้ไม้ยางพาราสำหรับเป็นหมอนรองเสาเข็มคอนกรีต<br>A Study of the Use of Para Wood as Sleepers for Concrete Piles<br>โดย : วินัย อวยพรประเสริฐ และ กิจเกษม คล้ายกรุด                                                                                 | 37     |
| การศึกษากาศพลศาสตร์และการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับปีก Box-wing ขึ้น-ลงทางดิ่งขนาดเล็ก<br>Aerodynamic Studies and Conceptual Design of a Small Box-Wing VTOL UAV<br>โดย : ดนุพล สุทธิสน ประสาทพร วงษ์คำข้าง และ นกุล สุขุประการ                          | 49     |
| การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสมของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน<br>ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม<br>The Suitable PI Controller Design of the Parallel Synchronous Buck Converter Using the Genetic Algorithm<br>โดย : วิญญะ ฉายินทุ        | 61     |
| การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผสมผักตบชวากับปุ๋ยอินทรีย์<br>Design and Fabrication of Mixing and Chopping Machine for Water Hyacinth and Organic Fertilizer<br>โดย : วีรศักดิ์ หมูเจริญ                                                                           | 71     |
| คุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน<br>Properties of Concrete Block Incorporating Rice Husk Ash as Partial Replacement for Fine Aggregate<br>โดย : ประชุม คำพุด และ ทวีช กล้าแท้                                                      | 81     |
| ผลกระทบของปริมาณก๊าซเรดอนและแนวทางแก้ไขของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทวัสดุเปลือกอาคาร<br>The Effect of Radon Gas Volume and Solutions of Construction Material Products as Building Envelopes<br>โดย : ประชุม คำพุด สมพิศ ดันตวรนาท และ เกียรติสุตา สมนา          | 93     |
| ผลของการเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวสัมผัสของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวชนิดสัมผัสด้านนอก<br>Effect of Increasing the Heat Transfer Area in Helical Coil Contract Shell Heat Exchanger<br>โดย : สุริยะ สุกรินทร์ มนุศักดิ์ จานทอง และ สถาพร ทองวิค | 105    |
| เฮมพ์กรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับยิปซัมปลาสเตอร์เป็นสารเชื่อมประสาน<br>Hempcrete using Cement and Gypsum Plaster as a Binder<br>โดย : ประชุม คำพุด                                                                                                                  | 117    |



# วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

## คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

### คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

### กองบรรณาธิการ

|                                |                                                                     |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ     | ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ์         | คณะกรรมการบริหาร มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย                         |
| รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์       | คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                |
| รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์         | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)             |
| รศ.ดร.กัณวีร์ พลุประทุม        | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)             |
| รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน             |
| รศ.ดร.ณรงค์ บวบทอง             | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต                 |
| ผศ.ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์         | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน             |
| ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ        | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)             |
| ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ        | วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต                            |
| ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี           | 52/14 ถ.พหลโยธิน 45 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900            |
| ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง            | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                |
| รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                |
| ผศ.ดร.จักรี ศรีนันทน์          | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                |
| ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง            | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                |
| ผศ.ดร.สุนันดา เนียมกลาง        | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                |
| ผศ.ดร.ธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์  | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                |
| ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์            | 33 ซอยอุดมสุข แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260                     |

### หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ดร.ปรกษ สิริสุวัฒน์

### เลขานุการ

นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒนวิทย์ สุนันทพจน์



# Journal of Engineering, RMUTT

## Editorial Board Members

### Consultant Board Members

President of Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Vice President of Academic Affairs

Dean, Faculty of Engineering

### Editorial Board

|                                        |                                                                        |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Prof.Dr.Narongrit Sombatsompop         | Thai-Journal Citation Index (TCI)                                      |
| Assoc.Prof.Dr.Sutee Auksonkitt         | School of Aviation Eastern Asia University                             |
| Assoc.Prof.Dr.Khemchai Hemachandra     | Faculty of Science Chulalongkorn University                            |
| Assoc.Prof.Dr.Siriwan Srisorrachatr    | Faculty of Engineering Srinakharinwirot University                     |
| Assoc.Prof.Dr.Ganwarich Pluphrach      | Faculty of Engineering Srinakharinwirot University                     |
| Assoc.Prof.Dr.Thumrongrat Mungcharoen  | Faculty of Engineering, Kasetsart University                           |
| Assoc.Prof.Narong Buabthong            | Faculty of Engineering Thammasat University                            |
| Asst.Prof.Dr.Somjate Patcharaphun      | Faculty of Engineering, Kasetsart University                           |
| Asst.Prof.Dr.Pathomthat Chiradeja      | Faculty of Engineering Srinakharinwirot University                     |
| Asst.Prof.Dr.Ankana Punlor             | College of Engineering Rangsit University                              |
| Dr.Chadchawarn Surussavadee            | 52/14 Phaholyothin 45 Rd., Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900            |
| Asst.Prof.Dr.Sivakorn Angthong         | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi |
| Assoc.Prof.Dr.Krischonme Bhumkittipich | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi |
| Asst.Prof.Dr.Jakkree Srinonchat        | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi |
| Asst.Prof.Somsak Kanthong              | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi |
| Asst.Prof.Dr.Sumonman Niamlang         | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi |
| Asst.Prof.Dr.Thammasak Rojviroon       | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi |
| Asst.Prof.Chavalit Sangswasd           | 33 Soi Udomsuk 28 BangNa District Bangkok 10260                        |

### Editor in Chief

Dr.Porakoch Sirisuwan

### Secretary

Miss Amonrat Yimyoo

### System administrator

Mr.Patrapee Sunantapot





# วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

## บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ฉบับนี้เป็นการตีพิมพ์ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม ถึง เดือน มิถุนายน ปีพุทธศักราช 2565 จำนวนบทความตีพิมพ์ 11 บทความ โดยในฉบับนี้ยังคงมีเนื้อหาทั้งทางด้าน วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมวัสดุ และวิศวกรรมจักรกลเกษตร ซึ่งวารสารยังคงมุ่งมั่นที่จะเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสู่สาธารณชนอย่างเสมอมา

และจากที่ได้ประกาศไปในวารสารปีที่ 19 ฉบับที่ 2 นั้น ที่ได้แจ้งประกาศ ก.พ.อ เรื่องหลักเกณฑ์และวิธีการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ และศาสตราจารย์ (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2564 ที่กำหนดให้ “ ผลงานทางวิชาการต้องได้รับการเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ โดยวารสารวิชาการนั้นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความ (peer reviewer) ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน อย่างน้อย 3 คน” นั้น กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี จึงได้ดำเนินการเพิ่มจำนวนผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความจากเดิม 2 คน เป็น 3 คน โดยสมบูรณ์ตั้งแต่ฉบับนี้เป็นต้นไป

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ขอขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ผู้เขียน และผู้อ่านทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการเผยแพร่ผลงานวิจัยต่างๆ เสมอมา หวังเป็นอย่างยิ่งว่าทุกท่านจะมีสุขภาพ พลานามัยที่แข็งแรง ปราศจากโรคภัยต่างๆ และยังคงติดตามการเผยแพร่ผลงานของวารสารฯ ต่อไป

กองบรรณาธิการ

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

|                               |                                                                                                |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ผศ.ดร.คุษฎิ บุญธรรม           | คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์                                              |
| ผศ.อภิศักดิ์ พรหมฝ่าย         | คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์                                              |
| ผศ.ดร.กิตติพงษ์ สุวีโร        | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                                           |
| ผศ.ดร.ขวัญชัย จ้อยเจริญ       | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                                           |
| ผศ.ดร.ภาณุ ประทุมมนพรัตน์     | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                                           |
| รศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง        | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                                           |
| รศ.ดร.ปิตินันต์ กร้ามาตร      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                                           |
| ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช       | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา                                                             |
| รศ.ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์       | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                                   |
| ผศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์  | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก                                        |
| ดร.มนตรี แสงสุริยันต์         | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม                                                            |
| รศ.ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์   | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                                                   |
| ผศ.ดร.เกียรติสุดา สมณา        | คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน                         |
| ผศ.ดร.ศตวรรษ หลุณหงษ์พงศ์     | คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก<br>วิทยาเขตอุเทนถวาย |
| ดร.ธนาพล สุขชนะ               | คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.                   |
| ผศ.ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร | คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน                         |
| ผศ.นิชาภา มินาบูลย์           | คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์                       |
| ผศ.ดร.พิมพ์พรรณ ปรี่องาม      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน วิทยาเขตกำแพงแสน                                                    |
| ผศ.ดร.ชยุต นันทดุสิต          | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์                                                     |
| ดร.เชาพีร์ ตืออามะ            | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ                                           |
| รศ.ดร.จารุวัฒน์ เจริญจิต      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลศรีวิชัย สงขลา                                                        |
| ผศ.ดร.ชรินทร์ นมรัช           | สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธาและสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง                            |
| ดร.วชิรกรณ์ เสนาวัง           | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม                                                            |
| ผศ.ดร.กระวี ตรีอำรรค          | สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี                                            |
| ผศ.ดร.กิตติพงศ์ คุณจริยกุล    | สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์                                      |

## Peer Reviews

|                                          |                                                                                                          |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Asst.Prof.Dr.Dussadee Buntam             | Faculty of Industrial Technology Uttaradit Rajabhat University                                           |
| Asst.Prof.Apisak Phromfaiy               | Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University                                          |
| Asst.Prof.Dr.Kittipong Suweero           | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi                                   |
| Asst.Prof.Dr.Kwanchai Choicharoen        | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi                                   |
| Asst.Prof.Dr.Panu Pratumnopharat         | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi                                   |
| Assoc.Prof.Dr.Boonyang Plangklang        | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi                                   |
| Assoc.Prof.Dr.Pitisan Krammart           | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi                                   |
| Asst.Prof.Dr.Taweechai Sumranwanich      | Faculty of Engineering Burapha University                                                                |
| Assoc.Prof.Dr.Ganwarich Pluphrach        | Faculty of Engineering Srinakharinwirot University                                                       |
| Asst.Prof.Dr.Narongrit Pimkumwong        | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Tak                                    |
| Dr.Montri Saengsuriyan                   | Faculty of Engineering Nakhon Phanom University                                                          |
| Assoc.Prof.Dr.Songkran Wiriya            | Faculty of Engineering Srinakharinwirot University                                                       |
| Asst.Prof.Dr.Kiatsuda Somna              | Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan                       |
| Asst.Prof.Dr.Sattawat Haruehansapong     | Faculty of Engineering and Architecture Rajamangala University of Technology Tawan-ok Uthenthawai Campus |
| Dr.Thanaphol Sukchana                    | Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi.              |
| Asst.Prof.Dr.Jittiwat Nithikarnjanatharn | Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan                       |
| Asst.Prof.Nichapha Minaboon              | Faculty of Architecture and Design, Rajamangala University of Technology Rattanakosin                    |
| Asst.Prof.Pimpan Pruengam                | Faculty of Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus                                        |
| Asst.Prof.Dr.Chayut Nuntadusit           | Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla,                                  |
| Dr.Saofee Dueramae                       | Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Krungthep                                    |
| Assoc.Prof.Dr.Jaruwat Jareanjit          | Faculty of Engineering Rajamangala Sriwichai Songkhla                                                    |
| Asst.Prof.Dr.Charin Namarak              | Department of Civil Technology and Architecture Muban Chombueng Rajabhat University                      |
| Dr.Wachirakorn Senawang                  | Faculty of Engineering Nakhon Phanom University                                                          |
| Asst.Prof.Dr.Krawee Treeamnu             | Institute of Engineering Suranaree University of Technology                                              |
| Asst.Prof.Dr.Kittipong Kunchariyakun     | School of Engineering and Technology Walailak University                                                 |



# การจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของใบกวนผสมรูปแพนอากาศในถังผสมของไหล

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล<sup>1\*</sup>

werayootrmutl@gmail.com<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรุงเทพมหานคร

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 11-Mar-2021 |
| Revised  | : 31-Mar-2022 |
| Accepted | : 4-Apr-2022  |

## บทคัดย่อ

ประเด็นหลักของบทความนี้คือการประยุกต์ใช้ใบกวนผสมรูปแพนอากาศที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของการกวนผสมและการจำลองสนามการไหลภายในถังผสมสำหรับกวนส่วนผสมของน้ำและน้ำส้ม จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการผสมโดยใช้ใบกวนชนิดรูปทรงแพนอากาศ พร้อมทั้งทำการประเมินประสิทธิภาพของถังผสมโดยใช้ใบกวนผสมรูปแพนอากาศที่มุม 20, 25 และ 30 องศาสำหรับการแปรรูปน้ำส้ม การจำลองเชิงตัวเลขของใบกวนผสมรูปแพนอากาศที่มุม 20, 25 และ 30 องศา จะถูกทดสอบเพื่อจำลองการทำงานของรอบการหมุนมอเตอร์ 100-380 รอบต่อนาที จากผลการจำลองพบว่า ผลลัพธ์เชิงตัวเลขการผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้น น้ำส้มสามารถผสมกับน้ำได้ 30 เปอร์เซ็นต์ที่รอบการหมุน 350 รอบต่อนาที โดยใช้มุมของใบกวนผสมที่ 25 องศา และใช้เวลาสำหรับการผสม 12 วินาที และน้ำส้มสามารถผสมกับน้ำได้ 50-60 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้มุม 20 และ 30 องศาตามลำดับ นอกจากนี้ของไหลผสมแบบหมุนวนที่มุมใบกวนผสม 25 องศา จะให้ค่าการหมุนวนของการผสมได้ดีกว่ามุม 20 และ 30 องศาเมื่อทำการเปรียบเทียบกัน

**คำสำคัญ:** พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ใบกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ การจำลองเชิงตัวเลข

# CFD Simulation of Airfoil Shape Blade for Mixing in Tank for Mixing Fluid

Werayoot Lahamornchaiyakul<sup>1\*</sup>

werayootrmutl@gmail.com<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 11-Mar-2021 |
| Revised  | : 31-Mar-2022 |
| Accepted | : 4-Apr-2022  |

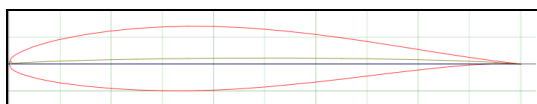
## Abstract

The main point of this paper is to design the airfoils that could increase the overall efficiency of the agitation turbine blade and simulation of the flow field inside the mixing tank for stirring the water mixture and orange juice. After that, perform an analysis to find the right time and efficiency in the mix using agitated leaves type airfoil shape. After evaluating the performance of the mixing tank using 20, 25, and 30-degree angles of the agitating blade for orange juice processing. In numerical simulations of the agitating blade at 20, 25, and 30-degree angle is tested in the range operator is 100-380 rpm. It is found from numerical results that mixing is enhanced when the rotating speed increases. Orange water can be mixing with water by 30 % at operating 350 rpm of a motor using 25-degree angle of the airfoil blade for agitating by using time is 12 second and orange water can be mixing with water by 50-60 % at a 20, and 30-degree angle, respectively. Besides, swirling mixing fluid by 25-degree angle is higher when compare using 20, and 30-degree angle.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics, Airfoil Mixed Stirring Blades, Numerical Simulation

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันน้ำผลไม้ประเภทต่าง ๆ ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด หรือจุดบริการนักท่องเที่ยว ล้วนได้ผ่านกรรมวิธีทางอุตสาหกรรมอาหารทั้งในเรื่องของการปรุงแต่งสี กลิ่นและรสชาติ และการใช้สารเติมแต่งต่าง ๆ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้นนั้น ทำให้น้ำผลไม้ดังกล่าว ขาดความสดที่ผู้บริโภคต้องการ เพราะพฤติกรรมการบริโภคของคนเปลี่ยนไปตามยุคสมัย ทำให้ผู้คนในสังคมเมืองได้หันมาบริโภคอาหาร น้ำดื่ม น้ำผักผลไม้เพื่อสุขภาพเพิ่มมากขึ้นทุกปี ทำให้ความต้องการของอาหารและเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพนั้นมีความต้องการที่สูงขึ้น [1] ในการศึกษาวิจัยทางด้านอุตสาหกรรมน้ำผลไม้สิ่งที่ไม่ได้เลยคือชุดเครื่องมือในการผลิต โดยเฉพาะเครื่องกวนผสมน้ำผลไม้แบบต่าง ๆ ที่ได้มีการออกแบบและผลิตออกมาวางขายในท้องตลาดมากมายจากหลากหลายบริษัท แต่เครื่องกวนผสมเหล่านั้นอาจจะยังไม่เหมาะสมกับการกวนผสมของวัตถุดิบทุกประเภท จึงอาจนำมาประยุกต์ใช้งานไม่ได้ในกรณีที่ต้องการคุณภาพของสัดส่วนอาหารที่เที่ยงตรง ทั้งในส่วนของคุณภาพของรสชาติ เป็นต้น ขั้นตอนการออกแบบใบกวนผสมได้มีหลักทางวิชาการเข้ามามีบทบาทสำคัญหลายทฤษฎี แต่ละทฤษฎีก็มุ่งเน้นไปในเรื่องการออกแบบใบกวนผสมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จะเห็นได้จากงานวิจัยที่ผ่านมากล่าวว่า รูปร่างใบพัดกวนผสมที่เหมาะสม จะส่งผลต่อเวลาในการกวนผสม [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและประยุกต์รูปทรงแพนอากาศชนิด NACA 63-212 มาใช้ในการสร้างโปรไฟล์ของใบกวนผสมแบบกังหันเนื่องจากรูปทรงแพนอากาศชนิด NACA 63-212 มีรูปทรงที่สามารถสร้างแรงยกตัวได้สูงและมีอัตราของการต้านทานของการไหลที่ต่ำ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปทรงแพนอากาศชนิด NACA 63-212 [3]

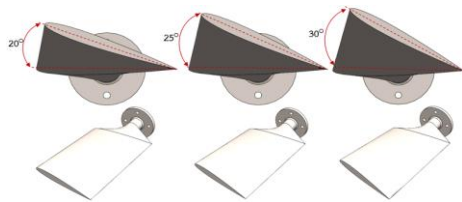
การเลือกรูปทรงแพนอากาศชนิด NACA 63-212 เพื่อทำการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของความเร็วเฉลี่ยภายในถังผสม ความเร็วในแนวแกน และความเร็วในแนวรัศมี เทียบกับใบกวนผสมจากงานวิจัยเรื่องการออกแบบและจำลองพลศาสตร์ของไหลของใบกวนผสมในถังสำหรับของไหลผสม [2] และสร้างโปรแกรมคำนวณที่สัมพันธ์กับสมการเพื่อคำนวณหาช่วงเวลาในการผสมเทียบกับรอบการหมุนของใบกวนผสม สำหรับใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและออกแบบใบพัดกวนผสมต่าง ๆ ต่อไปในอนาคต

## 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

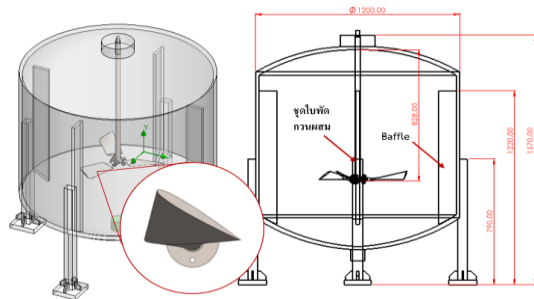
ทำการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS โดยทำการออกแบบและขึ้นรูปใบพัดกวนผสมจากรูปทรงแพนอากาศในโหมดฟังก์ชัน Configuration ทั้งหมด 3 มุม คือ มุม 20, 25 และ 30 องศา ตามลำดับจนได้ใบพัดกวนผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 582 มิลลิเมตร พร้อมทั้งทำการออกแบบถังกวนผสมที่มีขนาด 1,200 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2 จากนั้นจึงนำแบบจำลองมาทำการประกอบ (Assembly) จะได้แบบจำลองการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3

ก่อนสร้างเมชเอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองโซลิด (Solid) เพื่อใช้อ้างอิงในการกำหนดวัสดุของน้ำและน้ำส้ม จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองโซลิดสำหรับอ้างอิงการหมุนให้ใบพัดกวนผสมตามหลักวิธีการของ Multiple Reference Frame (MRF) เพื่อกำหนดการเคลื่อนที่เป็นแบบ Frozen Rotor Method ดังรูปที่ 4 จากนั้นทำการสร้างเมชเอลิเมนต์เพื่อใช้สำหรับแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยสร้างเมชให้กับชุดใบพัดกวนผสมเป็นแบบ Local mesh และทำการตั้งค่าในส่วนของการ Refining cells ของชุดใบพัดกวนผสม โดยกำหนดค่า level of refining fluid cell และ level of refining fluid cell ส่วนของพื้นที่ของไหล (Fluid) และรูปทรงของแข็ง (Solid body) เท่ากับ 4 และกำหนดค่าในส่วนของการ Equidistant refinement พร้อมทำการตั้งค่า Number of shells เท่ากับ 1 และ ตั้งค่า

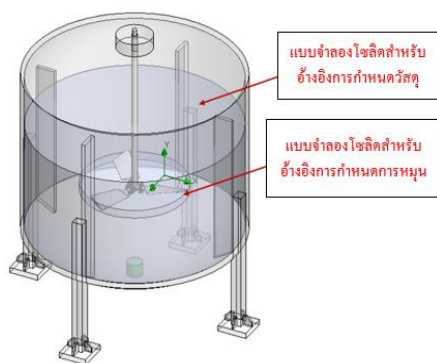
maximum equidistant level เท่ากับ 3 ตั้งค่า offset distance เท่ากับ 0.01 ส่วนแบบจำลองโซลิดสำหรับอ้างอิงของน้ำและน้ำส้ม ตั้งค่าในส่วนของ Refining cells โดยกำหนดค่า level of refining fluid cells และ level of refining cells at fluid ส่วนของพื้นที่ของไหลและรูปทรงของแข็งเท่ากับ 3 และกำหนดค่า Equidistant refinement ตั้งค่า Number of shells เท่ากับ 1 และตั้งค่า maximum equidistant level เท่ากับ 2 พร้อมทั้งตั้งค่า offset distance เท่ากับ 0.05 ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5



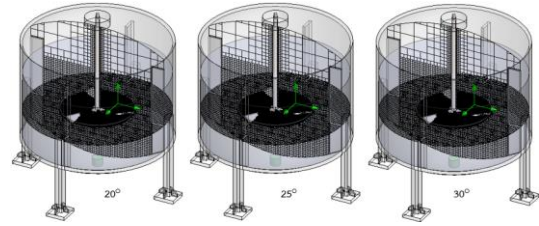
รูปที่ 2 ใบพัดกวนผสมที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยรูปทรงแผนอากาศ NACA 63-212



รูปที่ 3 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ได้จากการประกอบขึ้นรูป



รูปที่ 4 สร้างแบบจำลองโซลิดสำหรับการหมุนและวัสดุ



รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างเมชเอลิเมนต์ของแบบจำลองการวิเคราะห์ที่มุมมองต่าง ๆ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในส่วน of น้ำและน้ำส้มดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ [4,5]

| ตัวแปร                                  | น้ำ     | น้ำส้ม |
|-----------------------------------------|---------|--------|
| Density ( $\text{kg/m}^3$ )             | 998     | 1,040  |
| Dynamics Viscosity (pa.s)               | 0.00179 | 0.0021 |
| Specific heat (Cp) ( $\text{J/kg.K}$ )  | 4,219.9 | 3,640  |
| Thermal Conductivity ( $\text{W/m.K}$ ) | 0.561   | 0.317  |

ในงานวิจัยได้ทำการกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบ Internal flow และทำการกำหนดค่าการวิเคราะห์ในส่วน of Physical feature เป็น Time-dependent, Rotation และ Free surface โดยทำการกำหนดตัวแปรช่วงเวลาในส่วน Time-dependent เป็น 15 วินาที และกำหนดค่า Output time step เท่ากับ 0.01 จากนั้นกำหนดรอบมอเตอร์เท่ากับ 350 รอบต่อนาที พร้อมกับการเปิดการคำนวณแบบ Free surface

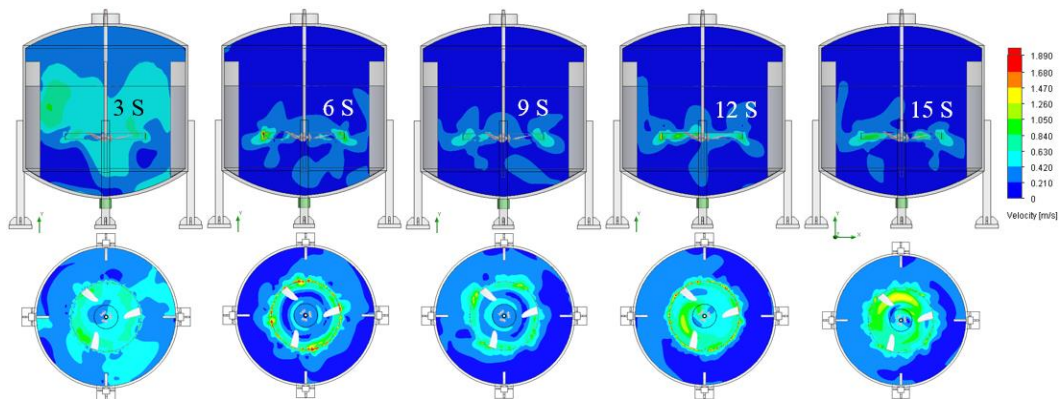
### 3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการจำลองผลลัพธ์ของสนามการไหลสำหรับการผสมระหว่างน้ำส้มและน้ำ ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนและวิธีการทำคือ จะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทดสอบจากมุมมองของใบกวนผสมรูปทรงแผนอากาศที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่ ดังรูปที่ 2 และทำการกำหนดรอบการหมุนของใบพัดกวนผสมสำหรับการทดสอบในครั้งนี้ด้วยรอบคงที่ 350 รอบต่อนาที เพื่อทำการแสดงสนามการ

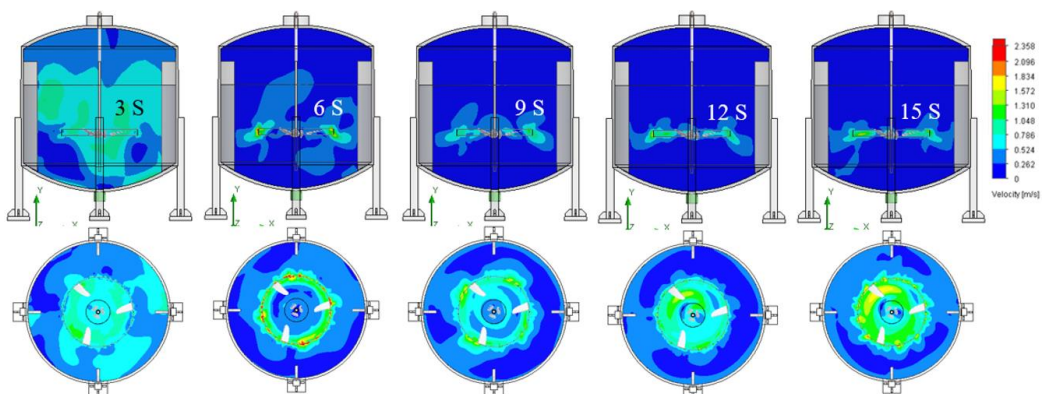
ไหลของของผสมระหว่างน้ำส้มและน้ำโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation โดยทำการยืนยันที่ได้จากงานวิจัยเรื่องการออกแบบและวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลของใบกวนผสมในถังสำหรับของไหลผสม [2] เพื่อแสดงความเร็วสนามการไหล, ความเร็วในแต่ละระนาบในทิศทางแกน Y, การเปลี่ยนแปลง

ความเร็วในช่วงเวลาต่าง ๆ ของการไหลผสมที่รอบการหมุนใบพัดกวนผสมครั้งที่ 350 รอบต่อนาที และความเร็วในแนวรัศมี ซึ่งผลการจำลองของสนามความเร็วที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถแสดงในรูปแบบของสนามความเร็ว Plot contour ได้ดังนี้

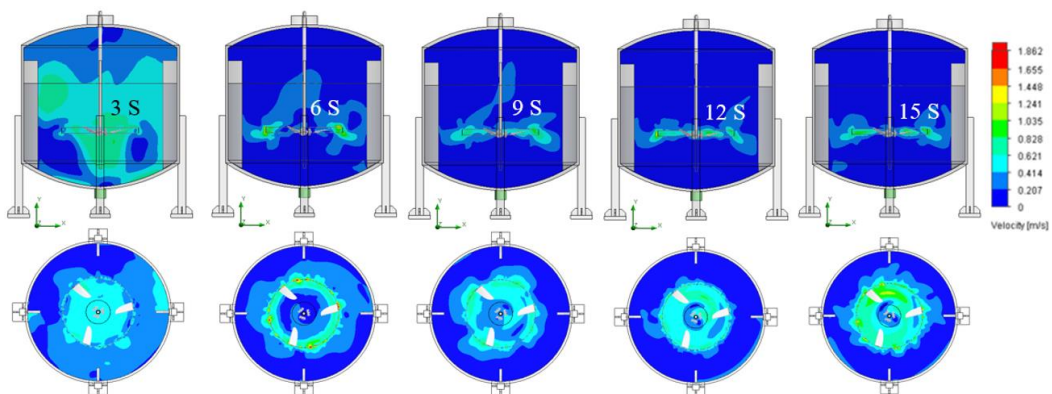
### 3.1 ผลลัพธ์ของสนามการไหลภายในถังผสม



รูปที่ 5 แสดงความเร็วของสนามการไหลที่มุม 20 องศาในรูปแบบ Plot Contour

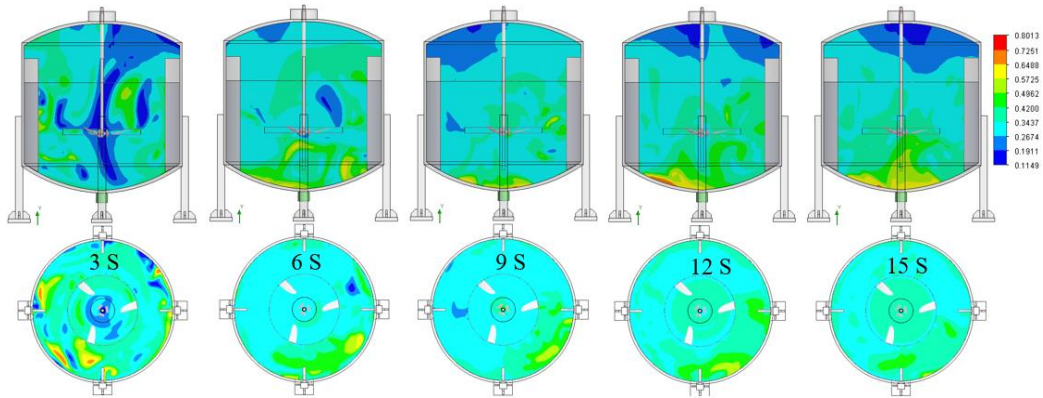


รูปที่ 6 แสดงความเร็วของสนามการไหลที่มุม 25 องศาในรูปแบบ Plot Contour

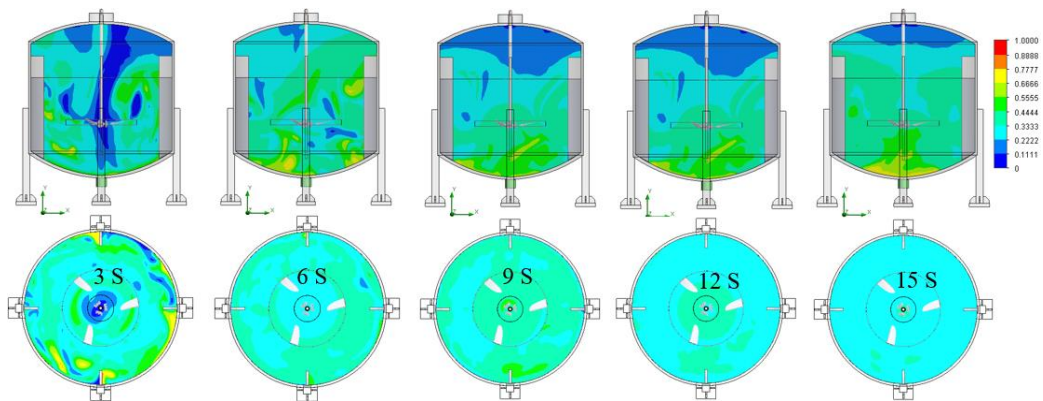


รูปที่ 7 แสดงความเร็วของสนามการไหลที่มุม 30 องศาในรูปแบบ Plot Contour

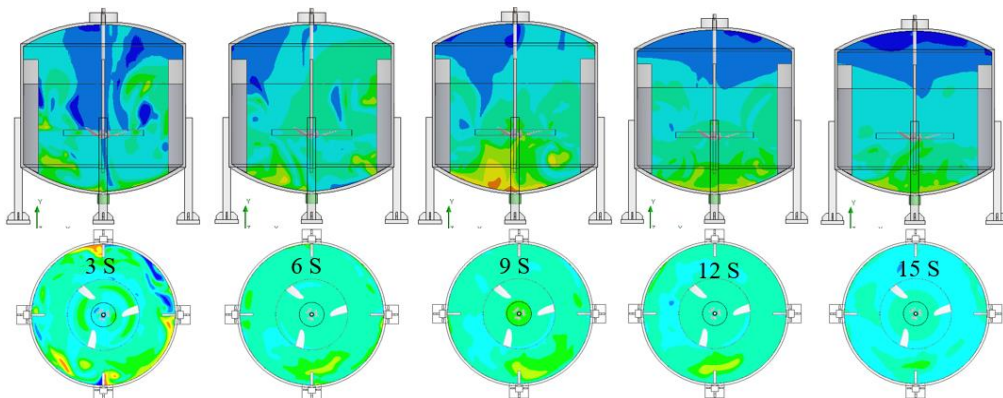
### 3.2 แสดงค่าผิวอิสระของการกวนผสมน้ำและน้ำส้มภายในถังผสม



รูปที่ 8 แสดงค่าผิวอิสระที่มุม 20 องศาในรูปแบบ Plot Contour



รูปที่ 9 แสดงค่าผิวอิสระที่มุม 25 องศาในรูปแบบ Plot Contour

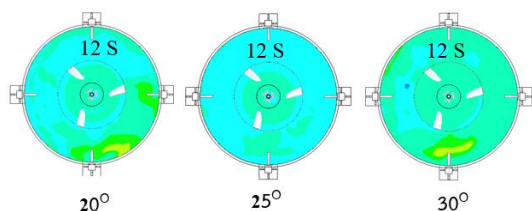


รูปที่ 10 แสดงค่าผิวอิสระที่มุม 30 องศาในรูปแบบ Plot Contour

รูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 แสดงรูปแบบของค่าความเร็วของสนามการไหลในรูปแบบการแสดงผลแบบ Plot contour โดยทำการตัดระนาบในทิศทางแกน Y และมีการกำหนดให้ใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยสร้างอัตราการไหลในแนวรัศมีของใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ ส่งผลทำให้เกิดค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ในการไหลของ

ของไหลผสมสูงสุดได้ที่มุม 25 องศา ส่วนมุม 20 และ 30 องศา จะสร้างความเร็วของการเคลื่อนที่ในการไหลของของไหลผสมที่น้อยกว่า เนื่องมาจากมุมปะทะระหว่างใบพัดและของไหลที่ส่งผลโดยตรงในการสร้างแรงยกตัวและภาระที่เกิดจากการต้านของมวลของไหลที่กระทำต่อใบกวนผสม และเมื่อทำการพิจารณาระบบการทำงานของการทำงานของการหมุนในบริเวณโดยรอบใบพัดกวน

ผสมในแต่ละมุมมองคาดว่า ใบพัดกวนผสมจะสร้างความเร็วที่มีความแตกต่างกันระหว่างการจำลอง และความเร็วที่เกิดขึ้นในแต่ละมุมมองจากการทดลองก็สามารถยอมรับได้ในทางวิศวกรรม เนื่องจากความเร็วที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงเดียวกัน ส่วนรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 แสดงรูปแบบของค่าผิวอิสระของการผสมของไหล Volume of Fluid (VOF) กล่าวคือ เป็นรูปแบบการแบ่งเฟสของสถานะน้ำและน้ำส้มในแบบจำลอง มีค่าเท่ากับ 0.5 ในกระบวนการผสมที่เวลาต่าง ๆ ในแต่ละมุมมองคาดว่า ที่มุม 25 องศา มีการเคลื่อนตัวของชั้นผิวอิสระของน้ำส้มที่วิ่งเข้ามาผสมกับน้ำได้ดีที่สุดที่เวลา 12 วินาที โดยงานวิจัยนี้จะทำการแสดงและทำการพิจารณาที่ระนาบกึ่งกลางใบพัดกวนผสมดังรูปที่ 11

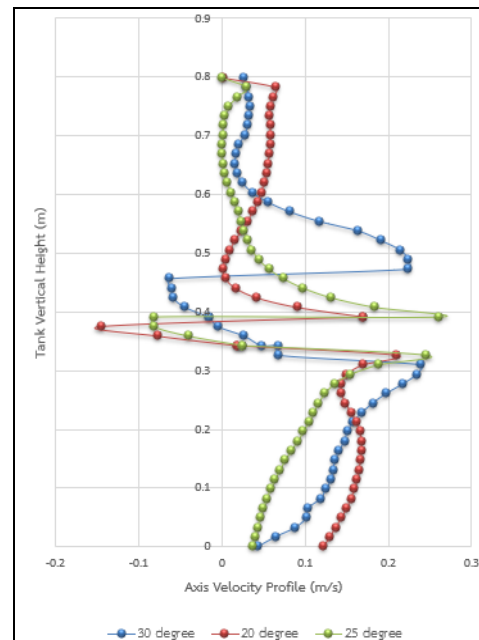


รูปที่ 11 การเคลื่อนตัวของชั้นผิวอิสระของน้ำส้มที่วิ่งมาผสมกับน้ำที่ระนาบกึ่งกลางใบพัดกวนผสม

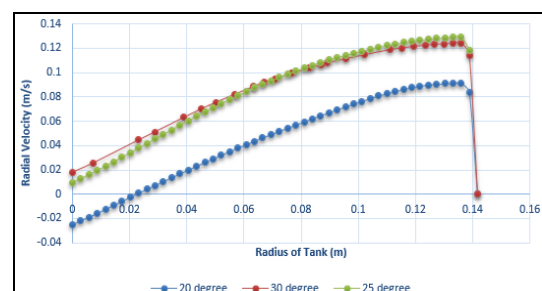
### 3.3 ผลลัพธ์ความเร็วสูงของใบกวนผสมที่มีผลต่อความเร็วในแนวแกน

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษารูปแบบของความเร็วในแนวแกนและตามแนวรัศมีของถังผสมทรงกระบอกที่ทำการกวนผสมด้วยใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ ผลการศึกษาได้ทำการตัดระนาบในทิศทางแกน Y โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดสอบการหมุนของใบพัดกวนผสมที่มุม 20, 25 และ 30 องศา ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาในรูปที่ 12 พบว่าที่มุม 20 และ 25 องศา จะให้ค่าระดับความเร็วของสนามการไหลในแนวแกนที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าที่

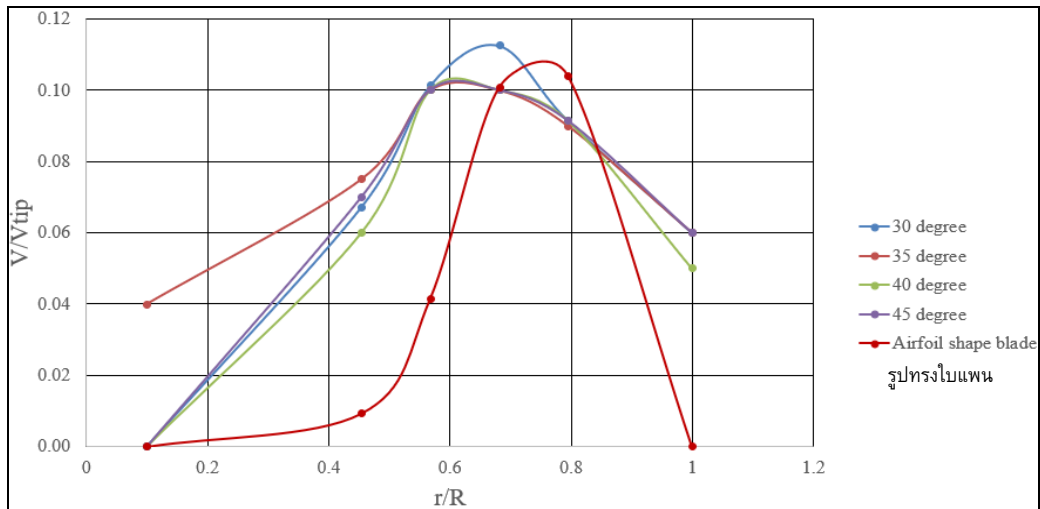
สูงกว่ามุม 30 องศา ผลการจำลองความเร็วในแนวรัศมีในรูปที่ 13 พบว่าที่มุม 25 องศา สามารถสร้างความเร็วในแนวรัศมีที่สูงกว่ามุมมองสไบกวนผสมอื่น ๆ และส่งผลให้เกิดการผสมตัวได้ดีที่เวลา 12 วินาที



รูปที่ 12 ความเร็วในแนวแกนของใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ



รูปที่ 13 ความเร็วในแนวรัศมีของใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ



รูปที่ 14 ผลการเปรียบเทียบใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศกับค่าความเร็ว  $V/V_{tip}$  ของมุมองศาต่าง ๆ [2]

จากผลการเปรียบเทียบค่าความเร็ว  $V/V_{tip}$  ของใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ ในรูปที่ 14 จะมีค่าความเร็วสนามการไหลใกล้เคียงกับงานวิจัยเรื่องการออกแบบและจำลองพลศาสตร์ของไหลของใบกวนผสมในถังสำหรับของไหลผสม ที่มุม 30 องศา [2] ซึ่งงานวิจัยที่นำมาใช้เปรียบเทียบจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเป็น k-epsilon เช่นเดียวกับงานวิจัย แต่วัสดุที่นำมาผสมกับน้ำจะเป็นน้ำแอปเปิ้ลซึ่งงานวิจัยที่ทำจะเป็นน้ำส้ม จากการศึกษาจะเห็นว่าที่  $r/R$  ของใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ น้อยกว่า 0.8 ค่าความเร็ว  $V/V_{tip}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น และที่  $r/R$  ของใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ มากกว่า 0.8 ค่าความเร็ว  $V/V_{tip}$  จะมีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งค่าที่ทำนายสามารถแสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลองวิจัยที่ผ่านมา [1,2] นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างการจำลองและการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองของถังผสมและใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศที่ทำมุม 25 องศาที่ทำการศึกษาและออกแบบนี้สามารถนำมาใช้เพื่อใช้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของใบพัดกวนผสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสมได้

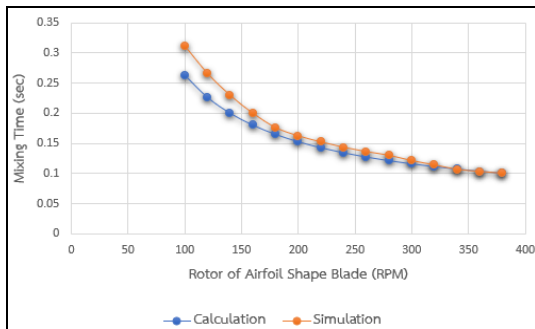
### 3.4 ผลลัพธ์ความเร็วรอบที่มีผลต่อการกวนผสม

ในส่วนแรกของงานวิจัยผู้วิจัยจะใช้รอบการหมุนคงที่ที่ 350 รอบต่อนาที ในการจำลองผลเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อจำลองความเร็วในสนามการไหลต่าง ๆ ในส่วนที่สองได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับรอบการหมุนของมอเตอร์ที่มีผลต่อช่วงเวลาในการกวนผสม โดยจะใช้ความเร็วที่ 100 ถึง 380 รอบต่อนาทีในการคำนวณ โดยงานวิจัยได้อาศัยโปรแกรมในการคำนวณหาเวลาเทียบกับการจำลองการหมุนมอเตอร์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับการคำนวณ ดังสมการที่ 1.1 [6,7]

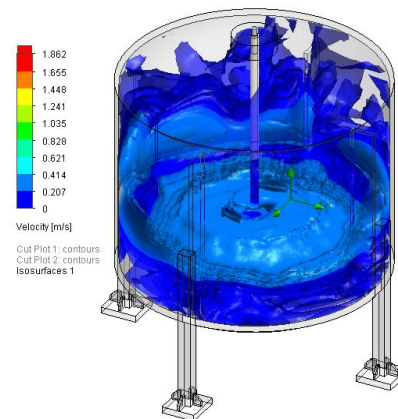
$$0.042 + \left( \frac{22.06}{N} \right) \quad (1)$$

โดยที่  $N$  คือ รอบการหมุนของมอเตอร์ ( $RPM$ )

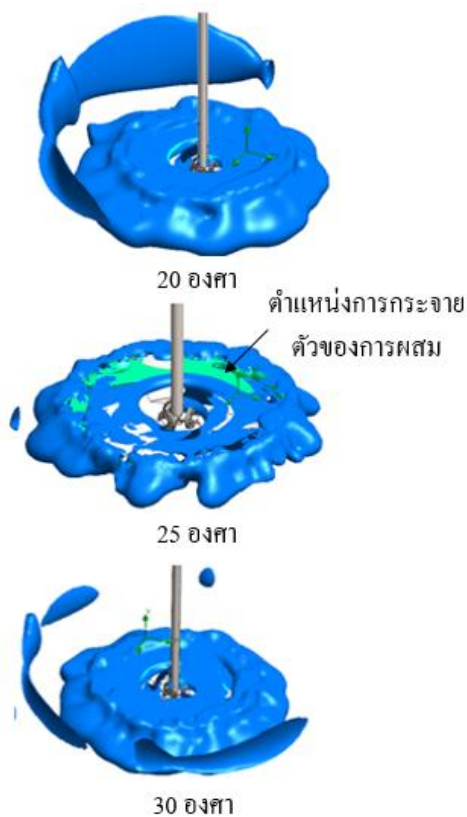
จากผลลัพธ์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและทำการคำนวณผลเพิ่มเติมเพื่อจำลองในส่วนการประมาณการของเวลาในการผสมเทียบกับความเร็วรอบการหมุนต่าง ๆ พบว่าค่าความเร็วการหมุนจะส่งผลโดยตรงต่อเวลาและอัตราการผสมของไหลผสม โดยได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลการจำลองเวลาในการกวนผสม



รูปที่ 17 การแสดงผลของผิวอิสระบริเวณรอบใบพัด  
กวนผสมรูปทรงแพนอากาศที่มุม 25 องศา



รูปที่ 16 การแสดงผลในรูปแบบของผิวอิสระ (Free Surface) บริเวณรอบใบพัดกวนผสมที่การแบ่งเฟสของ  
ของไหลระหว่างน้ำและน้ำส้ม เเท้กับ 0.5

จากรูปที่ 16 แสดงพื้นผิวอิสระของของไหล บริเวณรอบใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ พบว่าที่มุม 25 องศาจะสามารถช่วยกระจายแรงที่เกิดในพื้นที่ผิวอิสระได้ดีกว่ามุมอื่น เนื่องจากมุมที่ออกแบบมีการต้านทานการไหลที่น้อยแต่สามารถสร้างแรงในการยกตัวได้ดี ทำให้ไม่มีการต้านทานการหมุน จึงส่งผลให้แรงจากการหมุนของชุดมอเตอร์สามารถสร้างการกระจายตัวให้กับของไหลได้ดีที่สุด

### 3.5 การวิเคราะห์ความแข็งแรงทางโครงสร้างใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ

งานวิจัยได้นำหลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการออกแบบและทำการจำลองความแข็งแรงทางโครงสร้างโดยอาศัยผลกระทบที่เกิดจากการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) โดยอาศัยความสามารถในการส่งถ่ายแรงกระทำที่เกิดจากการกวนผสม (Export result to simulation) เข้ามายังโปรแกรมคำนวณผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งหลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการออกแบบเพลลาทางทฤษฎีสามารถคำนวณด้วยหลักการดังนี้

3.5.1 ความเค้นดัด (Pure bending stress) คือ เพลลาหรือส่วนหลักของเพลลาที่ถูกกระทำด้วยแรงควดคู่หรือโมเมนต์ดัดที่ปลายทั้งสองข้าง จะกระทำให้เกิดแรงเฉือนมีค่าเป็นศูนย์ตลอดทั้งเพลลา งานวิจัยสามารถคำนวณโหลดของแรงไฮดรอลิกส์ของใบพัดกวนผสมได้จากสมการที่ 2 [8]

$$F_H = \frac{3.667(P)(CF)}{nd} \quad (2)$$

โดยที่  $F_H$  คือ แรงไฮดรอลิกส์ที่เกิดขึ้นบนใบพัด

กวน ผสม (N)

$P$  คือ พลังงานที่ต้องการใช้ในการกวนผสม

(N-m/s, Watt, kg.m/s)

$n$  คือ รอบการหมุนของใบพัด (RPM)

$d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด

$CF$  คือ Material characteristic

coefficient

กำหนดให้เท่ากับ 1 [8]

หลักจากนั้นจะสามารถคำนวณค่าโมเมนต์ดัดของเพล่าใบพัดกวนผสมได้จากสมการที่ 3

$$M = \{F_{H1}(L_1)\} + \{F_{H2}(L_2)\} + \dots + \{F_{Hn}(L_n)\} \quad (3)$$

โดยที่  $L$  คือ ความยาวของเพล่าใบพัดกวนผสม (เมตร) หลังจากนั้นจะสามารถคำนวณค่าความเครียดที่เกิดจากการดัด ( $\sigma_b$ ) ได้จากสมการที่ 4

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{M}{\frac{\pi d^3}{32}} \quad (4)$$

โดยที่  $M$  คือค่าโมเมนต์ดัดในระบบ (N.m) และ ( $Z$ ) คือ โมดูลัสของหน้าตัดทรงกลม หลังจากนั้นจะสามารถคำนวณค่าความเครียดที่เกิดจากการบิดได้จากสมการที่ 5

$$\tau = \frac{T}{Z} = \frac{\frac{P(9.55 \times 10^{-3})}{n}}{\frac{\pi d^3}{16}} \quad (5)$$

จากความสัมพันธ์ของระบบสมการที่ 2-5 สามารถคำนวณค่าความเค้นผสมสูงสุด (Maximum combine stress ( $\sigma_{\max}$ )) ที่เกิดขึ้นในเพล่าใบพัดกวนผสมได้ดังสมการที่ 6 และ 7 โดยที่  $\tau_{\max}$  คือ ความเค้นเฉือนสูงสุด (N / m<sup>2</sup>)

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + (\tau)^2} \quad (6)$$

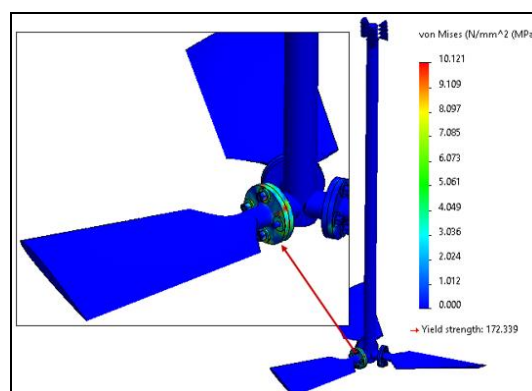
$$\sigma_{\max} = \left(\frac{\sigma}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + (\tau)^2} \quad (7)$$

วัสดุในงานวิจัยที่ใช้ในการทำใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ คือ วัสดุสแตนเลส (Stainless steel) คุณสมบัติดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ [6]

| คุณสมบัติ                    | ตัวแปร  |
|------------------------------|---------|
| Yield strength (Mpa)         | 172.399 |
| Elastic modulus (Mpa)        | 200,000 |
| Poisson ratio                | 0.28    |
| Density (kg/m <sup>3</sup> ) | 7,800   |

แรง  $F_H$  ที่เกิดขึ้นที่ได้จากการคำนวณพบว่ามีค่าประมาณ 27 N ที่กระทำต่อโครงสร้างใบพัดกวนผสมเมื่อนำมาทำการคำนวณจะได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ คือค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของเพล่าใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ ที่มุม 25 องศา มีค่าน้อยกว่าความแข็งแรงของวัสดุ ดังนั้นเพล่าใบพัดกวนผสมสามารถทำงานได้ที่ความเร็วรอบการหมุนสูงสุด 350 รอบต่อนาทีดังที่ได้จำลองด้วยดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 4. อภิปรายผลและสรุป

ต้นแบบใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ ได้ถูกออกแบบและทำการพัฒนาต้นแบบมาจากสิทธิบัตรการออกแบบเรื่องชิ้นส่วนเครื่องกลเติมอากาศในน้ำ เลขที่ 62881 [9] หลังจากนั้นจึงนำมาทำการจำลองระบบการทำงานด้วยหลักการทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองสนามการไหลภายในถังผสมน้ำส้ม และใช้หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ความแข็งแรงทางโครงสร้าง จากผลการทดสอบในการผสมน้ำส้มและน้ำที่มุมใบพัดกวนผสมรูปทรงแพนอากาศ 25 องศา พบว่าสามารถสร้างการกระจายตัวของความเข้มข้นในการผสมน้ำส้มกับน้ำให้เข้ากันได้ดีที่สุดใช้เวลา 12 นาที และมีกระกระจายตัวในการผสมกันของน้ำส้มและน้ำที่เหมาะสม เพราะความเร็วในสนามการไหลจะมีค่าที่สูงบริเวณรอบใบกวนผสมและพื้นที่การหมุนวนด้านล่างใบกวนผสม และค่าความเร็วในแนวตั้งจะมีค่าความเร็วทั้งค่าบวกและค่าลบ จะส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของของไหลผสมไปทั่วทั้งบริเวณถังผสม และการเลือกใช้งานใบพัดกวนผสมที่สามารถกวนผสมของไหลให้เข้ากันได้ดีและใช้เวลาที่ไม่มากจะส่งผลดี และสามารถประหยัดในเรื่องของพลังงานและการสิ้นเปลืองได้ การจำลองผลเชิงตัวเลขโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลและการวิเคราะห์ผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งที่ใช้แสดงรูปแบบแนวคิดด้านการออกแบบและการคำนวณ ควรจะต้องทำการทดสอบจริงเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและไฟไนต์เอลิเมนต์ไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการทดสอบจริง และทำการประเมินความแม่นยำในผลการทดลองและสรุปผลต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ที่สนับสนุนทุนและอุปกรณ์ในงานวิจัยวิจัยนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lahamomchaiyakul W, Booiam P, Kamtubtim N. Simulation of fluid mixing in food industry using computational fluid dynamics. Proceeding of the 4th National Food Engineering Conference; 2018 Apr 3; RMUTT, Pathum Thani; 2018. P. 10-5. (in Thai).
- [2] Lahamornchaiyakul W. Design and CFD simulation of agitating blade in tank for mixing fluid. Ladkrabang Engineering Journal. 2020;37(1):13-7. (in Thai).
- [3] Airfoil Tool. Airfoil NACA 63-212 [Internet]. 2021. [cited 2021 January 3]. Available from: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n63212-il>.
- [4] SOLIDWORK. SOLIDWORK Flow Simulation 2012 Tutorial [Internet]. 2012. [cited 2021 January 3]. Available from: [https://www.academia.edu/3713889/Solidworks\\_flow\\_simulation\\_2012\\_tutorial](https://www.academia.edu/3713889/Solidworks_flow_simulation_2012_tutorial).
- [5] Engineering ToolBox. Specific Heat of Food and Foodstuff [Internet]. 2003. [cited 2021 January 3]. Available from: [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d\\_295.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d_295.html).
- [6] Jeffreg MZ, Mario MA, Fernando JM. Extensive validation of computed laminar flow in a stirred tank with three rushton. AIChE Journal. 2001 Oct 16;47(10):2144-10.
- [7] Byung SC, Baolin W, Philyaw S, Dhanasekharan K, Terry A R. Residence time distribution in a stirred tank: comparison of CFD predictions with experiment. Ind. Eng. Chem. Res. 2004 Sept 27; 43(20):6548-8.

- [8] Abbaszadeh A, Ghobadian B, Najafi G, Motevari A. Analytical and FEA design of mixing system in STR biodiesel production. AENSI Journals Advances in Environmental Biology. 2014 Jan 20; 8(1):325-9.
- [9] Lahamornchaiyakul W, Inventor; Rajamangala University of Technology Lanna., assignee. Part of Water Aerator. Thailand patent Thai 62881. 2018 May 9.

# การใช้เศษไม้ยางพารา ใบยางพารา และน้ำยางพารา เป็นระบบผนังฉนวนความร้อน

ประชุม คำพุด<sup>1\*</sup>

prachoom\_k@rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 2-Jun-2022  |
| Revised  | : 9-Jun-2022  |
| Accepted | : 14-Jun-2022 |

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาวิธีการผลิตต้นแบบ การทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสภาพการนำความร้อนของระบบผนังอาคารที่เป็นฉนวนความร้อน โดยทำมาจากเศษไม้ยางพารา ใบยางพารา และน้ำยางพารา ด้วยเครื่องจักรที่มีต้นทุนต่ำ และนำไปถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับผู้ประกอบการ เมื่อนำมาประกอบขึ้นรูปเป็นระบบผนังอาคารขนาด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 30 x 30 x 15 ซม. ผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานมีลักษณะทั่วไปผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนด โดยมีเหลี่ยมคม ไม่บิด ไม่หลุดร่อน ได้ฉาก และความคลาดเคลื่อนของมิติไม่เกิน  $\pm 2$  มม. มีค่าความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 2.54 เมกะพาสคัล ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน มอก.58-2533 และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.138 วัตต์/ม.-องศาเซลเซียส จึงสามารถเป็นฉนวนป้องกันความร้อนได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานก่อสร้างเป็นผนังอาคารได้จริง

**คำสำคัญ:** เศษไม้ยางพารา ใบยางพารา น้ำยางพารา ผนังอาคาร ฉนวนความร้อน

# Using Rubber Wood Chips, Rubber Leaves and Rubber Latex as a Heat Insulating wall System

Prachoom Khamput<sup>1\*</sup>

prachoom\_k@rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 2-Jun-2022  |
| Revised  | : 9-Jun-2022  |
| Accepted | : 14-Jun-2022 |

## Abstract

This research aims to study the prototype of the production process, physical and mechanical properties testing and the thermal conductivity of the building wall system with insulation properties made from rubber wood chips, rubber leaves and rubber latex by low cost machines. Then this research will be used to transfer production technology to establishment. When it is assembled into a building wall system with the size 30 cm x 30 cm x 15 cm, the testing result showed that the general properties achieved as per regulations with sharp edges, not chipping, not flipping perpendicular, and dimensional tolerance not more than  $\pm 2$  mm with compressive strength of 2.54 MPa as the TIS.58-2533 standard requirements. The coefficient of thermal conductivity is 0.138 W/m-Kelvin degree. Therefore, it can be a good heat insulator. The results from this research can be applied to the construction concerned with building wall.

**Keywords:** rubber wood chips, rubber leaves, rubber latex, building wall, thermal insulation

## 1. บทนำ

ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางประมาณ 22.8 ล้านไร่ (พ.ศ.2560) โดยในช่วงปีหลัง ๆ เนื้อที่ปลูกยางมีแนวโน้มลดลงจากการปลูกพืชอื่นทดแทน [1] อย่างไรก็ตามพื้นที่ปลูกยางก็ยังมีปริมาณที่มากเพียงพอต่อการประกอบอุตสาหกรรมไม้ยางพาราแปรรูป ซึ่งปัจจุบันมีโรงงานแปรรูปไม้ในประเทศไทยทั้งสิ้น 1,208 โรงงานตั้งอยู่ในภาคใต้ร้อยละ 80 ภาคตะวันออกร้อยละ 15 ภาคอีสานร้อยละ 4 และภาคอื่น ๆ ร้อยละ 1 [2] โดยอุตสาหกรรมด้านนี้กำลังมีอนาคตเนื่องจากตลาดหลายประเทศต้องการเฟอร์นิเจอร์ไม้ ซึ่งการแปรรูปไม้ยางพาราย่อมมีเศษขี้เลื่อยและเศษชิ้นไม้เหลือในโรงงานอยู่เป็นจำนวนมาก อีกทั้งการทำสวนยางก็จะมีเศษกิ่งไม้ยางและเศษใบยางพาราเหลือทิ้งในแปลงปลูกจำนวนมากเช่นกัน จึงมีแนวคิดในการนำเศษเหลือทิ้งทั้งจากโรงงานและจากสวนยางมาผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างผนังฉนวนความร้อนซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าสูงทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยงานวิจัยนี้ใช้แนวทางมาจากการใช้เศษไม้สักและใบสักเป็นระบบผนังฉนวนป้องกันความร้อนแบบแซนด์วิชซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อนใช้กาวยูรีเทนเป็นสารเชื่อมประสาน อัดเป็นชั้น 3 ชั้น มีขนาดกว้าง 30 ซม. x ยาว 30 ซม. x หนา 7 ซม. ค่าความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 2.64 เมกะพาสคัล และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.104 วัตต์/ม.-องศาเซลเซียส [3] โดยนวัตกรรมที่ได้จากงานวิจัยนี้เรียกว่า “ผนังอาคารแบบแซนด์วิชจากเศษไม้ยางพารา ใบยางพารา และน้ำยางพารา” มีความแตกต่างจากเดิมคือการใช้วัสดุประสานที่เป็นน้ำยางพาราคอมปาวด์ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ากาวยูรีเทนซึ่งมีสารเคมีอันตรายในส่วนผสมซึ่งประกบด้านนอกและฉนวนไส้กลาง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดและในงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้ดำเนินการในส่วนนี้ ดังนั้นผลสำเร็จที่ได้จากงานวิจัยนี้ นอกจากจะได้ระบบผนังอาคารที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีแล้ว ยังได้นวัตกรรมวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่ใช้คุณสมบัติในการประสานของน้ำยางทดแทนการใช้วัสดุประสานกาวยูรีเทนซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานประกอบด้วย เครื่องบดย่อยวัสดุ (รูปที่ 1) เครื่องอัดร้อนใช้ไฮดรอลิกแบบมือโยกขนาดแผ่นเพลท 40 x 40 ซม. (รูปที่ 2) ถังเก็บวัสดุ ไม่สำหรับผสมเศษวัสดุกับสารเชื่อมประสาน (รูปที่ 3) เครื่องฉีดสารเชื่อมประสานต่อวัสดุ เครื่องชั่งน้ำหนัก แผ่นเหล็กกรองอัด แท่งเหล็กเพื่อใช้กำหนดความหนา กล้องสปีดลิ้มเพื่อใช้ในการเตรียมแผ่น แผ่นเทปล่อน ถังลม บั้มลม พัดลม ถังมือกันร้อน ผ้าปิดจมูก แวนตา อุปกรณ์ทดสอบสมบัติทางกายภาพ และเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (รูปที่ 4)



รูปที่ 1 เครื่องบดย่อยวัสดุ



รูปที่ 2 เครื่องอัดร้อนใช้ไฮดรอลิกแบบมือโยกขนาดแผ่นเพลท 40 x 40 ซม.



รูปที่ 3 ไม่สำหรับผสมเศษวัสดุกับกาว



รูปที่ 5 ลักษณะของเศษไม้ยางพาราที่บดย่อยแล้ว



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบแรงกดอัด



รูปที่ 6 ลักษณะของใบยางพาราที่บดย่อยแล้ว  
(ผ่านตะแกรงขนาด 25 มม.)

## 2.2 การเตรียมวัสดุ

การเตรียมเศษไม้ยางพารา ที่เหลือทิ้งจากสวนยางพาราของชาวบ้านในจังหวัดระยอง ซึ่งเป็นส่วนของกิ่งยอดอ่อนไม้ยางพารา นำมาทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดเส้นใยให้ผ่านตะแกรงจำนวน 4 ขนาดด้วยกัน คือ 25, 10, 6 และ 4 มม. ทำความสะอาด แล้วตากแห้งหรืออบไล่ความชื้นด้วยเตาอบ โดยกำหนดปริมาณความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 12 (รูปที่ 5) การขึ้นรูปแผ่นขนาด 30 x 30 x 1 ซม. ใช้ปริมาณเศษไม้ยางพาราบดย่อยจำนวน 800 กรัม/แผ่น

การเตรียมใบยางพารา ที่เหลือทิ้งจากสวนยางพาราของชาวบ้านในจังหวัดระยอง ซึ่งเป็นส่วนที่ติดกับกิ่งยอดอ่อนไม้ยางพาราและส่วนที่ร่วงลงพื้นสวนยางผสมกัน นำมาทำความสะอาด ตากให้แห้ง แล้วบดย่อยด้วยเครื่องบดเส้นใยให้ผ่านตะแกรงขนาด 25 มม. ควบคุมปริมาณความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 12 (รูปที่ 6) การขึ้นรูปแผ่นขนาด 30 x 30 x 6.5 ซม. (ใช้ครั้งละ 2 แผ่น ประกบกัน เพื่อให้ได้ความหนา 13 ซม.) ใช้ปริมาณเศษใบยางบดย่อยจำนวน 3,000 กรัม/แผ่น

การเตรียมสารเชื่อมประสานใช้น้ำยางคอมปาวด์สูตรของกองวิจัยอุตสาหกรรมยาง การยางแห่งประเทศไทย ดังตารางที่ 1 โดยกำหนดปริมาณอัตราส่วนการผสมร้อยละ 15, 20 และ 25 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สูตรของน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้เชื่อมประสาน

| ส่วนผสม                | ส่วนโดยน้ำหนักเปียก |
|------------------------|---------------------|
| 60% น้ำยางข้น          | 167                 |
| 10% เทอริค 16 60 16    | 2                   |
| 50% กำมะถัน            | 5                   |
| 50% แซต ดี อี ซี       | 3                   |
| 50% วิงสเตย์แอล        | 2                   |
| 50% ดีตาเนียมไดออกไซด์ | 5                   |
| 50% แคลเซียมคาร์บอเนต  | 20                  |
| 50% ซิงค์ออกไซด์       | 3                   |

## 2.3 วิธีการทำส่วนของแผ่นผนังไม้ด้านนอก

ทำส่วนของผนังไม้โดยการอัดแผ่นผนังขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบจากเศษไม้ยางพารา ขนาด  $30 \times 30 \times 1$  ซม. กำหนดปริมาณเศษไม้ยางพาราบดย่อยจำนวน 800 กรัม ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ ร้อยละ 15, 20 และ 25 ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนการอัดขึ้นรูป เริ่มจากการทำความสะอาดและบดย่อย แล้วอบจนได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมด้วยเครื่องอบ ซึ่งน้ำหนักนำไปใส่ไม่ผสมคลุกกับน้ำยางคอมปาวด์ด้วยการฉีดพ่น เมื่อผสมเข้ากันเรียบร้อยแล้ว นำเศษไม้ยางพาราผสมน้ำยางคอมปาวด์ ไปทำเป็นแผ่นขึ้นไม้ด้วยเครื่องอัดร้อนในแนวราบทั้งนี้ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แรงอัดความดัน 200 บาร์ และระยะเวลาในการอัดร้อน 10 นาที ให้น้ำหนักคงค้างทิ้งไว้ให้เย็นตัวในเครื่องอัดอีก 6 ชั่วโมง นำแผ่นตัวอย่างออกจากเครื่อง แกะออกจากแบบ แล้วนำไปผึ่งให้แห้งในสภาพอากาศปกติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 7) จากนั้นนำไปตัดเป็นชิ้นให้มีขนาดเท่ากับวิธีการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ตามมาตรฐาน มอก.876-2547 [4] เรืองแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ เพื่อเลือกอัตราส่วนที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดสำหรับใช้งานประกอบเป็นระบบผนังอาคาร



รูปที่ 7 การผึ่งชิ้นงานแผ่นอัดจากเศษไม้ยางพารา

## 2.4 วิธีการทำส่วนของแกนฉนวนไส้กลาง

ทำส่วนของแกนไส้กลางโดยการอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนป้องกันความร้อนจากใยยางพารา ขนาด  $30 \times 30 \times 6.5$  ซม. กำหนดปริมาณเศษใยยางพาราบดย่อยจำนวน 3,000 กรัม ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ ร้อยละ 15, 20 และ 25 ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนการอัดขึ้น

รูป เริ่มจากการทำความสะอาดและบดย่อย แล้วอบจนได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมด้วยเครื่องอบ ซึ่งน้ำหนักนำไปใส่ไม่ผสมคลุกกับน้ำยางคอมปาวด์ ด้วยการฉีดพ่น เมื่อผสมเข้ากันเรียบร้อยแล้ว นำเศษใยยางพาราผสมกับน้ำยางคอมปาวด์ ไปทำเป็นแผ่นใยอัดด้วยเครื่องอัดร้อนในแนวราบทั้งนี้ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แรงอัดความดัน 200 บาร์ และระยะเวลาในการอัดร้อน 30 นาที ให้น้ำหนักคงค้างทิ้งไว้ให้เย็นตัวในเครื่องอัดอีก 6 ชั่วโมง นำแผ่นตัวอย่างออกจากเครื่อง แกะออกจากแบบ แล้วนำไปผึ่งให้แห้งในสภาพอากาศปกติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตัดเป็นชิ้นให้มีขนาดเท่ากับวิธีการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ (รูปที่ 8) ตามมาตรฐาน มอก.966-2547 [5] เรืองแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง เพื่อเลือกอัตราส่วนที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดสำหรับใช้เป็นฉนวนความร้อนเสริมไส้กลางระบบผนัง



รูปที่ 8 ชิ้นงานแกนฉนวนไส้กลางจากเศษใยยางพารา

## 2.5 วิธีการประกอบเป็นระบบผนัง

### อาคารฉนวนป้องกันความร้อน

เลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดของแผ่นผนังประกอบด้านนอกและแผ่นฉนวนไส้กลางจากผลการทดสอบที่ทำการประกอบชิ้นงานส่วนของผนังแผ่นขึ้นไม้อัดและส่วนของแกนไส้กลางด้วยกาวติดไม้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคารขนาดขึ้นละ  $30 \times 30$  ตร.ซม. หนา 15 ซม. (เมื่อนำไปผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์สามารถออกแบบให้มีลักษณะเป็นเตี้ยและวางลื่นที่ขอบปลายของผนังทั้งด้านบนและด้านล่าง เพื่อสะดวกในการประกอบติดตั้งได้) ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การประกอบชิ้นงานส่วนของผนังแผ่นขึ้นไม้อัด และส่วนของแกนไม้กลางด้วยกาวติดไม้

## 2.6 วิธีการทดสอบชิ้นตัวอย่าง

การทดสอบชิ้นส่วนของผนังแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบที่ใช้ทำส่วนของผนังประกบด้านนอก เทียบเคียงกับมาตรฐาน มอก.876-2547 [4] เรื่องแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ เพื่อเลือกอัตราส่วนที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดสำหรับใช้งานประกอบเป็นระบบผนังอาคาร โดยการทดสอบในขั้นตอนนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ส่วนผสมที่ดีที่สุดเท่านั้นไม่จำเป็นต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกสมบัติเนื่องจากเกณฑ์มาตรฐานที่ต้องการให้ผ่านทุกคุณสมบัติคือมาตรฐาน มอก.58-2533 [6] เรื่องบล็อกก่อผนังไม่รับน้ำหนัก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ปลายทางที่ได้เป็นลักษณะของบล็อกก่อผนังไม่ใช่เป็นแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ

การทดสอบชิ้นส่วนของแผ่นฉนวนไส้กลาง เทียบเคียงกับมาตรฐาน มอก.966-2547 [5] เรื่องแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง เพื่อเลือกอัตราส่วนที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดสำหรับใช้เป็นฉนวนความร้อนเสริมไส้กลางระบบผนัง โดยการทดสอบในขั้นตอนนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ส่วนผสมที่ดีที่สุดเท่านั้นไม่จำเป็นต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกสมบัติเช่นเดียวกันกับชิ้นส่วนของผนังแผ่นขึ้นไม้อัด

ระบบผนังอาคารฉนวนป้องกันความร้อนทำการทดสอบสมบัติเชิงวิศวกรรมในด้านการรับกำลังต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ โดยใช้มาตรฐานอ้างอิงหลักในการทดสอบ คือ มอก.58-2533 [6] เนื่องจากเป็นลักษณะของบล็อกก่อผนังแบบไม่รับน้ำหนัก ส่วน

มาตรฐานอื่น ๆ ทำการทดสอบเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ โดยสมบัติที่ทำการทดสอบประกอบด้วย 1) ขนาดและเกณฑ์ความคาดเคลื่อน, 2) ความต้านทานแรงอัด ตามมาตรฐาน มอก.58-2533 (รูปที่ 10), 3) ความต้านทานแรงดัด (ไม่ระบุในข้อกำหนด) ดังรูปที่ 11, 4) ความชื้น ตามมาตรฐาน มอก.58-2533, 5) การลามไฟ ตามมาตรฐาน ASTM E84 [7] (ไม่ระบุในข้อกำหนด), และ 6) สภาพการนำความร้อนของระบบผนัง ตามมาตรฐาน ASTM C518 [8]



รูปที่ 10 การทดสอบความต้านทานแรงอัด



รูปที่ 11 การทดสอบความต้านทานแรงดัด

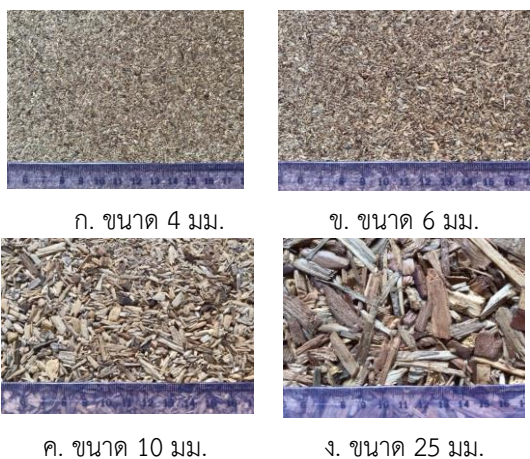
## 3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบแบ่งออกเป็นกิจกรรมหลัก ๆ ด้วยกัน คือ (1) กระบวนการผลิตต้นแบบผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคารที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีโดยใช้เศษไม้ยางพารา ใบยางพารา

และน้ำยางพารา (2) ผลการทดสอบสมบัติของผนังแผ่นอัดจากเศษไม้ยางพารา และผลการทดสอบสมบัติของแผ่นอัดฉนวนไส้กลางจากใบยางพารา (3) ผลการทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคารจากเศษไม้ยางพาราและใบยางพาราในห้องปฏิบัติการ ตามมาตรฐาน มอก.58-2533 และมาตรฐานอื่นเพิ่มเติม

### 3.1 กระบวนการผลิตต้นแบบผลิตภัณฑ์

กระบวนการผลิตต้นแบบผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคาร พบว่าสามารถได้ตัวอย่างแผ่นขึ้นไม้อัดจากไม้ยางพารา สำหรับทำผนังประเภทด้านนอก 2 ด้าน และแผ่นใยอัดฉนวนแกนไส้กลางจากใบยางพารา โดยมีผลปัจจัยในการดำเนินงานดังนี้ คือ ผลการเลือกขนาดที่เหมาะสมของเศษไม้ยางพาราบดย่อย ทำการเลือกจาก 4 ขนาด คือ 25, 10, 6 และ 4 มม. โดยลักษณะแผ่นขึ้นไม้อัดจากไม้ยางพาราที่ได้ แสดงดังรูปที่ 12



**รูปที่ 12** ผิวหน้าของแผ่นขึ้นไม้อัดจากไม้ยางพารา ขนาดไม่เกิน 4, 6, 10 และ 25 มม.

รูปที่ 12 พบว่าการบดย่อยไม้ยางพาราให้มีขนาดใหญ่ (25 มม.) จะทำให้ผิวหน้ามีความหยาบ เป็นช่องว่างระหว่างชั้นไม้กระจายอยู่ทั่วไป ไม่สวยงาม และทำการปรับแต่งผิวหน้าได้ยาก ส่วนการบดย่อยไม้ยางพาราให้มีขนาดเล็กเกินไป (6 และ 4 มม.) ส่งผลให้แผ่นไม้อัดยางพารายึดเกาะกับน้ำยางคอมปาวด์ได้ไม่ดี ทำให้เนื้ออ่อน ไม่แข็งแรง รับแรงได้น้อย โดยเฉพาะไม้ยางพาราบดย่อยขนาด 10 มม. มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นแผ่นไม้อัดยางพาราด้านนอกของบล็อก

ระบบผนังอาคารมากที่สุด ทั้งด้านค่าความต้านทานแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าขนาดอื่น เนื่องจากมีผิวหน้าที่เรียบเนียน สวยงาม และมีการยึดติดกับน้ำยางคอมปาวด์ดีกว่าขนาดอื่น ๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาด 10 มม. ในการนำมาใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ส่วนของใบยางพาราใช้ขนาด 25 มม. เนื่องจากมีความเหมาะสมในการนำมาอัดแผ่นแบบหลวม ๆ อยู่แล้ว อีกทั้งยังช่วยลดขั้นตอนค่าใช้จ่ายในการบดย่อยอีกด้วย

ส่วนของสารเชื่อมประสานใช้น้ำยางคอมปาวด์ และทำการปรับค่าตัวแปรในการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด จากเดิมการอัดรีดโดยใช้กาวเคมีเป็นตัวประสานต้องใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส สำหรับอัดแผ่นเศษขึ้นไม้ยางพารา และใช้อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ในการอัดแผ่นใยอัดจากใบยางพารา ใช้ความดัน 50 บาร์ ระยะเวลาในการอัดแผ่น 5 นาที ต่อความหนา 1 ซม. ปรับเปลี่ยนมาเป็นการอัดแผ่นเศษขึ้นไม้ยางพาราและแผ่นใยอัดจากใบยางพาราใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เท่ากัน ใช้ความดัน 200 บาร์ ระยะเวลาในการอัดแผ่นเศษขึ้นไม้ยางพาราใช้เวลา 10 นาที ส่วนระยะเวลาในการอัดแผ่นใยอัดจากใบยางพาราใช้เวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการทิ้งให้ชิ้นงานเย็นตัวลงโดยคงค้างแรงอัดไว้เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นตัวอย่างแผ่นอัดทั้งไม้ยางพาราและใบยางพารา โดยทั้งแผ่นเศษขึ้นไม้ยางพาราและแผ่นใยอัดจากใบยางพาราสามารถขึ้นรูปเป็นตัวอย่างได้โดยไม่มีการพองตัวจากด้านในเนื้อวัสดุขณะทำการอัดรีด และไม่เกิดการโก่งตัวของแผ่นตัวอย่างขณะผึ่งในสภาพอากาศปกติ

### 3.2 ผลการทดสอบสมบัติของผนังแผ่นอัดจากเศษไม้ยางพารา และแผ่นอัดฉนวนไส้กลางจากใบยางพารา

ผลการทดลองสมบัติของผนังแผ่นอัดจากเศษไม้ยางพารา และแผ่นอัดฉนวนไส้กลางจากใบยางพารา แสดงในตารางที่ 2-3

**ตารางที่ 2** สมบัติของแผ่นอัดเศษชิ้นไม้ยางพารา (ผนังด้านนอก) ที่อัตราส่วนน้ำยางคอมปาวด์ต่างกัน

| สมบัติ                         | ปริมาณน้ำยาง (ร้อยละ)     |                           |                           | ข้อกำหนด                      |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|
|                                | *25                       | 20                        | 15                        | ตาม มอก.                      |
| ลักษณะทั่วไป                   | ปกติ                      | ปกติ                      | ปกติ                      | ผิวเรียบ ขอบได้ฉากกับระนาบผิว |
| ความหนาแน่น                    | 854.65 กก./ลบ.ม.          | 829.19 กก./ลบ.ม.          | 781.75 กก./ลบ.ม.          | 400 - 900 กก./ลบ.ม.           |
| ปริมาณความชื้น                 | ร้อยละ 12.14              | ร้อยละ 12.78              | ร้อยละ 13.82              | ร้อยละ 4 - 13                 |
| การพองตัว                      | ร้อยละ 9.50               | ร้อยละ 10.63              | ร้อยละ 11.24              | ไม่เกินร้อยละ 12              |
| ความต้านทานแรงดัด              | 14.26 เมกะพาสคัล          | 12.43 เมกะพาสคัล          | 10.32 เมกะพาสคัล          | ไม่น้อยกว่า 14 เมกะพาสคัล     |
| มอดูลัสยืดหยุ่น                | 1,855 เมกะพาสคัล          | 1,467 เมกะพาสคัล          | 1,285 เมกะพาสคัล          | ไม่น้อยกว่า 1,800 เมกะพาสคัล  |
| ความต้านแรงดึงดัดฉากกับผิวหน้า | 0.49 เมกะพาสคัล           | 0.38 เมกะพาสคัล           | 0.33 เมกะพาสคัล           | ไม่น้อยกว่า 0.4 เมกะพาสคัล    |
| ความยืดหยุ่นของผิวหน้า         | 0.92 เมกะพาสคัล           | 0.82 เมกะพาสคัล           | 0.73 เมกะพาสคัล           | ไม่น้อยกว่า 0.8 เมกะพาสคัล    |
| ส.ป.ส.การนำความร้อน            | 0.132 วัตต์/ม.-องศาเซลวิน | 0.130 วัตต์/ม.-องศาเซลวิน | 0.129 วัตต์/ม.-องศาเซลวิน | ไม่ได้กำหนด                   |

**ตารางที่ 3** สมบัติของแผ่นอัดเศษใบยางพารา (แผ่นฉนวนไส้กลาง) ที่อัตราส่วนน้ำยางคอมปาวด์ต่างกัน

| สมบัติ              | ปริมาณน้ำยาง (ร้อยละ)     |                           |                           | ข้อกำหนด                      |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|
|                     | 25                        | 20                        | *15                       | ตาม มอก.                      |
| ลักษณะทั่วไป        | ปกติ                      | ปกติ                      | ปกติ                      | ผิวเรียบ ขอบได้ฉากกับระนาบผิว |
| ความหนาแน่น         | 152.25 กก./ลบ.ม.          | 151.98 กก./ลบ.ม.          | 151.50 กก./ลบ.ม.          | 400 - 800 กก./ลบ.ม.           |
| ปริมาณความชื้น      | ร้อยละ 9.97               | ร้อยละ 11.18              | ร้อยละ 12.23              | ร้อยละ 4 - 13                 |
| การพองตัว           | ร้อยละ 42.87              | ร้อยละ 43.75              | ร้อยละ 45.89              | ไม่เกินร้อยละ 6               |
| ความต้านทานแรงดัด   | 1.21 เมกะพาสคัล           | 0.66 เมกะพาสคัล           | 0.47 เมกะพาสคัล           | ไม่น้อยกว่า 15 เมกะพาสคัล     |
| มอดูลัสยืดหยุ่น     | 53.25 เมกะพาสคัล          | 34.43 เมกะพาสคัล          | 30.73 เมกะพาสคัล          | ไม่น้อยกว่า 1,700 เมกะพาสคัล  |
| ส.ป.ส.การนำความร้อน | 0.065 วัตต์/ม.-องศาเซลวิน | 0.060 วัตต์/ม.-องศาเซลวิน | 0.052 วัตต์/ม.-องศาเซลวิน | ไม่ได้กำหนด                   |

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของผนังแผ่นอัดจากเศษไม้ยางพาราตามมาตรฐาน มอก.876-2547 เรื่องแผ่นชิ้นไม้อัดชนิดอัดราบ และแผ่นอัดฉนวนไส้กลางจากใบยางพารา ตามมาตรฐาน มอก.966-2547 เรื่องแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ประเภทนั้น ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกค่าสมบัติที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปประกอบเป็นระบบผนังฉนวนความร้อน ซึ่งสมบัติต่าง ๆ ไม่จำเป็นต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกค่าเพราะว่าไม่ได้ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ในลักษณะของแผ่นวัสดุทดแทนไม้ เพียงแต่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของระบบเปลือกก่อผนัง ดังนั้นมาตรฐานที่ต้องผ่านเกณฑ์ทั้งหมดคือ

มาตรฐานตาม มอก.58-2533 เรืองบล็อกก่อผนังไม่รับน้ำหนักประเภทไม่ควบคุมความชื้น จึงสามารถนำไปใช้งานได้ โดยข้อกำหนดเบื้องต้นนั้น แผ่นอัดเศษชิ้นไม้ยางพารา (ผนังด้านนอก) ไม่ต้องทดสอบปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ เนื่องจากใช้ยางธรรมชาติเป็นสารเชื่อมประสาน และไม่ต้องทดสอบความยืดหยุ่นของตะปู เนื่องจากมีขนาดไม่เกิน 13 มม. ส่วนของแผ่นอัดเศษไม้ยางพารา (แผ่นฉนวนไส้กลาง) ไม่ต้องทดสอบปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์เนื่องจากใช้ยางธรรมชาติเป็นสารเชื่อมประสาน และไม่ต้องทดสอบความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าและไม่ต้องทดสอบความยืดหยุ่นของตะปูเนื่องจากใช้เป็นวัสดุฉนวนด้านใน จึงไม่จำเป็นต้องใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติดังกล่าว

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแผ่นผนังขึ้นไม้อัดจากเศษไม้ยางพารา ความหนา 1 ซม. ที่ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ร้อยละ 15, 20 และ 25 ตามลำดับ ตามมาตรฐาน เรืองแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ (มอก.876-2547) พบว่าทุกอัตราส่วนสามารถขึ้นรูปได้ โดยมีลักษณะทั่วไปที่ผ่านข้อกำหนด คือ มีผิวเรียบ ขอบได้ฉากกับกระนาบผิว มีค่าความหนาแน่นอยู่ในเกณฑ์กำหนด คือ ช่วง 400 กก./ลบ.ม. ถึง 900 กก./ลบ.ม. ปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 4-13 ตรวจไม่พบปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ มีการพองตัวตามความหนาไม่เกินร้อยละ 12 ความต้านทานแรงดัดไม่ต่ำกว่า 14 เมกะพาสคัล โมดูลัสยืดหยุ่นไม่ต่ำกว่า 1800 เมกะพาสคัล ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าไม่ต่ำกว่า 0.4 เมกะพาสคัล ความยืดหยุ่นของผิวหน้าไม่ต่ำกว่า 0.8 เมกะพาสคัล ความยืดหยุ่นของตะปูไม่ต้องการทดสอบเนื่องจากมีขนาดความหนาไม่เกิน 13 มม. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.132 วัตต์/ม.-องศาเซลวิน ซึ่งพบว่าเมื่อผสมน้ำยางในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้แผ่นผนังขึ้นไม้อัดจากเศษไม้ยางพารามีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งค่าความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความยืดหยุ่นของผิวหน้า โดยในการวิจัยครั้งนี้ผลการทดลองที่เหมาะสมเลือกใช้ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ร้อยละ 25 ใช้เศษไม้ยางพาราบดย่อยขนาด 10 มม.

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแผ่นฉนวนป้องกันความร้อนจากใบยางพารา ความหนา 6.5 ซม. ที่ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ ร้อยละ 15, 20 และ 25 ตามลำดับ ใช้ใบยางพาราบดย่อยขนาด 25 มม. ตามมาตรฐาน เรืองแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (มอก.966-2547) พบว่าคุณสมบัติด้านความแข็งแรงมีค่าไม่มากเนื่องจากต้องการใช้คุณสมบัติในการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี จึงจำเป็นต้องลดความหนาแน่นลงให้มากที่สุดให้ต่ำกว่ามาตรฐานของแผ่นใยอัดจึงส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงตามไปด้วย ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ ร้อยละ 15 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.052 วัตต์/ม.-องศาเซลวิน

### 3.3 ผลการทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคารจากเศษไม้ยางพาราและใบยางพาราในห้องปฏิบัติการ

การประกอบเป็นผลิตภัณฑ์บล็อกระบบผนังอาคารเพื่อทำการทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 58-2533 โดยเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมมากที่สุดของแผ่นผนังประกบด้านนอกและแผ่นฉนวนไส้กลางจากผลการทดสอบที่ได้ ทำการประกอบชิ้นงานส่วนของผนังแผ่นขึ้นไม้อัดและส่วนของแกนไส้กลางด้วยกาวเป็นผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคารขนาดชิ้นละ 30 x 30 ตร.ซม. หนา 15 ซม. (สามารถออกแบบให้มีลักษณะเป็นเดือยและรางลื่นที่ขอบปลายของผนังทั้งด้านบนและด้านล่าง เพื่อสะดวกในการประกอบติดตั้ง เมื่อนำไปใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ได้) โดยสมบัติของผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคารจากเศษไม้ยางพาราและใบยางพารา ได้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการประกอบชิ้นงานส่วนของผนังไม้และส่วนของแกนไส้กลางเป็นผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคารและบ้านพักอาศัยที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี พบว่าสามารถใช้กาวลาเท็กซ์สำหรับยึดติดไม้เป็นวัสดุในการยึดติดระหว่างส่วนของแผ่นผนังไม้ด้านนอกและส่วนของแกนฉนวนไส้กลางได้ดี ทำให้ไม่แยกตัวกันระหว่างการทดสอบการรับแรงอัด อีกทั้งสามารถนำไปเจาะร่องและทำเดือยได้

**ตารางที่ 4** ผลการทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ระบบผนังฉนวนความร้อนที่ใช้งาน

| คุณสมบัติ                 | ค่าที่ได้                                                   | เกณฑ์ข้อกำหนด                                                  |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| ลักษณะทั่วไป              | ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน                                            | ความคาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 2$ มม. แข็งแรง ปราศจากรอยแตกร้าว    |
| ความต้านทานแรงอัด         | 2.54 เมกะพาสคัล                                             | มอก.58-2533 กำหนดไว้ ต้องไม่ต่ำกว่า 2.5 เมกะพาสคัล             |
| ความต้านทานแรงดัด         | 0.5 เมกะพาสคัล                                              | มอก.58-2533 ไม่ได้กำหนด                                        |
| ความหนาแน่น               | 353.78 กก./ลบ.ม.                                            | มอก.58-2533 ไม่ได้กำหนด                                        |
| การดูดซึมน้ำ              | เฉลี่ยผนังไม้ ด้านนอกและแผ่นฉนวนไส้กลางเท่ากับ ร้อยละ 32.6  | มอก.58-2533 ประเภทไม้ควบคุมความชื้นไม่ได้ กำหนดค่าการดูดซึมน้ำ |
| ปริมาณความชื้น            | เฉลี่ยผนังไม้ ด้านนอกและแผ่นฉนวนไส้กลางเท่ากับ ร้อยละ 12.73 | ร้อยละ 4 – 13                                                  |
| การทนไฟ                   | 1 ชั่วโมง                                                   | มอก.58-2533 ไม่ได้กำหนด                                        |
| สัมประสิทธิ์การนำความร้อน | 0.064 วัตต์/ม.-องศาเซลวิน                                   | มอก.58-2533 ไม่ได้กำหนด                                        |

ผลการทดสอบคุณสมบัติทั่วไป ในเชิงกายภาพ และเชิงวิศวกรรมในด้านการรับกำลังต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ และด้านสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แล้วทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน พบว่าระบบผนังอาคารที่ทำมาจากเศษไม้ยางพาราและใบยางพารานั้น มีค่าความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 2.54 เมกะพาสคัล

ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.58-2533 เรื่องบล็อกไม้รับน้ำหนักประเภทไม้ควบคุมความชื้น ที่กำหนดค่าความต้านทานแรงอัดต้องไม่ต่ำกว่า 2.5 เมกะพาสคัล การดูดซึมน้ำคิดค่าเฉลี่ยผนังไม้ด้านนอกและแผ่นฉนวนไส้กลางเท่ากับร้อยละ 32.6 ซึ่งมีค่าสูงเนื่องจากเป็นวัสดุประเภทขึ้นไม้ (ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุชีวมวลประเภทไม้โตเร็ว หล้าเนเปียร์ ยอดอ้อยและใบอ้อยในการทำเป็นระบบผนังฉนวนความร้อน [9]) แต่สามารถใช้งานได้เนื่องจาก มอก.58-2533 เรื่องบล็อกไม้รับน้ำหนักประเภทไม้ควบคุมความชื้น ไม่ได้กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณาค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 12.73 ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดตามมาตรฐาน มอก.876-2547 และ มอก.966-2547 ที่กำหนดอยู่ในช่วงร้อยละ 4 ถึง 13 ส่วนค่าความต้านทานแรงดัดมีค่าไม่สูงเนื่องจากเป็นวัสดุเชิงประกอบเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นมีความหนาแน่นต่างกันมากยึดติดด้วยกาว (แต่อย่างไรก็ตามความต้านทานแรงดัดไม่ได้ถูกกำหนดไว้ใน การทดสอบตามมาตรฐาน มอก. ของวัสดุก่อผนัง) ส่วนผลทดสอบการทนไฟที่ระดับ 200 องศาเซลเซียส ได้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นปกติของวัสดุก่อสร้างที่เป็นไม้ซึ่งจัดอยู่ในประเภทวัสดุไม่ทนไฟ (โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบค่าต่าง ๆ ที่ไม่ได้กำหนดตามมาตรฐานเพิ่มเติมขึ้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบสำหรับใช้ในเชิงพาณิชย์ของผู้ประกอบการและเป็นองค์ความรู้ในการต่อยอดงานวิจัยเท่านั้นจึงไม่ส่งผลใด ๆ ต่อการใช้งานจริง) ส่วนคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของโครงการวิจัยนี้ คือ การเป็นฉนวนความร้อนซึ่งสามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน พบว่าระบบผนังอาคารจากเศษไม้ยางพารา ใบยางพารา และน้ำยางพาราของงานวิจัยนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.064 วัตต์/เมตร.องศาเซลวิน ซึ่งต่ำกว่าอิฐมวลเบาที่จำหน่ายในท้องตลาดมาก (ประมาณ 0.13 วัตต์/เมตร.องศาเซลวิน) และใกล้เคียงกับฉนวนความร้อนแบบโฟม (ประมาณ 0.017-0.024 วัตต์/เมตร.องศาเซลวิน) อีกทั้งระบบผนังอาคารจากงานวิจัยยังมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 353.78 กก./ลบ.ม. ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก ๆ (เป็นวัสดุมวลเบา) จึงมีคุณสมบัติเด่นด้านการเป็น

ฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นระบบผนังอาคารสำหรับก่อสร้างอาคารประหยัดพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4. สรุปผลการทดลอง

ต้นแบบผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคารที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนโดยใช้เศษไม้ยางพารา เศษใบยางพารา และน้ำยางพารา มีลักษณะเป็นบล็อกก่อผนังอาคารแบบแซนด์วิช ซึ่งผลการทดลองได้อัตราส่วนที่ดีที่สุดดังนี้

(1) ผนังด้านนอกหนา 1 ซม. เป็นแผ่นอัดเศษชิ้นไม้ยางพาราโดยใช้ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ร้อยละ 25 ใช้เศษไม้ยางพาราบดย่อยขนาดไม่เกิน 10 มม.

(2) ผนังชั้นในเป็นแผ่นอัดจากใบยางพารา ความหนา 13 ซม. (แผ่นละ 6.5 ซม. ประกบกัน 2 ชั้น) ใช้ใบยางพาราบดย่อยขนาดไม่เกิน 25 มม. ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักใบยางพารา

(3) เมื่อนำมาประกบติดกันได้เป็นผนังอาคาร ขนาด กว้าง 30 ซม. x ยาว 30 ซม. x หนา 15 ซม. นำไปทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มอก.58-2533 ผลการทดสอบพบว่า มีลักษณะทั่วไปผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนด โดยมีเหลี่ยมคม ไม่บิด ไม่หลุดร่อน ได้ฉนวนและความคลาดเคลื่อนของมิติไม่เกิน  $\pm 2$  มม. มีค่าความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 2.54 เมกะพาสคัล สามารถทนไฟที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสได้ 1 ชั่วโมง มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.064 วัตต์/ม.-องศาเซลเซียส ซึ่งมีความเป็นฉนวนความร้อนใกล้เคียงกับผนังฉนวนแบบโฟมแซนด์วิช และมีความเป็นฉนวนความร้อนดีกว่าผนังอาคารมวลเบาแบบปกติถึง 2 เท่าตัว จึงสามารถนำผลิตภัณฑ์ระบบผนังอาคารฉนวนความร้อนจากเศษไม้ยางพารา ใบยางพารา น้ำยางพารา ไปใช้ในงานกันห้องภายในอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากการยางแห่งประเทศไทย (กยท.) เรื่อง “การสร้างมูลค่าเพิ่มจากเศษไม้ยางพารา ใบยางพารา และน้ำยางพารา สำหรับทำเป็นระบบผนังอาคารที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี” ประจำปี พ.ศ.2563

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rubber Authority of Thailand. 20-year rubber strategy. Rubber Authority of Thailand, Ministry of Agriculture and Cooperatives; 2021. [sited 2022 May 27]. Available from : <https://www.forest.go.th/plantationexpert/wp-content/uploads/sites/122/2021/01>.
- [2] Rattananukul, P. Reduction and Utilization of Wood Waste in Thailand. Forest Research and Development Office, Royal Forest Department; 2017[sited 2022 May 27]. Available from: [http://110.170.148.135/forprod/forprod2017/Project\\_research/59/](http://110.170.148.135/forprod/forprod2017/Project_research/59/).
- [3] Khamput, P. Using teak waste and teak leaves as a heat insulation wall system. The 17<sup>th</sup> National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference; Nakhon Pathom, Thailand. 2020;3953-61. (in Thai)
- [4] Thai Industrial Standards Institute. Flat pressed particleboards (TIS.876-2547). Ministry of industry; 2004. (in Thai)
- [5] Thai Industrial Standards Institute. Medium density fiberboards (MDF) ( TIS. 966-2547) . Ministry of industry; 2004. (in Thai)
- [6] Thai Industrial Standards Institute. Standard for hollow non-load-bearing concrete masonry units (TIS.58-2533). Ministry of industry; 2004. (in Thai)

[7] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials (ASTM E 84-21a) ASTM International; West Conshohocken, PA; 2021.

[8] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus (ASTM C518-15,), ASTM International; West Conshohocken, PA; 2015.

[9] Khamput, P. Evaluation of properties of artificial wood building walls from fast growing wood chips. Thai Environmental Engineering Journal. 2018;32(3):21–8. (in Thai)

# การพัฒนาอุปกรณ์วัดชุดสายไฟ กรณีศึกษาโรงงานผลิตชุดสายไฟในรถยนต์

เฉลิมศักดิ์ ถาวรวัตร<sup>1</sup> และ ก้าวหน้า จงวัฒนารักษ์<sup>1\*</sup>  
chalersak\_t@rmutt.ac.th<sup>1</sup>, kaona.J@en.rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 28-Jan-2022 |
| Revised  | : 10-May-2022 |
| Accepted | : 19-May-2022 |

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอเพื่อศึกษาการวิเคราะห์ระบบการวัด ( Measurement System Analysis : MSA ) เป็นพื้นฐานของกลยุทธ์การปรับปรุงกระบวนการใด ๆ โดยเครื่องมือ QC ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งผ่านการทดลองในกระบวนการผลิตแบบเรียลไทม์ กับผลิตภัณฑ์ A ในบริษัทผลิตชุดสายไฟรถยนต์ ที่ดำเนินธุรกิจในสถานะการแข่งขันที่สูงขึ้น ซึ่งมีผลิตภัณฑ์เป็นชุดสายไฟในรถยนต์ที่มีลักษณะที่สามารถยืดหยุ่นได้มาก ซึ่งมีโอกาสการผิดพลาดจากระบบการวัดค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาค้นหาสาเหตุของปัจจัยที่มีผลกับระบบของการวัด ที่มีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง พารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ และความเสถียร ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนด้านคุณภาพ ทำให้ความเชื่อมั่นของลูกค้าต่อบริษัท โดยการศึกษาใช้ระบบการวิเคราะห์ระบบการวัด ( Measurement System Analysis : MSA ) แบบ Gage R&R ซึ่งบริษัทดังกล่าวนั้นก็จะถูกกดดัน ให้ผลิตสินค้าที่มีคุณภาพที่สูง ในต้นทุนที่ต่ำที่สุด จากผลการวิเคราะห์ผู้วิจัยจึงทำการเสนอแนวทางการปรับปรุงโดยการจัดทำบอร์ดการวัดชุดสายไฟรถยนต์ทดแทนการวัดด้วยอุปกรณ์การวัดแบบเดิม ทำให้พบว่า ค่า %P/T (Precision to Tolerance) หรือ %Tolerance (SV/Toler) จากมีค่าเท่ากับ 55.84% ลดลงเหลือ 28.54% แสดงว่าระบบการวัดมีความสามารถในการตรวจจับความผันแปรของกระบวนการได้ ช่วยในทำให้เกิดประสิทธิภาพของระบบการวัดที่ดีขึ้น

**คำสำคัญ:** ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ และความเสถียร การวิเคราะห์ระบบการวัด

# Development of Measurement Tools

## A Case Study Automotive Wire Harness Manufacturer.

Chalernsak Thavornwat<sup>1</sup> and Kaona Jongwuttanaruk<sup>1\*</sup>  
chalernsak\_t@rmutt.ac.th<sup>1</sup>, kaona.J@en.rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 28-Jan-2022 |
| Revised  | : 10-May-2022 |
| Accepted | : 19-May-2022 |

### Abstract

This research presented and studied the Measurement System Analysis: MSA as the foundation of a strategy for improvement of any process with extensively applied QC tool. The experiment was performed in a real-time production process with Product A in a case study of an electric wire manufacturer's company, operating its business in a highly competitive condition. It had products of auto-motive's electric wire set with high flexibility, which may be highly mistaken from the measurement system. Therefore, this research examined causes and factors affecting the measurement system, and contributing to change in any parameters including accuracy, precision and stability with effects on quality cost and confidence of customers with the company. Gage R&R Measurement System Analysis: MSA was employed in this study provided the company was pressured to manufacture a high-quality product with lowest cost. According to the analysis result, the researcher would like to propose a guideline for improvement by providing a measurement board for the auto-motive's electric wires instead of the traditional measurement method. The findings revealed that %P/T (Precision to Tolerance) %Tolerance (SV/Toler) decreased from 55.84% to 28.54%, indicating that the measurement system was applicable in detecting variance of the process, resulting in greater efficiency of the measurement system.

**Keywords:** Bias, Linearity, Stability, Measurement System Analysis

## 1. บทนำ

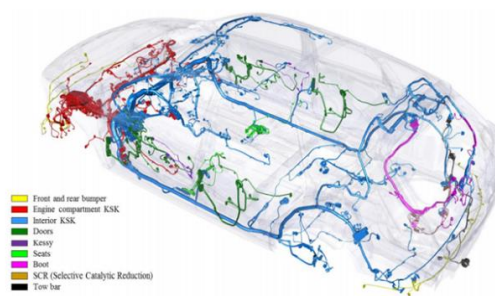
ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ชุดสายไฟในรถยนต์ (Automotive Wire Harness) มีบทบาทต่ออุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ และทำให้มีความต้องการเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อุตสาหกรรมประเภทนี้มีการขยายตัวเพื่อรองรับความต้องการที่สูงขึ้น และทำให้มีการแข่งขันในอุตสาหกรรมด้านนี้เพิ่มมากขึ้น [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านคุณภาพและราคา ซึ่งปัจจุบันลูกค้ามีความคาดหวังในด้านที่มีคุณภาพและราคาที่สมเหตุสมผล หากผู้ผลิตสามารถกระทำได้จะทำให้ได้เปรียบคู่แข่งอย่างมากในด้านราคา และภาพลักษณ์ของบริษัท

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis; MSA) ซึ่งเป็นหนึ่งของการข้อกำหนดของระบบ IATF16949 [2] เนื่องจากเป็น การศึกษาความผันแปรต่าง ๆ ระหว่างการตรวจวัด ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากอุปกรณ์ การวัด ทักษะ ของผู้วัด วิธีการวัด และสภาพแวดล้อมประกอบเข้าด้วยกัน และทำให้เกิดความเข้าใจถึงสาเหตุโดยธรรมชาติ (Common Causes) ของความผันแปรของระบบการวัดโดยอาศัยหลักการอนุมานเชิงสถิติ (Statistical Inference) เพื่อการเสนอแนะทางการแก้ไขในการลดความผันแปรต่อไป และผลิตภัณฑ์ชุดสายไฟในรถยนต์ที่ใช้ทำการซึ่งศึกษานั้นมีลักษณะมีความยืดหยุ่น ซึ่งงานวิจัยได้ทำการศึกษากับผลิตภัณฑ์ A การวัดก็จะมีแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่มีความทรงตัวเช่น งานฉีดพลาสติก หรืองานหล่อ เป็นต้น เพราะผลิตภัณฑ์ชุดสายไฟในรถยนต์ต้องมีการออกแบบให้ชุดสายไฟมีการลากผ่านตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่โครงของรถยนต์อย่างแม่นยำ [3] ตามรูปที่ 1 หากในกระบวนการผลิตไม่มีระบบการวัดที่มีประสิทธิภาพที่ดีแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ส่งให้ลูกค้าจะไม่สามารถใช้งานได้ และทำให้ลูกค้าไม่เกิดความพึงพอใจกับบริษัทเช่นกัน



รูปที่ 1 ตัวอย่างการออกแบบเส้นทางการเดินชุดสายไฟผ่านตามจุดที่กำหนด

การใช้ชุดสายไฟรถยนต์ เป็นการนำชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ข้อต่อชุดสายไฟ สายไฟ และอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ที่ป้องกันความคมของโลหะ ที่เป็นโครงสร้างของรถยนต์ไม่ได้ทำให้สายไฟเกิดการถลอก ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของไฟฟ้าลัดวงจรในรถยนต์ และชุดสายไฟรถยนต์ ยังช่วยให้การประกอบชุดสายไฟไม่เกิดการเชื่อมต่อที่ผิดพลาด และส่งผลให้ฟังก์ชันการทำงานนั้น ๆ ทำงานไม่ได้ เพราะการเชื่อมต่อโดยใช้ข้อต่อชุดสายไฟที่มีการระบุตัวที่เป็นคู่กัน โดยจะไม่สามารถนำเอาข้อต่อตัวอื่นมาใช้ได้ อีกส่วนหนึ่งการใช้ชุดสายไฟติดตั้งภายในรถยนต์ทำให้เกิดความเรียบร้อยตามรูปที่ 2 [4]



รูปที่ 2 Overall view of the wiring system [5]

Simion C .[6] ได้ทำการศึกษาแบบต่าง ๆ ในระบบการวัดและปัจจัยที่มีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความเป็นเส้นตรง ความเอนเอียง ความเสถียร ด้วยเทคนิค GR&R ช่วยในการศึกษาค่าประสิทธิภาพของระบบการวัด สำหรับงานวิจัยเป็นงานเชิงปริมาณ มีการผลการรวบรวมข้อมูลวิเคราะห์โดยใช้วิธี

วิเคราะห์ตามการวิเคราะห์ระบบการวัด จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าเครื่องมือในการวัดได้แก่ Vernier caliper และ Micro meter อยู่ในเกณฑ์ที่พอยอมรับได้ แต่ก็ควรทำการปรับปรุง หลังการปรับปรุงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดลดลงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สูงขึ้น พนักงานได้รับการฝึกอบรมที่เหมาะสม และมีการปรับปรุงการยศาสตร์ของพื้นที่ทำงานเพื่อหลีกเลี่ยงความผันแปรในระบบการวัดค่าเนื่องจากเกิดความเครียดแก่พนักงาน เช่น การใช้เก้าอี้ปรับระดับ หรือการใช้โต๊ะกับความสูงที่เหมาะสม และขยายพื้นที่ที่ใช้ในการวัด ซึ่งเป็นความผันแปรลดลง และ Yadav A. [7] ได้นำ Measurement System Analysis (MSA) เป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์หาความแปรปรวนในกระบวนการวัด ซึ่งแบ่งความแปรปรวนของกระบวนการออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ attribute และ variable การวิเคราะห์ได้นำซอฟต์แวร์ MINITAB พร้อมโมดูลที่เรียกว่า Attribute Agreement Analysis ซึ่งพบปัญหาของระบบการวัดมา จากข้อมูล attribute การวัดมักจะเป็นผลมาจากการตัดสินใจของมนุษย์ (การตรวจสอบด้วยสายตา) และทำการปรับปรุงกระบวนการตรวจสอบ โดยการฝึกอบรมผู้ปฏิบัติงานพัฒนาอุปกรณ์ซอฟต์แวร์ที่กำหนดตัวอย่างขอบเขต กำหนดมาตรฐาน และคู่มือการตรวจสอบ Sarkar A. และคณะ [8] ก็ได้ศึกษาเครื่องมือวัด และระบบการวัด ซึ่งเป็นพื้นฐานของกลยุทธ์การปรับปรุงกระบวนการใด ๆ เครื่องมือควบคุมคุณภาพที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น SPC ขึ้นอยู่กับข้อมูลตัวอย่างที่นำมาจากกระบวนการเพื่อติดตามความผันแปรของกระบวนการ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระบบการวัดด้วย วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ระบบการวัดคือเพื่อให้ระบบการวัดมีคุณสมบัติสำหรับใช้งานโดยการหาค่าความแม่นยำ ความละเอียด และความเสถียร เพื่อลดการมีปัจจัยที่ส่งผลกับความผันแปรของกระบวนการใช้เครื่องมือวัด และในส่วนของ การใช้เกณฑ์ตัดสินใจ Klaput P. และคณะ [9] นำเสนอระบบการวัดที่ไม่สามารถยอมรับได้หาก Gage R&R > 30% อย่างไรก็ตาม เมื่อผลิตภัณฑ์ยังคงอยู่ระหว่างการพัฒนาไม่สามารถทำซ้ำตามข้อกำหนดของลูกค้าได้ ประการที่สองผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจะได้รับการทดสอบอย่างสม่ำเสมอ ปัญหาไม่สามารถแยกกว่าปัญหาเกิดจาก

ไม่เป็นตามข้อกำหนดของลูกค้า หรือ ปัญหาจากระบบการวัด จึงถูกแทนที่ด้วยการเทียบผลิตภัณฑ์กับตัวอย่าง การนำตัวอย่างที่เทียบเท่ามาแทนการวัดด้วยเครื่องมือวัด มีความสม่ำเสมอและส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ Glavan LM. และคณะ [10] มีการนำ multiple box and whisker plot. มาใช้ในการตรวจสอบ โดยนำเสนอรายการปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) ในการผลิตทางโลหะ และสรุปวิธีการแก้ปัญหา จากการวัดจริงพบว่าความกว้างของช่วงความเชื่อมั่นที่เกิดขึ้นสำหรับค่ารวมของ gage repeatability and reproducibility (GRR) จะลดลง (และทำให้ความน่าเชื่อถือของค่า GRR เพิ่มขึ้น) ด้วยการเพิ่มจำนวนการทดลองการผลิต มากกว่าการเพิ่มของการ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ สมมติฐานพื้นฐานสำหรับการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ความแปรปรวนคงที่ และการเกิดขึ้นของค่าผิดปกติ)

การวัดงานถือเป็นการควบคุมกระบวนการเพื่อประกันคุณภาพ โดยจากนิยามของระบบการวัดจะพบว่า องค์ประกอบของระบบการวัดมีความไม่เท่ากันเสมอ จึงส่งผลให้เกิดความผันแปรในระบบการวัดเสมอด้วย ซึ่งความผันแปรที่เกิดขึ้นอาจทำให้กระบวนการไม่อยู่ในความควบคุม หรือทำให้กระบวนการไม่มีความสามารถได้ โดยความผันแปรในระบบการวัดถ้าเป็นไปด้วยสาเหตุธรรมชาติแล้ว ค่าความผันแปรจะอยู่ในลักษณะที่เสถียร และสามารถคาดเดาได้ [11] แต่ถ้าความผันแปรไม่ใช่สาเหตุธรรมชาติ ค่าความผันแปรนี้จะไม่เสถียรและไม่สามารถคาดการณ์ได้ผลกระทบของระบบการวัด

การวิเคราะห์ระบบการวัดคือ การศึกษาความผันแปรต่าง ๆ ระหว่างการตรวจวัด ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จาก อุปกรณ์ การวัด ทักษะของผู้วัด วิธีการวัด และสภาพแวดล้อม ประกอบเข้าด้วยกันโดยสามารถแยกความผันแปรของข้อมูลออกเป็น 2 ประเภทคือ ความผันแปรของตำแหน่งและความผันแปรของความกว้าง [12] โดยความผันแปรของตำแหน่ง ประกอบด้วย 3 คุณสมบัติคือ

1) ความเอนเอียงหรือไบอัส (Bias) คือ การเข้าใกล้ค่าเฉลี่ยจากการวัดหลาย ๆ ครั้ง เมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\%Bias = (Bias / (USL - USL)) \times 100\% \quad (1)$$

2) เชิงเส้นตรง (Linearity) คือ ความแตกต่างของค่าไปอีสถลตลอดช่วงการใช้งานของอุปกรณ์การวัดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\%Linearity = Linearity Index / (USL - USL) \times 100\% \quad (2)$$

3) ความเสถียร (Stability) คือ ความผันแปรทั้งหมดในการวัดที่ได้จากระบบการวัดหนึ่งโดยอาศัยชิ้นงาน หรือค่ามาตรฐานเดียวกันในการวัดคุณลักษณะประการหนึ่งตลอดช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$\%Stability = ((\bar{x} - \bar{x}) / (USL - USL)) \times 100\% \quad (3)$$

บริษัทผลิตชุดสายไฟกรณีศึกษา ที่ดำเนินธุรกิจ ในสภาวะการแข่งขันที่สูงขึ้น ซึ่งมีผลิตภัณฑ์เป็นชุดสายไฟในรถยนต์ที่มีลักษณะที่สามารถยืดหยุ่นได้มาก ซึ่งมีโอกาสการผิดพลาดจากระบบการวัดค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสาเหตุของปัจจัยที่ผลกับระบบของการวัด ที่มีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

พารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ และความเสถียร ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนด้านคุณภาพ ทำให้ความเชื่อมั่นของลูกค้าต่อบริษัท โดยการศึกษาใช้ระบบการวิเคราะห์ระบบการวัด ( Measurement System Analysis : MSA ) แบบ Gage R&R.

สำหรับความผันแปรของความกว้าง (Width Variation) หรือ ความเที่ยง (Precision) ของระบบการวัด คือ อิทธิพลโดยรวมของความสามารถในการแยกความแตกต่าง ความไว และความสามารถในการทำซ้ำ ตลอดช่วงการใช้งานของระบบการวัด โดยจำแนกออกเป็น 1) ความผันแปรภายใน (Repeatability) คือ ความผันแปรที่วัดโดยใช้พนักงานวัดคนเดียวอุปกรณ์เดียว วัดงานชิ้นเดียวกันซ้ำๆ หรืออาจเรียกว่าความผันแปรของอุปกรณ์ (Equipment Variation: EV) และ 2) ความผันแปรระหว่างเงื่อนไข (Reproducibility) คือความผันแปรที่แสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่าวัดจากการใช้อุปกรณ์การวัดเดียวกัน วัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน หรือหมายถึงความผันแปรระหว่างพนักงานวัด (Appraiser Variation; AV) ดังนั้นการที่จะศึกษาความผันแปรทั้งสองประเภทนั้นตารางที่ 1 จะต้องวิเคราะห์คุณสมบัติ 4 ชนิด คือ ความเอนเอียง เชิงเส้นตรง ความเสถียร และความเที่ยงจาก

ตารางที่ 1 ข้อมูลของความยาวชุดสายไฟ มีพิกัดความเผื่ออยู่ที่ 10 มิลลิเมตร

| ลำดับ | พนักงานคนที่ 1 |               |               | พนักงานคนที่ 2 |               |               | พนักงานคนที่ 3 |               |               |
|-------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|       | ตัวอย่างที่ 1  | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | ตัวอย่างที่ 1  | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | ตัวอย่างที่ 1  | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 |
| 1     | 113            | 113           | 115           | 115            | 117           | 117           | 113            | 115           | 112           |
| 2     | 171            | 172           | 171           | 173            | 175           | 173           | 171            | 170           | 170           |
| 3     | 173            | 173           | 175           | 176            | 174           | 174           | 173            | 173           | 174           |
| 4     | 247            | 247           | 250           | 251            | 252           | 251           | 247            | 249           | 247           |
| 5     | 189            | 183           | 189           | 190            | 192           | 192           | 189            | 187           | 188           |
| 6     | 303            | 298           | 303           | 304            | 305           | 302           | 304            | 304           | 303           |
| 7     | 122            | 124           | 125           | 125            | 123           | 122           | 127            | 129           | 127           |
| 8     | 121            | 121           | 120           | 122            | 121           | 122           | 123            | 121           | 124           |
| 9     | 116            | 116           | 114           | 112            | 113           | 115           | 116            | 116           | 114           |
| 10    | 141            | 142           | 141           | 139            | 140           | 141           | 141            | 143           | 142           |

## 2.วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การศึกษาขั้นตอนกระบวนการวัดชุดสายไฟสายไฟในรถยนต์

พนักงานบริษัทผลิตชุดสายไฟกรณีศึกษา มีพนักงานในตำแหน่งดังกล่าวมีจำนวน 3

คนจะเซ็นชื่อเพื่อการสอบกลับหากมีการเครมจากลูกค้า ในการวิเคราะห์ GR&R Crossed สำหรับข้อมูลแบบแปรผัน (Variable Data) โดยพนักงานแต่ละคน ต้องตรวจงานซ้ำ 3 ครั้งต่อคน

ตารางที่ 2 Two-Way ANOVA Table with Interaction

| Source            | DF | SS     | MS      | F       | P     |
|-------------------|----|--------|---------|---------|-------|
| Parts             | 9  | 320618 | 35624.3 | 24474.7 | 0.000 |
| Operators         | 2  | 1      | 0.3     | 0.2     | 0.792 |
| Parts * Operators | 18 | 26     | 1.5     | 0.4     | 0.991 |
| Repeatability     | 60 | 244    | 4.1     |         |       |
| Total             | 89 | 320889 |         |         |       |

$\alpha$  to remove interaction term = 0.05

การวิเคราะห์ความแปรปรวนตามตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดจากการพิจารณาค่า P-Value ของค่า Parts มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวอย่างของตัวอย่างทั้ง 10 ตัวอย่าง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วน Operators มีค่า P-Value เท่ากับ 0.792 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าพนักงานแต่ละคนไม่มีความแตกต่างในการวัด และ Parts \* Operators

ตารางที่ 4 Gage Evaluation

| Source          | StdDev (SD) | Study Var | %Study Var | %Tolerance |
|-----------------|-------------|-----------|------------|------------|
| Total Gage R&R  | 1.8612      | 11.167    | 2.96       | 55.84      |
| Repeatability   | 1.8612      | 11.167    | 2.96       | 55.84      |
| Reproducibility | 0.0000      | 0.000     | 0.00       | 0.00       |
| Operators       | 0.0000      | 0.000     | 0.00       | 0.00       |
| Part-To-Part    | 62.9116     | 377.469   | 99.96      | 1887.35    |
| Total Variation | 62.9391     | 377.635   | 100.00     | 1888.17    |

Number of Distinct Categories = 47

(อันตรกิริยาระหว่าง Parts และ Operators) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.991 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าการตรวจตัวอย่างแต่ละตัวกับพนักงานงานทั้ง 3 คน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 Gage R&R (Variance Components)

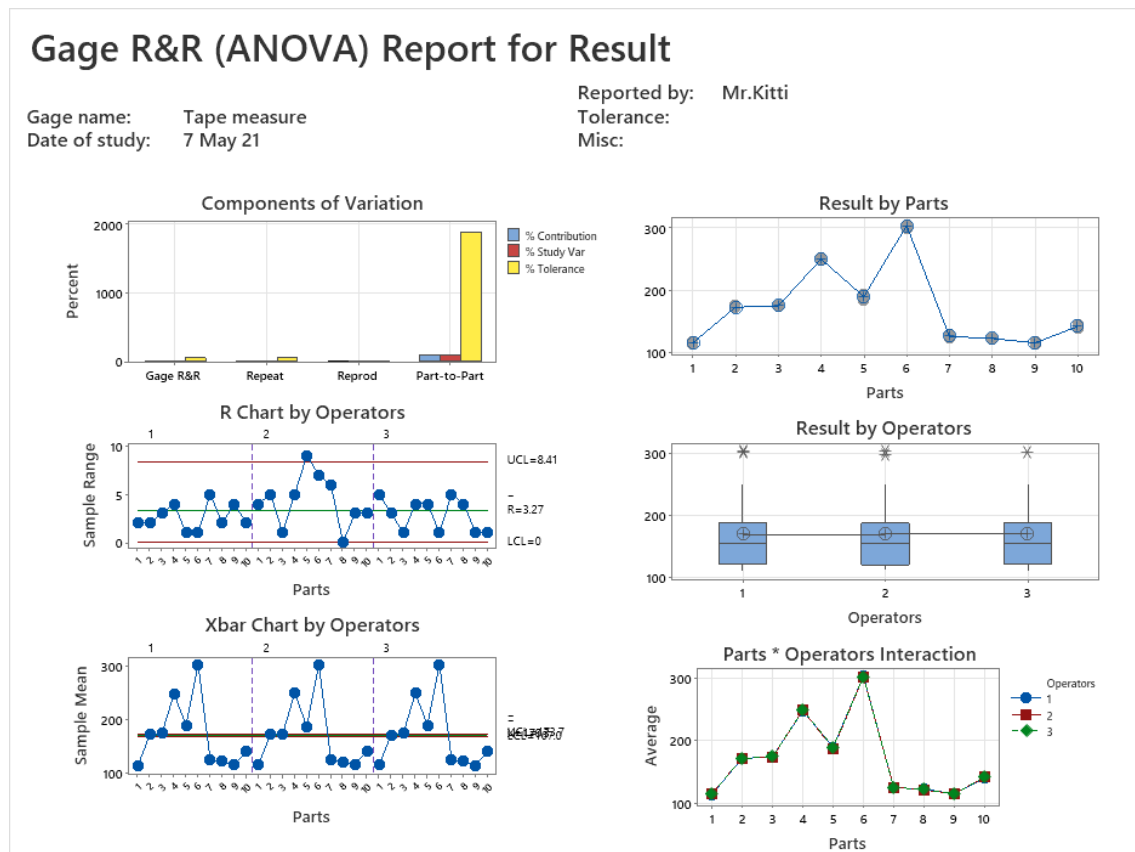
| Source          | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|---------|----------------------------|
| Total Gage R&R  | 3.46    | 0.09                       |
| Repeatability   | 3.46    | 0.09                       |
| Reproducibility | 0.00    | 0.00                       |
| Operators       | 0.00    | 0.00                       |
| Part-To-Part    | 3957.87 | 99.91                      |
| Total Variation | 3961.33 | 100.00                     |

Process tolerance = 20

จาก ตารางที่ 3 % Contribution (of VarComp) ที่แสดงสัดส่วนความแปรปรวนในแต่ละส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนทั้งหมด (Total Variation) เช่น ความแปรปรวนของ Total Gage R&R มีค่าเท่ากับ 0.09% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยทั่วไปกำหนดเกณฑ์การพิจารณาค่า % Contribution (of VarComp) [13]  
 0% - 2% อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้  
 2% - 7.7% อาจจะยอมรับได้  
 มากกว่า 7.7% ไม่สามารถยอมรับได้

จากตารางที่ 4 ค่า %Study Var (%SV) คือ การเปรียบเทียบความผันแปรของระบบการวัดแต่ละส่วน เทียบกับความแปรผันทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 22.749 และ ค่า % P/T (Precision to Tolerance) หรือ %Tolerance (SV/Toler) คือ การเปรียบเทียบความ

แปรของระบบการวัดแต่ละส่วนเทียบค่าความเผื่อของขนาด มีค่าเท่ากับ 55.84% ไม่สามารถยอมรับได้ ซึ่งค่าที่ยอมรับได้ต้องน้อยกว่า 30% [14] และโดยทั่วไปกำหนดเกณฑ์การพิจารณา NDC ต้องมีค่าตั้งแต่ 5 ขึ้นไป จึงจะแสดงได้ว่าเครื่องมือวัดเหมาะสมในการใช้งาน [15]



รูปที่ 3 Gage R&R (ANOVA) Report for Result

จากรูปที่ 3 ค่า Components of Variance กราฟแท่งแสดงค่าความแปรปรวนในแต่ละส่วน แท่ง Gage R&R แสดงค่า %SV และ % P/T และ R Control Chart by Operator แสดงความสามารถในการจำแนกความแตกต่างของชิ้นงาน และความผันแปรในตัวพนักงานแต่ละคน ซึ่งพนักงานคนที่ 2 มีการตรวจออกจากภายใต้เส้นควบคุมมา 1 จุด และ Xbar Control Chart by Operators แสดงค่าเฉลี่ยในการวัดแต่ละชิ้นงานของแต่ละพนักงาน โดยจุดบนกราฟอยู่นอกเส้นควบคุมมากกว่า 50% จึงจะแสดงว่าระบบการวัดสามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างชิ้นงานได้ ในส่วน Width by Parts แสดงค่าที่พนักงานทุกคนวัดได้ในชิ้นงานเดียวกัน แต่ละจุดควรซ้อนทับกัน จึงจะแสดง

ว่าพนักงานทั้ง 3 คน วัดชิ้นงานเดียวกันและได้ค่าใกล้เคียงกันที่สุด Width by Operators บ็อกซ์พล็อตแสดงความความผันแปรของการวัดแต่ละคน ซึ่งบ็อกซ์พล็อตของแต่ละคนไม่แตกต่างกัน Part\*Operator Interaction แสดงอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับพนักงาน โดยเส้นที่ กราฟความซ้อนทับกัน หากเส้นกราฟมีการตัดกันแสดงว่ามีอิทธิพลร่วมเกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานกับพนักงาน นั่นคือพนักงานมีผลการวัดที่แตกต่างกัน

## 2.2 การดำเนินการปรับปรุง

เนื่องจากชุดสายไฟรถยนต์มีความยืดหยุ่นและให้ตัวได้ เพราะสายไฟจะถูกสอดเข้าไปในท่อที่ยืดหยุ่น และสามารถดัดงอได้ดังรูปที่ 4 การวัดความยาวของชุดสายไฟเดิมใช้วิธีการใช้ตลับเมตรหาบ ชุดสายไฟรถยนต์ในแนวตรง บนโต๊ะพื้นเรียบ ซึ่งพนักงานทั้งสามคนใช้วิธีการวัดเดียวกันทั้งหมด จากการสำรวจการทำงานพบว่าการวัดลักษณะดังกล่าวทำให้พนักงานเกิดความเมื่อยล้า และอาศัยทักษะส่วนบุคคลสูงมากดังรูปที่ 5 และในกรณีที่มีการทดแทนตำแหน่งงานในตำแหน่งการวัด จะเกิดผลกระทบทันที



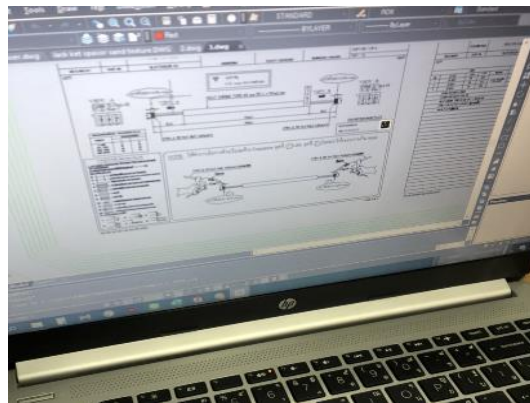
รูปที่ 4 ลักษณะชุดสายไฟรถยนต์



รูปที่ 5 ลักษณะของการวัดความยาวของชุดสายไฟรถยนต์

แนวทางการปรับปรุงการวัดชุดสายไฟรถยนต์โดยการทำบอร์ดการวัดชุดสายไฟ ซึ่งหัวข้อต่อจะถูกสื่อในตำแหน่งที่กำหนด และจุดแต่ละจุดในการวัดจะถูกวาดด้วยสเกล 1 : 1 จากการวาดแบบและตรวจความ

ถูกต้องจากแบบที่เป็นไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ตาม รูปที่ 6 ช่วยทำให้สามารถจำลองการจัดเรียงสายให้มีความเหมาะสมก่อนปรี้น



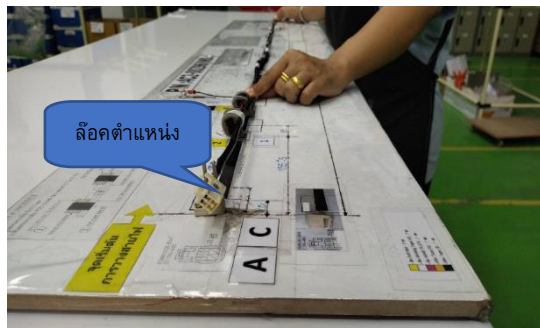
รูปที่ 6 ลักษณะวาดแบบสายไฟด้วยโปรแกรมเขียนแบบ

หลังจากนั้นนำไฟล์ที่สมบูรณ์ไปทำการปรี้นตามสเกล 1:1 ด้วยเครื่องปรี้นขนาดใหญ่ หน้ากระดาษหน้ากว้าง 24 นิ้ว ความเร็วในการพิมพ์ 35 วินาที ต่อแผ่น A1 - เครื่องพิมพ์ 4 สี Cyan, Magenta, Yellow, Black ขนาดกระดาษที่ใช้งานคือ A1 แบบม้วน ยาว 50 เมตร และ A3 แบบม้วน ยาว 50 เมตร ซึ่งจะไม่มีย่อยต่อ ซึ่งการต่ออาจจะทำให้ระยะความยาวเกิดความคลาดเคลื่อนตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 เครื่องปรี้น HP DESIGNJET T230-24-in

จากการทำบอร์ดช่วยในการวัดทำให้พนักงานวัดสามารถวัดได้เร็วมากขึ้นตามรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลักษณะของการวัดความยาวของชุดสายไฟรถยนต์ด้วยใช้บอร์ดวัดชิ้นงาน

รวมถึงการจัดทำคู่มือเรื่องการทำบอร์ดวัดระยะสายไฟ และในการปรับปรุงโดยการทำบอร์ดวัดความยาวของสายไฟรถยนต์ เข้ามาแทนการวัดด้วยตลับเมตร ถึงแม้จะมีความสะดวกเร็วในการทำงาน และทำให้การวัดมีข้อผิดพลาดจากการวัดน้อยลงแล้ว จำเป็นต้องทำการประเมินคุณสมบัติความเอนเอียงหรือไบอัส (Bias) และเชิงเส้นตรง (Linearity) ของบอร์ดวัดชุดสายไฟรถยนต์ว่ามีในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ จึงได้เลือกงานมาสเตอร์มา 5 ชิ้น โดยมีค่าอ้างอิงเท่ากับ 110, 210, 550, 870 และ 1100 จากตารางที่ 5

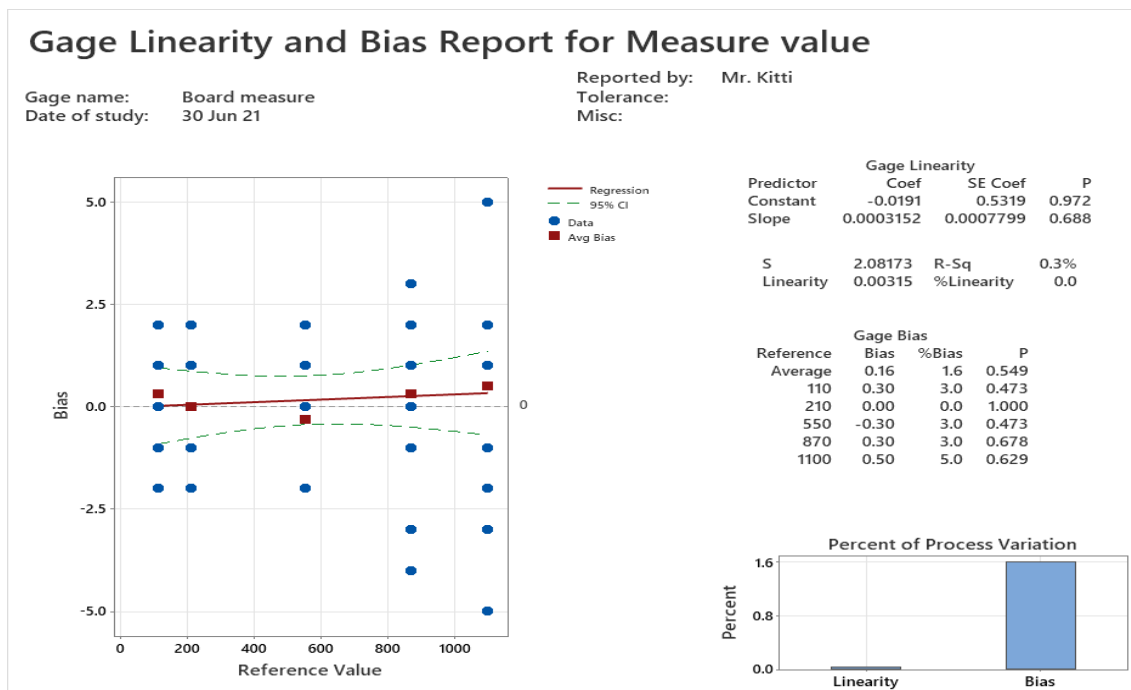
ตารางที่ 5 ผลการสอบเทียบบอร์ดวัดชุดสายไฟรถยนต์

| ครั้งที่ | ค่าอ้างอิงชิ้นงาน Master |     |     |     |      |
|----------|--------------------------|-----|-----|-----|------|
|          | 110                      | 210 | 550 | 870 | 1100 |
| 1        | 111                      | 210 | 548 | 866 | 1102 |
| 2        | 108                      | 210 | 548 | 873 | 1105 |
| 3        | 112                      | 212 | 548 | 867 | 1098 |
| 4        | 110                      | 208 | 550 | 871 | 1101 |
| 5        | 109                      | 212 | 550 | 872 | 1095 |
| 6        | 110                      | 211 | 548 | 869 | 1102 |
| 7        | 111                      | 210 | 552 | 870 | 1097 |
| 8        | 110                      | 210 | 551 | 870 | 1101 |
| 9        | 112                      | 208 | 552 | 873 | 1105 |
| 10       | 110                      | 209 | 550 | 872 | 1099 |

ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติความเอนเอียงหรือไบอัส (Bias) และเชิงเส้นตรง (Linearity) ของบอร์ดวัดชุดสายไฟรถยนต์โดยพบว่าค่าความเอนเอียงหรือไบอัส (Bias) เท่ากับ 1.6% และคุณสมบัติความเชิง

เส้นตรง (Linearity) เท่ากับ 0 ตามรูปที่ 6 ซึ่งทั้งสองค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ตามเกณฑ์ดังนี้ [16]

|          |                         |
|----------|-------------------------|
| < 5%     | อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ |
| 5% - 10% | อาจจะยอมรับได้          |
| > 10%    | ไม่สามารถยอมรับได้      |



รูปที่ 6 Gage Linearity and Bias Report for Measure value

### 3.ผลการทดลองและอภิปราย

ระบบการวิเคราะห์การวัดผลจากการวิเคราะห์ระบบการวัดพบว่าพนักงานวัดความยาวของสายไฟรถยนต์นั้น มีค่า % P/T (Precision to Tolerance) หรือ %Tolerance (SV/Toler) คือ การเปรียบเทียบความแปรของระบบการวัดแต่ละส่วน เทียบค่าความเผื่อของขนาด มีค่าเท่ากับ 55.84% ไม่สามารถยอมรับได้ เนื่องจากเกณฑ์ที่ยอมรับได้ต้องน้อยกว่า 30% เนื่องจากแสดงว่าระบบการวัดมีความสามารถในการตรวจจับความผันแปรของกระบวนการได้ จากการปรับปรุงกระบวนการวัดเพื่อลดความเมื่อล่าในการวัด เครื่องมือวัดที่ไม่เหมาะสม สเกลไม่ชัดเจน จึงมีแนวคิดการปรับเปลี่ยนวิธีการตรวจใหม่ โดยการทำบอร์ดการวัดชุดสายไฟ ซึ่งหัวข้อต่อไปจะถูกเลือกในตำแหน่งที่กำหนด และจุดแต่ละจุดในการวัดจะถูกวาดด้วยสเกล 1 : 1

โดยการเป็นอุปกรณ์ในการวัดที่บริษัทจัดทำขึ้นเองนั้น อาจมีผลเรื่องการทำบอร์ดการวัดชุดสายไฟนั้นจำเป็นต้องทำการควบคุมความผิดของการวัดจากบอร์ดการวัดชุดสายไฟ ซึ่งแนวทางที่นำเสนอทางบริษัทจำเป็นต้องมีกระบวนการอนุมัติบอร์ดการวัดชุด

สายไฟ โดยการจากวิเคราะห์คุณสมบัติความเอนเอียงหรือไบอัส (Bias) และเชิงเส้นตรง (Linearity) ของบอร์ดวัดชุดสายไฟ ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงจะนำมาใช้ในกระบวนการวัด จากการปรับปรุงกระบวนการวัดแล้วนั้น ทำการวิเคราะห์ระบบการวัดอีกครั้งพบว่า ค่า %P/T (Precision to Tolerance) หรือ % Tolerance (SV/Toler) จากมีค่าเท่ากับ 55.84% ลดลงเหลือ 28.54% แสดงว่าระบบการวัดมีความสามารถในการตรวจจับความผันแปรของกระบวนการได้

### 4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

### 5 เอกสารอ้างอิง

[1] Huong Giang Nguyen, Marlene Kuhn, Jörg Franke. Manufacturing automation for automotive wiring harnesses. Procedia CIRP. 2021;97:379-84.

- [2] Pop LD, Elod NJPT. Improving a measuring system according to ISO/TS 16949. Elsevier. 2015;19:1023-30
- [3] Van Den Berg T, La Rocca G, van Tooren M, editors. Automatic flattening of three-dimensional wiring harnesses for manufacturing. Proceedings of the 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Brisbane, Australia; 2012.
- [4] Palomba I, Gualtieri L, Rojas R, Rauch E, Vidoni R, Ghedin AJR. Mechatronic Re-Design of a Manual Assembly Workstation into a Collaborative One for Wire Harness Assemblies. Robotics. 2021;10(1):43.
- [ 4 ] Rius Rueda A. A novel optimization methodology of modular wiring harnesses in modern vehicles: weight reduction and safe operation. 2017
- [ 5 ] Jain A. A case study on measurement system analysis (MSA) at a pump company. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2017;4(5):1567-71.
- [6] Simion C, editor Evaluation of an attributive measurement system in the automotive industry. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2016: IOP Publishing.
- [ 7 ] Yadav A. Measurement systems analysis and a study of anova method. International Journal of Research in Engineering and Technology 2016;05(02):123-7
- [ 8 ] Sarkar A, Mukhopadhyay AR, Ghosh SK. Measurement system analysis for implementing design for Six Sigma. International Journal of Productivity Quality Management. 2014;14(3):373-86.
- [9] Klaput P, Vykydal D, Tošenovský F, Halfarová P, Plura JJM. Problems of application of measurement system analysis (MSA) in metallurgical production. Metalurgija. 2016;55(3):535-7
- [10] Glavan LM. Understanding process performance measurement systems. business systems research. 2011;2(2):1-56.
- [11] Pai F-Y, Yeh T-M, Hung Y-HJS. Analysis on accuracy of bias, linearity and stability of measurement system in ball screw processes by simulation. Sustainability. 2015;7(11):15464-86.
- [12] Cepova L, Kovacikova A, Cep R, Klaput P, Mizera O. Measurement system analyses–Gauge repeatability and reproducibility methods. Measurement Science Review. 2018;18(1):20-7.
- [13] Abdelgadir M, Gerling C, Dobson J. Variable data measurement systems analysis: advances in gage bias and linearity referencing and acceptability. International Journal of Metrology Quality Engineering. 2020;11:16.
- [14] Gerger A. Conducting a gage R & R study: an application example in automotive industry. Journal of Economics and Social Research Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi. 2021;8(15):1-17.
- [15] Measurement System Analysis 4th edition, AIAG, Figurel-E 3: Impact of Number of Distinct Categories (NDC) of the Process Distribution on Control and Analysis Activities. p. 47.
- [16] Yu J, editor Research on bias and linearity analysis of MEMS measurement system based on minitab. Advanced Materials Research; 2012: Trans Tech Publ.



# การศึกษารูปแบบการใช้ไม้ยางพาราสำหรับเป็นหมอนรองเสาเข็มคอนกรีต

วินัย อวยพรประเสริฐ<sup>1\*</sup> และ กิจเกษม คล้ายกรุด<sup>1</sup>  
owinai@yahoo.com<sup>1\*</sup>, kitkasem.kb@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 26-Sep-2021 |
| Revised  | : 10-Jun-2022 |
| Accepted | : 14-Jun-2022 |

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบการใช้ไม้ยางพาราสำหรับใช้เป็นหมอนรองเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการศึกษา ทฤษฎีความน่าเชื่อถือเชิงโครงสร้าง การวิเคราะห์ค่าสถิติของไม้ยางพารา กำลังอัดตั้งฉากเสี้ยนของไม้ยางพารา การหาหน่วยแรงอัดตั้งฉากเสี้ยนของไม้ยางพารา การหารูปแบบการกองเก็บเสาเข็มคอนกรีตขนาดต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า ไม้ยางพาราที่ถูกแปรรูปจากส่วนกิ่งไม้ และปีกไม้ จำนวน 50 ท่อน มีความยาวเฉลี่ย 1.146 ม. และขนาดเฉลี่ย 7.0 ซม. ตัวอย่างไม้ยางพาราขนาด 5x5x15 ซม. จำนวน 245 ชิ้น มีกำลังอัดตั้งฉากเสี้ยนเฉลี่ย เท่ากับ 105.2 กก./ตร.ซม. สัมประสิทธิ์การแปรผัน เท่ากับ 0.327 รูปแบบการแจกแจงที่กระชับที่สุดได้แก่ แบบแกมมา จากขั้นตอนวิธีที่เสนอโดยอาศัยการทดลองเชิงสุ่มแบบมอนติคาร์โลร่วมกับเทคนิคการชักตัวอย่างสำคัญ ภายใต้เงื่อนไขความน่าจะเป็นที่ยอมรับได้สำหรับโครงสร้างชั่วคราวไม่เกิน  $10^{-2}$  และความคลาดเคลื่อนมาตรฐานไม่เกิน 1% จะได้หน่วยแรงตั้งฉากเสี้ยนของไม้ยางพาราที่ยอมให้ เท่ากับ 41.6 กก./ตร.ซม. ผลที่ได้มีค่าสูงเป็น 1.65 เท่า ของกรณีที่เหมาะสมให้มีรูปแบบการแจกแจงปกติ ค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์จำนวนชั้น และจำนวนไม้หมอนที่เหมาะสมสำหรับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง หน้าตัดรูปตัวไอ(I) และสี่เหลี่ยมจัตุรัส(□) จำนวนชั้นสูงสุดของหน้าตัดเสาเข็มแต่ละชนิด ที่รองรับด้วยไม้หมอนยางพาราที่ฐานรองรับแบบ 2 จุด ที่ระยะ 0.207 ของความยาวเสาเข็ม ดังสรุปต่อไปนี้ คือ I22 และ □22 จำนวน 24 ชั้น I26 และ □26 จำนวน 21 ชั้น I30 และ □30 จำนวน 18 ชั้น I35 และ □35 จำนวน 16 ชั้น I40 และ □40 จำนวน 14 ชั้น

**คำสำคัญ:** ไม้ยางพารา หมอนรองเสาเข็ม เสาเข็มคอนกรีต หมอนรองไม้ยางพารา

# A Study of the Use of Para Wood as Sleepers for Concrete Piles

Winai Ouypornprasert<sup>1\*</sup> and Kitkasem Khaikrut<sup>1</sup>  
owinai@yahoo.com<sup>1\*</sup>, kitkasem.kb@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, College of Engineering, Rangsit University

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 26-Sep-2021 |
| Revised  | : 10-Jun-2022 |
| Accepted | : 14-Jun-2022 |

## Abstract

The propose of this research was to find the most effective pattern of using Para wood as sleepers for prestressed concrete piles were studied structural reliability theory, statistical analysis of Para wood sleepers, statistical analysis for compressive strength perpendicular to grain, proposed algorithms for finding compressive stress perpendicular to grain and finding suitable patterns for stacking of prestressed concrete piles. Results of study showed that fifty Para wood sleepers of the mean square section of 7.0 cm in width and 1.146 m in length were sawn from tree branches and tree slabs. Two hundred forty-five Para wood specimens of square section of 5 cm in width and 15 cm in length were tested. The mean compressive strength perpendicular to grain was 105.2 ksc. The best fitted distribution was gamma. Monte-Carlo simulations together with importance sampling technique under the conditions of the acceptable failure probability for temporary structure less than  $10^{-2}$  and standard error not more than 1% yielded the allowable compressive stress perpendicular to grain of 41.6 kg/cm<sup>2</sup> which is 1.65 times higher than that of the case of normal distribution assumption. This allowable stress could be used to analyze the suitable numbers of layers and the numbers of Para wood sleepers at supports of any type of prestressed concrete piles. The maximum layers for I and square concrete piles supported by Para wood sleepers at 0.207 of the length from both ends were summarized as in the following: I22&□22 - 24 layers, I26&□26 - 21 layers, I30&□30 - 18 layers, I35&□35 - 16 layers, I40&□40 - 14 layers.

**Keywords:** Para Wood, Sleepers, Concrete Piles, Para Wood Sleepers

## 1. บทนำ

โรงงานผลิตเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงส่วนใหญ่ใช้ไม้หมอนรองเสาเข็มในคลังสินค้าที่แปรรูปจากไม้ยางพาราเป็นหลัก เนื่องจากหาได้ง่าย และมีราคาถูก แต่โรงงานผลิตเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงส่วนใหญ่ไม่มีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไม้ยางพารา เมื่อนำไปใช้งานทำให้ไม้หมอนเกิดความเสียหายเนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกเกินขนาด ส่งผลให้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่อยู่ในคลังสินค้าเกิดความเสียหายเป็นจำนวนมาก เช่น เสาเข็มเกิดรอยร้าวแตกหัก และร่วงหล่นจากที่กองเก็บ เป็นต้น ส่งผลให้ไม่สามารถนำเสาเข็มเหล่านั้นมาใช้ได้ อีกทั้งยังก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งาน และความเสียหายต่อทรัพย์สินของบริษัท ในอดีตได้มีผู้นำไม้ยางพารามาใช้เป็นองค์อาคารในโครงสร้างไม้ โดยออกแบบตามมาตรฐาน วสท. [1] [2] จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการนำไม้ยางพารามาใช้เป็นไม้หมอนรองเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงอย่างเหมาะสม โดยนำตัวอย่างไม้ยางพารามาทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างปลอดภัยสำหรับหน้าตัดและความยาวต่างๆ ของหน้าตัดเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

## 2. ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาในโรงงานผลิตเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงบริเวณภาคกลางตะวันตก ที่มีแท่นผลิตจำนวน 7 แท่น หน้าตัดเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง หน้าตัดรูปตัวโอ (I) ขนาด I22, I26, I30, I35, I40 และหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมตัน (□) ขนาด □22, □26, □30, □35, □40 ที่ความยาว 9-14 เมตร [3] ไม้ยางพาราที่นำมาใช้ ถูกแปรรูปจากส่วนกิ่งและส่วนปีกไม้ของลำต้นไม้ยางพารา โดยมีขนาดประมาณ  $0.07 \times 0.07 \times 1.2$  ม. ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดของไม้ในแนวตั้งฉากเส้นไม้ (Compression Test of Wood Perpendicular to Grain) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D143 [4] การวิเคราะห์เชิงสถิติเบื้องต้นของขนาดของไม้และการทดสอบภาวะเข้าสู่ปฏิกิริยาของกำลังอัดในแนวตั้งฉากเส้นของไม้ยางพารา โดยมีระดับความเชื่อมั่น (Level

of Confidence) เท่ากับร้อยละ 95 [5,6] หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติมาใช้ในการหาหน่วยแรงอัดตั้งฉากเส้นที่ยอมให้ใช้ได้ของไม้หมอนยางพารา ด้วยขั้นตอนวิธีที่เสนอโดยอาศัยทฤษฎีความน่าเชื่อถือเชิงโครงสร้าง เพื่อเป็นแนวทางในการนำไม้หมอนยางพารามาใช้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

## 3. ทฤษฎีความน่าเชื่อถือเชิงโครงสร้าง

ความน่าเชื่อถือเชิงโครงสร้าง (Structural Reliability) หมายถึง ความน่าจะเป็นที่ความต้านทานของระบบโครงสร้างจะมีค่ามากกว่าผลของน้ำหนักบรรทุกตลอดอายุการใช้งาน ในการปฏิบัติมักนิยมนำเสนอในรูปของพจน์เติมเต็ม (Complementary Term) ได้แก่ ความน่าจะเป็นวิบัติ (Failure Probability) ของระบบโครงสร้าง  $p_f$  ซึ่งก็คือ ความน่าจะเป็นที่ความต้านทานของระบบโครงสร้าง (R) จะมีค่าไม่มากกว่าผลของน้ำหนักบรรทุก (S) ตลอดอายุการใช้งาน  $p_f$  อาจเขียนในรูปอย่างย่อ ดังแสดงในสมการที่ 1

$$p_f = \int_{\forall x \in D_f} f_x(x) dx \quad (1)$$

เมื่อ  $X$  เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรสุ่ม จำนวน  $n$  ตัว ได้แก่  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$   
 $f_x(x)$  เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Density Function) ของตัวแปรสุ่ม  $X$

และ  $D_f$  คือ บริเวณวิบัติ (Failure Domain) ที่ค่าของตัวแปรสุ่ม  $x$  มีผลทำให้ระบบโครงสร้างเกิดการวิบัติ ซึ่งกำหนดโดยสภาวะขีดจำกัด (Limit State)

ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นสำหรับตัวแปรสุ่ม  $X_i$  ได้แก่  $f_{X_i}(x_i)$  สามารถหาได้จากการทดสอบภาวะเข้าสู่ปฏิกิริยาของชุดข้อมูล ในทางปฏิบัติอาจใช้ซอฟต์แวร์การทดสอบภาวะเข้าสู่ปฏิกิริยาสำหรับการแจกแจงต่อเนื่องที่ใช้กันอย่างสามัญในด้าน

วิศวกรรมโยธา (CESTTEST, Civil Engineering Statistical TEST) เพื่อใช้วิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการแจกแจงที่กระชับได้ดีที่สุดกับข้อมูลทางวิศวกรรม เนื่องจากรูปแบบการแจกแจงมีผลและไวต่อการพิจารณาตัวคุณความปลอดภัยเป็นอย่างยิ่ง การทดสอบภาวะเข้าสู่ปสนิทในซอฟต์แวร์ CESTTEST พิจารณาจากรูปแบบการแจกแจงทั้งหมด 11 ชนิด ได้แก่ การแจกแจงปกติ (Normal Distribution) การแจกแจงเอกรูป (Uniform Distribution) การแจกแจงเลขชี้กำลังแบบเลื่อน (Shifted Exponential Distribution) การแจกแจงเลย์รีฟแบบเลื่อน (Shifted Rayleigh Distribution) การแจกแจงค่าต่ำสุดกุ่มเบล (Gumbel Type I Smallest Distribution) การแจกแจงค่าสูงสุดกุ่มเบล (Gumbel Type I Largest Distribution) การแจกแจงลอการปกติ (Lognormal Distribution) การแจกแจงแกมมา (Gamma Distribution) การแจกแจงเฟรเชต์ (Fréchet Type II Largest Distribution) และการแจกแจงบีตา (Beta Distribution) การทดสอบภาวะเข้าสู่ปสนิทมี 2 แบบ ได้แก่ การทดสอบไคกำลังสอง (Chi-Square Test) และ การทดสอบ K-S (Kolmogorov-Smirnov Test) [6]

โดยการศึกษาี้ คณะผู้เขียนใช้การทดสอบไคกำลังสอง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

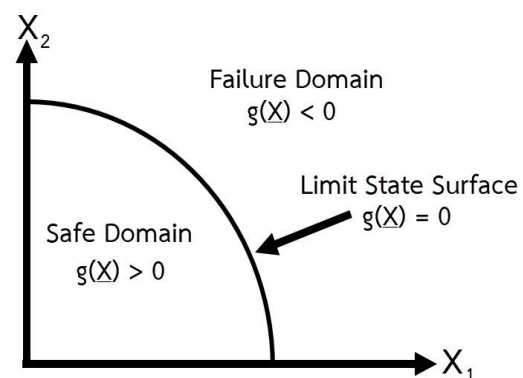
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad (2)$$

เมื่อ  $\chi^2$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนไคกำลังสอง  
 $n_i$  เป็นความถี่ของข้อมูลจริงสำหรับอันตรภาคชั้น  $i$   
 $k$  คือ จำนวนชั้นของค่าตัวอย่าง  
 และ  $e_i$  เป็นความถี่ของข้อมูลที่ได้จากรูปแบบการแจกแจงที่พิจารณาสำหรับอันตรภาคชั้น  $i$

สมภาวะขีดจำกัดอาจถูกกำหนดในรูปแบบของฟังก์ชันสมภาวะขีดจำกัด (Limit State Function - Z) ได้ดังสมการที่ 3

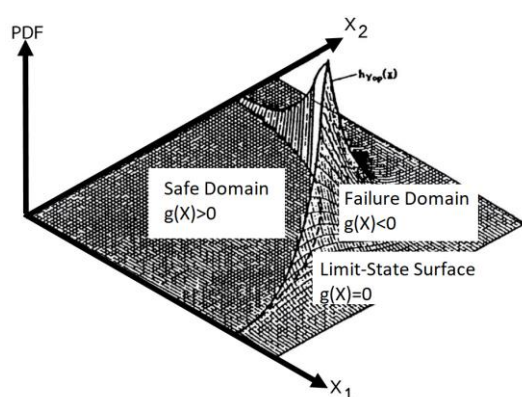
$$Z = g(X) \quad (3)$$

Z แสดงถึงสมภาวะการวิบัติ สำหรับ  $g(X) \leq 0$  และสมภาวะปลอดภัย สำหรับ  $g(X) > 0$  ดังนั้น บริเวณปลอดภัย (Safe Domain -  $D_s$ ) และบริเวณวิบัติ ( $D_f$ ) จะถูกแบ่งแยกออกจากกันด้วยพื้นผิวสมภาวะขีดจำกัด (Limit State Surface) ซึ่งถูกนิยามจาก  $g(X) = 0$  ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 บริเวณวิบัติและบริเวณปลอดภัยในกรณีตัวแปรสุ่มสองตัวแปร

จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่า  $p_f$  คือ การหาปริพันธ์ของฟังก์ชันความน่าจะเป็นร่วมบนบริเวณวิบัติสำหรับกรณีตัวแปรสุ่ม 2 ตัว  $p_f$  ก็คือ ปริมาตรใต้ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นร่วมบนบริเวณวิบัตินั้นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปริมาตรภายใต้ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นร่วมและขอบเขตของการวิบัติ [Ouyornprasert W.,1989]

การหาค่า  $p_f$  จากสมการที่ 1 โดยตรง ทำได้ค่อนข้างยาก จึงอาจเปลี่ยนสมการที่ 1 ให้อยู่ในรูปสมการที่ 4

$$p_f = \int_{\forall \underline{x}} 1(g(\underline{x})) f_{\underline{x}}(\underline{x}) d\underline{x} \quad (4)$$

เมื่อ  $1(g(\underline{x}))$  เป็น ฟังก์ชัน ดัชนี (Indicator Function) ของ  $g(\underline{x})$  กำหนดให้  
 $1(g(\underline{x})) = 1$ ; สำหรับ  $\underline{x} \in D_f$   
 และ  $1(g(\underline{x})) = 0$ ; สำหรับกรณีอื่นๆ

จากสมการที่ 4 เราอาจสามารถหาคำตอบได้จากการทดลองเชิงสุ่มแบบมอนติคาร์โล (Monte-Carlo Simulation) ดังสมการที่ 5

$$p_f \cong \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 1[g(\underline{x}_j)] \quad (5)$$

เมื่อ  $N$  เป็นจำนวนการทดลองเชิงสุ่ม

ฟังก์ชันดัชนีมีลักษณะเป็นแบบทวินาม ดังนั้นความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) จึงอยู่ในรูปของสมการที่ 6

$$S_{IE} = \sqrt{\frac{1}{N} p_f (1 - p_f)} \quad (6)$$

สำหรับงานด้านความปลอดภัย  $p_f$  มักมีค่าต่ำมาก เพื่อให้ได้ร้อยละความคลาดเคลื่อนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (เช่น 1%) จำนวนการทดลองเชิงสุ่มจึงต้องมีค่ามาก เทคนิคหนึ่งที่ยอมรับใช้ลดจำนวนการทดลองเชิงสุ่ม ได้แก่ เทคนิคการชักตัวอย่างสำคัญ (Importance Sampling) หากกำหนดให้ ฟังก์ชันความหนาแน่นการชักตัวอย่างสำคัญ  $h_{\underline{y}}(\underline{x})$  อาจหา  $p_f$  จากสมการที่ 7

$$p_f = \int_{\forall \underline{x}} 1[g(\underline{x})] \frac{f_{\underline{x}}(\underline{x})}{h_{\underline{y}}(\underline{x})} h_{\underline{y}}(\underline{x}) d\underline{x} \quad (7)$$

ดังนั้น การทดลองเชิงสุ่มแบบมอนติคาร์โลร่วมกับเทคนิคการชักตัวอย่างสำคัญ  $p_f$  อาจประมาณได้จากสมการที่ 8

$$p_f \cong \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 1[g(\underline{x}_j)] \frac{f_{\underline{x}}(\underline{x}_j)}{h_{\underline{y}}(\underline{x}_j)} \quad (8)$$

ความแปรปรวน  $S_f^2$  อาจประมาณได้จากสมการที่ 9

$$S_f^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ 1[g(\underline{x}_j)] \frac{f_{\underline{x}}(\underline{x}_j)}{h_{\underline{y}}(\underline{x}_j)} \right]^2 - \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 1[g(\underline{x}_j)] \frac{f_{\underline{x}}(\underline{x}_j)}{h_{\underline{y}}(\underline{x}_j)} \right]^2 \quad (9)$$

โดยที่ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน  $S_{IE}$  สามารถหาได้จาก

$$S_{IE} = \frac{100}{p_f} \times \sqrt{\frac{S_f^2}{N}} \quad (10)$$

รูปแบบการแจกแจงของฟังก์ชันการชักตัวอย่างสำคัญ จะมีผลต่อจำนวนการทดลองเชิงสุ่มเป็นอย่างมาก ในทางปฏิบัติอาจเลือกใช้รูปแบบการแจกแจงแบบปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับฟังก์ชันการแจกแจงดั้งเดิม และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเป็น 1.5-2.5 เท่าของฟังก์ชันการแจกแจงแบบดั้งเดิม

สำหรับกรณีตัวแปรสุ่มสองตัว ฟังก์ชันสภาวะขีดจำกัด อาจเขียนในรูปอย่างง่าย ดังสมการที่ 11

$$Z = g(\underline{X}) = R - S \quad (11)$$

เมื่อ  $R$  คือ ความต้านทานของโครงสร้าง  
 และ  $S$  คือ ผลของน้ำหนักบรรทุก

หากทั้ง  $R$  และ  $S$  มีรูปแบบการแจกแจงแบบปกติ รูปแบบการแจกแจงของ  $g(\underline{X})$  จะเป็นแบบปกติด้วย และ  $p_f$  จะหาได้จากสมการที่ 12 ถึง 16

$$\mu_g = \mu_R - \mu_s \quad (12)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_s^2} \quad (13)$$

$$p_f = \Phi\left(Z_g = \frac{0 - \mu_g}{\sigma_g}\right) = \Phi(-\beta) \quad (14)$$

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (15)$$

เมื่อ  $\mu_g$  คือ ค่าเฉลี่ยของสถานะขีดจำกัด  
 $\sigma_g$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสถานะขีดจำกัด  
 $\Phi(.)$  คือ ฟังก์ชันการแจกแจงของตัวแปรสุ่มแบบปกติมาตรฐาน  
 และ  $\beta$  คือ ดัชนีความปลอดภัย (Safety Index)

อัตราส่วนความปลอดภัยสู่ศูนย์กลาง [7]  
 (Central Safety Factor, FS) นิยามจากสมการที่ 16

$$FS = \frac{\mu_s}{\mu_R} \quad (16)$$

สำหรับกรณีทั้ง R และ S มีรูปแบบการแจกแจงแบบปกติทั้งคู่ FS อาจหาได้จากสมการที่ 17

$$FS - 1 = \beta \cdot \sqrt{FS^2 \cdot \Omega_R^2 + \Omega_s^2} \quad (17)$$

$$\Omega_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} \quad (18)$$

$$\Omega_s = \frac{\sigma_s}{\mu_s} \quad (19)$$

เมื่อ  $\mu_R$ ,  $\sigma_R$  และ  $\Omega_R$  คือ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์การแปรผันของความต้านทานของโครงสร้างตามลำดับ

และ  $\mu_s$ ,  $\sigma_s$  และ  $\Omega_s$  คือ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์การแปรผันของผลของน้ำหนักบรรทุก ตามลำดับ [8]

#### 4. การวิเคราะห์การใช้ไม้ยางพาราเป็นหมอนรองเสาเข็ม

##### 4.1 คุณสมบัติเชิงเรขาคณิตของไม้ยางพารา

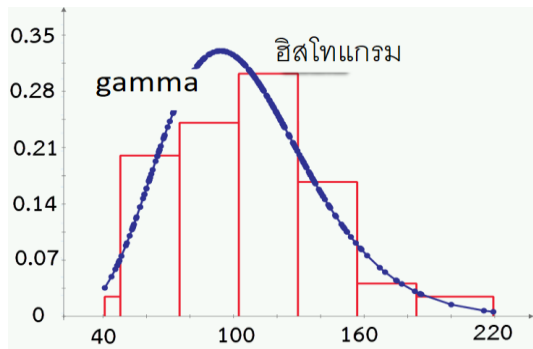
คุณสมบัติทางสถิติสำหรับข้อมูลทางวิศวกรรมของไม้ยางพารา สำหรับความยาวของไม้จำนวน 50 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.146 ม. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.019 ม. และสัมประสิทธิ์การแปรผัน เท่ากับ 0.017 ในขณะที่ ความกว้างของไม้จำนวน 100 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 7.0 ซม. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.1 ซม. และสัมประสิทธิ์การแปรผัน เท่ากับ 0.015 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของตัวแปรมิติ มีค่าค่อนข้างต่ำ ในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น (p) จึงอาจกำหนดให้เป็นปริมาณเชิงกำหนด (Deterministic Quantity)

##### 4.2 กำลังอัดในแนวตั้งฉากกับเสี้ยนของไม้

###### ยางพารา

กำลังอัดในแนวตั้งฉากกับเสี้ยนของไม้ยางพารา ( $F_{c\perp}$ ) หาได้จาก การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D143 หรือ มยผ. 12211-51 [4] โดยใช้ตัวอย่างไม้ขนาด 5×5×15 ซม. จำนวน 245 ตัวอย่าง ได้ค่าเฉลี่ย เท่ากับ 105.2 กก./ตร.ซม. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 34.4 กก./ตร.ซม. และสัมประสิทธิ์การแปรผัน เท่ากับ 0.327

เมื่อนำข้อมูลมาหารูปแบบการแจกแจงที่เหมาะสมที่สุด (Best Fitted Distribution) โดยใช้ซอฟต์แวร์ CESTTEST พบว่ารูปแบบการแจกแจงที่ดีที่สุดได้แก่ การแจกแจงแกมมา ด้วยระดับความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่า 95% สำหรับการทดสอบได้กำลังสองสามารถแสดงในรูปแบบที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบการแจกแจงที่กระชับดีที่สุดสำหรับการทดสอบโคกกำลังสองของกำลังอัดในแนวตั้งฉากเสี้ยน

รูปตัวอย่างการวิบัติของตัวอย่างไม้ยางพาราที่ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของไม้ในแนวตั้งฉากเสี้ยนดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างไม้ยางพารา

ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นแกมมา มีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ 20

$$f_x(x) = \frac{v(vx)^{k-1} e^{-vx}}{\Gamma(k)}; x \geq 0 \quad (20)$$

เมื่อ  $v$  และ  $k$  เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape Parameter) ในขณะที่  $\Gamma(\cdot)$  เป็นค่าของฟังก์ชันแกมมา มีรูปดังแสดงในสมการที่ 21

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} x^{k-1} e^{-x} dx; k > 0 \quad (21)$$

พารามิเตอร์รูปร่างทั้งสอง มีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ 22 และ 23

$$\mu = \frac{k}{v} \quad (22)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{k}}{v} \quad (23)$$

เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์รูปร่าง  $k$  จากสมการที่ 24

$$k = \frac{1}{\Omega^2} \quad (24)$$

เมื่อ  $\Omega$  คือ สัมประสิทธิ์การแปรผัน

และสามารถหาค่าพารามิเตอร์รูปร่าง  $v$  จากสมการที่ 25

$$v = \frac{k}{\mu} \quad (25)$$

## 5. ผลการศึกษาและการวิจารณ์ผล

### 5.1 ขั้นตอนในการหาค่าหน่วยแรงที่ยอมให้

การหาค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress) เริ่มต้นจากการทราบค่าที่ได้จากการทดสอบและวิเคราะห์ทางสถิติของไม้ยางพารา ค่าจากการทดสอบมีดังนี้  $\mu_R = 105.2$  กก./ตร.ซม.  $\sigma_R = 34.4$  กก./ตร.ซม. และ  $\Omega_R = 0.327$  รูปแบบการแจกแจงที่กระชับที่สุด คือ แกมมา

กำหนดให้หน่วยแรงอัดที่กระทำต่อฐานรองรับมีรูปแบบการแจกแจงแบบปกติ  $\Omega_s = 0.05$  ตามข้อกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของขนาดเสาเข็มที่ยอมให้ตาม มอก. 396/2549

สำหรับโครงสร้างชั่วคราว อาจกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นที่ยอมรับได้  $p_f$  อยู่ที่ระดับ เท่ากับ  $10^{-2}$  [9]

สภาวะขีดจำกัดของกำลังอัดตั้งฉากเสี้ยนของไม้ยางพารา จะอยู่ในรูปของสมการที่ 26

$$g(x) = F_{c\perp} - f_{sp} \quad (26)$$

เมื่อ  $F_{c\perp}$  คือ กำลังอัดไม้ยางพาราตั้งฉากเส้น (R)

และ  $f_{sp}$  คือ หน่วยแรงอัดที่กระทำต่อฐานรองรับ สำหรับจุดรองรับแบบ 2 ฐาน (S) หาได้จาก สมการที่ 27

$$f_{sp} = 0.5 \cdot \left( \frac{w_p}{b_s \cdot b_p} \right) \cdot n_l \quad (27)$$

เมื่อ  $w_p$  คือ น้ำหนักของเสาเข็มต่อตัน

$b_s$  คือ ความกว้างของไม้หมอนยางพารา

$b_p$  คือ ขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม

และ  $n_l$  คือ จำนวนชั้น (layer) ในแนวตั้งของ เสาเข็ม

โดยมีเงื่อนไขเพื่อคำนวณหน่วยแรงอัดที่ ฐานรองรับแต่ละฐานดังสมการที่ 28-29

$$(b_p + h_s)(n_l) \leq h_{limit} \quad (28)$$

เมื่อ  $h_{limit}$  คือ ความสูงขีดจำกัดของกองเสาเข็ม ทั้งนี้ระดับหลังเสาเข็มชั้นบนสุดจะต้องไม่มาก เกินกว่าความสูงที่โครงสามารถทำงานได้ อย่างสะดวกและปลอดภัย

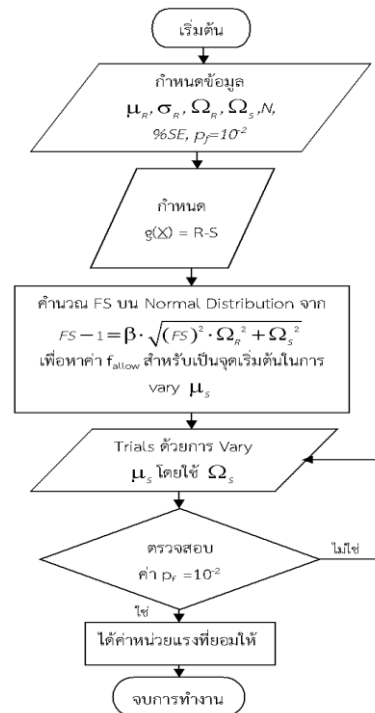
และ  $h_s = b_s$  คือ ความสูงของไม้หมอนยางพารา

ความกว้างของแท่นกองเสาเข็ม จะต้อง สอดคล้องกับสมการที่ 29

$$(b_p \cdot n_h) \leq l_s \quad (29)$$

เมื่อ  $l_s$  คือ ความยาวของไม้หมอนยางพารา

และ  $n_h$  คือ จำนวนเสาเข็มในแนวราบ



รูปที่ 5 ขั้นตอนการหาหน่วยแรงที่ยอมให้

แผนภาพขั้นตอนที่เสนอใช้วิธีลองผิดลองถูก จนกระทั่งได้ค่าหน่วยแรงอัดตั้งฉากเส้นที่ยอมให้ได้ของ ไม้ยางพารา เท่ากับ 41.6 กก./ตร.ซม. (กำหนดจากค่า  $f_{sp}$  ที่ทำให้  $p_f$  เท่ากับ  $10^{-2}$ ) โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อน มาตรฐานน้อยกว่า 1% สำหรับการทดลองเชิงสุ่มแบบ มอนติคาร์โลร่วมกับการชักตัวอย่างสำคัญจำนวน 400,000 ครั้ง ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่ได้จะนำไปใช้หา จำนวนไม้หมอนยางพาราสำหรับรองเสาเข็มต่อไป จาก ข้อมูลของไม้ยางพาราและผลของน้ำหนักบรรทุกทุกที่ กำหนดให้ หากข้อมูลทั้งสองมีรูปแบบการแจกแจงแบบ ปกติทั้งคู่ จากการแก้สมการไม่เชิงเส้นดังแสดงในสมการ ที่ 17 อัตราส่วนความปลอดภัยสู่ศูนย์กลาง (FS) จะมีค่า เท่ากับ 4.188 และมีค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ใช้ได้ เท่ากับ 25.1 กก./ตร.ซม. แต่เนื่องจากค่ากำลังอัดตั้งฉาก เส้นของไม้ยางพารามีรูปแบบการแจกแจงแบบไม่ปกติ ได้แก่ การแจกแจงแบบแกมมา

ให้สังเกตว่าค่าหน่วยแรงอัดตั้งฉากเส้นของไม้ ยางพาราสำหรับรูปแบบการแจกแจงแกมมา มีค่าสูงเป็น 1.65 เท่า ของกรณีที่เหมาะสมให้รูปแบบการแจกแจงเป็น แบบปกติ ด้วยเหตุนี้ การวิเคราะห์ทางสถิติอย่างละเอียด จึงสามารถประหยัดค่าไม้หมอนลงได้อย่างมาก

## 5.2 ผลการวิเคราะห์หารูปแบบการวางหมอนไม้ยางพาราที่เหมาะสม

จากการสำรวจการกองเก็บเสาเข็มแบบดั้งเดิมที่ไม่ได้คำนวณดังแสดงในตารางที่ 1 และการกองเก็บเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเดิม ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าลักษณะการกองเก็บแบบดั้งเดิมส่งผลให้เสาเข็มเกิดความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 6

ในปัจจุบัน จากการสำรวจการกองเก็บเสาเข็มตามแท่นผลิตหรือแท่นกองเก็บหลักแบบดั้งเดิมดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ความสูงของระดับหลังเสาเข็มชั้นบนสุดที่กองเก็บ มีค่าค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้การเคลื่อนย้ายเสาเข็มเป็นไปด้วยความลำบากและอันตราย ยิ่งไปกว่านั้น รูปแบบการรองไม้หมอนที่ฐานรองรับเสาเข็ม ยังไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนและตายตัวอีกด้วย ส่งผลให้เสาเข็มเกิดความเสียหายเป็นจำนวนมาก เนื่องจากไม้หมอนเกิดการยุบตัวมากเกินไป (10 มม.) และทำให้เกิดรอยแตกร้าวตามเสาเข็มเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความเสียหายของเสาเข็ม

จากตารางที่ 4 เมื่อเพิ่มจำนวนไม้หมอนยางพาราตามที่เสนอ ทำให้ไม้หมอนสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย และส่งผลให้สามารถกองเสาเข็มได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และสามารถช่วยให้การบริหารแท่นกองเก็บเสาเข็มเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังลดความเสียหายของเสาเข็มและไม้รองเสาเข็มจากการกองเก็บได้อีกด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการคำนวณจำนวนไม้หมอนสำหรับแต่ละชั้นได้อย่างเหมาะสม

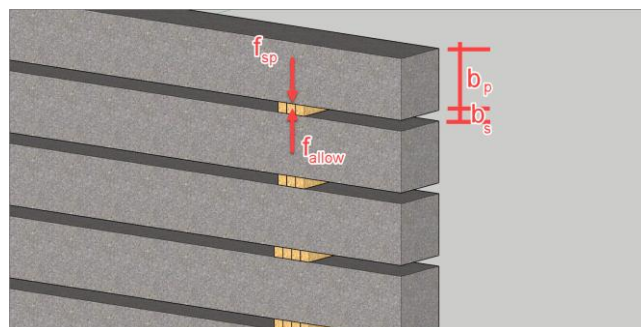
จากน้ำหนักเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงต่อต้านดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อนำมาใช้คำนวณการกองเก็บเสาเข็มแบบดั้งเดิม ดังแสดงในตารางที่ 2 จะพบว่าหน่วยแรงที่ฐานรองรับทุกชั้นมีค่าเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ใช้ได้ ด้วยเหตุนี้ จึงเสนอจำนวนชั้นกองเก็บเสาเข็มที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3 ตัวอย่างการคำนวณจำนวนไม้หมอนยางพาราของเสาเข็มชนิดต่างๆ ชั้นที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 1 น้ำหนักของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงต่อต้น

| ชนิดเสาเข็ม | น้ำหนัก<br>เสาเข็มต่อ<br>เมตร (กก./ม.) | ความยาวเสาเข็ม (ม.)        |      |      |      |      |      |
|-------------|----------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
|             |                                        | 9                          | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   |
|             |                                        | น้ำหนักเสาเข็มต่อต้น (กก.) |      |      |      |      |      |
| I22         | 93                                     | 837                        | 930  | 1023 | 1116 | 1209 | 1302 |
| □22         | 116                                    | 1044                       | 1160 | 1276 | 1392 | 1508 | 1624 |
| I26         | 117                                    | 1053                       | 1170 | 1287 | 1404 | 1521 | 1638 |
| □26         | 162                                    | 1458                       | 1620 | 1782 | 1944 | 2106 | 2268 |
| I30         | 159                                    | 1431                       | 1590 | 1749 | 1908 | 2067 | 2226 |
| □30         | 216                                    | 1944                       | 2160 | 2376 | 2592 | 2808 | 3024 |
| I35         | 211                                    | 1899                       | 2110 | 2321 | 2532 | 2743 | 2954 |
| □35         | 294                                    | 2646                       | 2940 | 3234 | 3528 | 3822 | 4116 |
| I40         | 298                                    | 2682                       | 2980 | 3278 | 3576 | 3874 | 4172 |
| □40         | 384                                    | 3456                       | 3840 | 4224 | 4608 | 4992 | 5376 |

ตารางที่ 2 ผลจากการคำนวณการกองเก็บแบบดั้งเดิม

| ชนิดเสาเข็ม | $b_s$<br>(ซม.) | $b_p$<br>(ซม.) | หน่วยแรงที่ยอมให้<br>(กก./ตร.ซม.) | ความยาวเสาเข็ม (ม.)                          |     |     |     |     |     |
|-------------|----------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|             |                |                |                                   | 9                                            | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  |
|             |                |                |                                   | หน่วยแรงอัดที่กระทำต่อฐานรองรับ (กก./ตร.ซม.) |     |     |     |     |     |
| I22         | 5              | 22             | 41.6                              | 136                                          | 151 | 166 | 181 | 196 | 211 |
| □22         |                | 22             |                                   | 169                                          | 188 | 207 | 226 | 245 | 264 |
| I26         |                | 26             |                                   | 116                                          | 129 | 141 | 154 | 167 | 180 |
| □26         |                | 26             |                                   | 160                                          | 178 | 196 | 214 | 231 | 249 |
| I30         |                | 30             |                                   | 89                                           | 98  | 108 | 118 | 128 | 138 |
| □30         |                | 30             |                                   | 120                                          | 134 | 147 | 160 | 174 | 187 |
| I35         |                | 35             |                                   | 85                                           | 95  | 104 | 114 | 123 | 133 |
| □35         |                | 35             |                                   | 119                                          | 132 | 145 | 158 | 172 | 185 |
| I40         |                | 40             |                                   | 105                                          | 117 | 129 | 140 | 152 | 164 |
| □40         |                | 40             |                                   | 136                                          | 151 | 166 | 181 | 196 | 211 |



รูปที่ 7 ลักษณะการกองเสาเข็ม

ตารางที่ 3 จำนวนชั้นการกองเก็บเสาเข็มที่เสนอ

| ชนิดเสาเข็ม | จำนวนชั้น | ความสูง (ม.) |
|-------------|-----------|--------------|
| I22         | 24        | 7.0          |
| □22         | 24        | 7.0          |
| I26         | 21        | 7.0          |
| □26         | 21        | 7.0          |
| I30         | 18        | 6.9          |
| □30         | 18        | 6.9          |
| I35         | 16        | 7.0          |
| □35         | 16        | 7.0          |
| I40         | 14        | 6.8          |
| □40         | 14        | 6.8          |

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการคำนวณจำนวนไม้หมอน

ยางพาราของเสาเข็มชนิดต่างๆ ชั้นที่ 1

| ชนิดเสาเข็ม | ความยาวเสาเข็ม (ม.)     |    |    |    |    |    |
|-------------|-------------------------|----|----|----|----|----|
|             | 9                       | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|             | ชั้นที่ 1 (ชั้นล่างสุด) |    |    |    |    |    |
| I22         | 2                       | 2  | 2  | 3  | 3  | 3  |
| □22         | 2                       | 3  | 3  | 3  | 3  | 4  |
| I26         | 2                       | 2  | 2  | 2  | 3  | 3  |
| □26         | 3                       | 3  | 3  | 3  | 3  | 4  |
| I30         | 2                       | 2  | 2  | 2  | 3  | 3  |
| □30         | 2                       | 3  | 3  | 3  | 3  | 4  |
| I35         | 2                       | 2  | 2  | 2  | 3  | 3  |
| □35         | 3                       | 3  | 3  | 3  | 4  | 4  |
| I40         | 2                       | 2  | 2  | 3  | 3  | 3  |
| □40         | 3                       | 3  | 3  | 3  | 4  | 4  |

จากน้ำหนักเสาเข็มที่แสดงในตารางที่ 1 เมื่อนำมาใช้คำนวณการเสริมไม้ยางพารารองเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ขนาด □40 ความยาว 14 ม. จำนวน 14 ชั้น จะได้หน่วยแรงที่ฐานรองรับทุกชั้นไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ( $f_{allow}$ ) รวมถึงให้จำนวนท่อนไม้ยางพาราที่ฐานรองรับแต่ละจุด ที่สามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย ดังสรุปในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการคำนวณจำนวนไม้หมอน

ยางพาราของเสาเข็ม □40 ความยาว 14 ม.

| ลำดับชั้นกอง | n (ชั้น) | $f_{sp}$ (ksc) |
|--------------|----------|----------------|
| 14           | 1        | 10.000         |
| 13           | 1        | 19.000         |
| 12           | 1        | 29.000         |
| 11           | 1        | 38.000         |
| 10           | 2        | 24.000         |
| 9            | 2        | 29.000         |
| 8            | 2        | 33.500         |
| 7            | 2        | 38.500         |
| 6            | 3        | 28.667         |
| 5            | 3        | 32.000         |
| 4            | 3        | 35.333         |
| 3            | 3        | 38.333         |
| 2            | 4        | 31.250         |
| 1            | 4        | 33.500         |

## 6. สรุปผลการศึกษา

1) ความยาวของหมอนรองไม้ยางพาราจำนวน 50 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.146 ม. และสัมประสิทธิ์การแปรผัน เท่ากับ 0.017 ในขณะที่ ความกว้างของหมอนรองไม้ยางพารา จำนวน 100 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 7.0 ซม. และสัมประสิทธิ์การแปรผัน เท่ากับ 0.015 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของสองปริมาณนี้มีค่าต่ำจึงอาจกำหนดเป็นปริมาณเชิงกำหนด

2) การทดสอบกำลังอัดในแนวตั้งฉากกับเส้นใยของไม้ ยางพารา จำนวน 245 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 105.2 กก./ตร.ซม. และสัมประสิทธิ์การแปรผัน เท่ากับ 0.327 จากการทดสอบภาวะเข้ารูปสนิท จะได้รูปแบบการแจกแจงที่กระชับที่สุดเป็นแบบแกมมา โดยมีระดับความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่า 95%

3) จากขั้นตอนวิธีการหาหน่วยแรงใช้งานที่เสนอ โดยใช้การทดลองเชิงสุ่มแบบมอนติคาร์โลร่วมกับเทคนิคการชักตัวอย่างสำคัญ โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นที่ที่ยอมรับได้สำหรับโครงสร้างชั่วคราวมีค่าไม่เกิน  $10^{-2}$

และความคลาดเคลื่อนมาตรฐานไม่เกิน 1% จะได้หน่วยแรงดึงฉากเสี้ยนของไม้ยางพาราที่ยอมให้ได้ เท่ากับ 41.6 กก./ตร.ซม. ให้สังเกตว่าค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ใช้ได้นี้ มีค่าสูงเป็น 1.65 เท่า ของกรณีที่เหมาะสมให้มีรูปแบบการແຈກແຈງเป็นแบบปกติ

4) ทราบจำนวนชั้นสูงสุดของที่กองเก็บสำหรับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงชนิดต่างๆ ได้แก่ I, □22 จำนวน 24 ชั้น I, □26 จำนวน 21 ชั้น I, □30 จำนวน 18 ชั้น I, □35 จำนวน 16 ชั้น I, □40 จำนวน 14 ชั้น

5) ทราบจำนวนท่อนไม้หมอนยางพาราที่ฐานรองรับแบบ 2 จุด แต่ละฐาน สำหรับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงทุกขนาดหน้าตัด โดยสามารถคำนวณจำนวนการเสริมไม้หมอนได้ดังรูปแบบที่เสนอ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ouypornprasert W, Boonyachut S. Engineering properties of softwood in Thailand for structural design. Research Institute of Rangsit University. 2000. (in Thai)
- [2] Ouypornprasert W, Boonyachut S. Usage of softwood in Thailand as structural components in wood structures. Research Institute of Rangsit University. 2000. (in Thai)
- [3] Ministry of Industry. Precast prestressed concrete piles (TIS.396-2549). 2006. (in Thai)
- [4] Building Control Bureau. Standard test method for compression perpendicular to grain (DPT.1 2 2 1 -5 1 ). Department of Public Works and Town & Country Planning. 2008. (in Thai)

[5] Ouypornprasert W. Calibration of building design for Thailand based on structural reliability theory. Structural design base on probability theory: EIT. 2001. (in Thai)

[6] Ouypornprasert W. Structural design base on probability theory: EIT. 2001. (in Thai)

[7] Ouypornprasert W. Accurate structural reliability analysis utilizing efficient integration method [dissertation]. Innsbruck: Institute of Engineering Mechanics University of Innsbruck; 1989.

[8] Ouypornprasert W, Jirayut T. Algorithms for determination of allowable holding loads for nails and screws based on probability theory. International Journal of Materials & Structural Reliability. 2003;2:89-99.

[9] Vereecken E, Botte W, Droogné D, Caspeele R. Reliability-based calibration of partial factors for the design of temporary scaffold structures. Maintenance Management Life-Cycle Design and Performance Structure and Infrastructure Engineering. 2020;16(4):642-58.

# การศึกษาอากาศพลศาสตร์และการออกแบบเชิงหลักการ ของอากาศยานไร้คนขับปีก Box-wing ขึ้น-ลงทางดิ่งขนาดเล็ก

ดนุพล สุทธิสน<sup>1\*</sup> ประสาทพร วงษ์คำข้าง<sup>1</sup> และนุกูล สุขุประการ<sup>1</sup>  
danupol.sutthison@gmail.com<sup>1\*</sup>, wongkamchang@hotmail.com<sup>1</sup>, snukul@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 27-Sep-2021 |
| Revised  | : 24-Feb-2022 |
| Accepted | : 31-Mar-2022 |

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing ขึ้น-ลงทางดิ่งขนาดเล็ก โดยใช้แผนอากาศแบบ S3010 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงจากผลการเปรียบเทียบกับแผนอากาศที่นิยมใช้ในการออกแบบอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กด้วยโปรแกรม XFLR5 จึงนำแผนอากาศดังกล่าวมาสร้างแบบจำลองอากาศยานไร้คนขับที่มีปีกขึ้นเดียวเป็นลำต้นแบบและรูปทรงปีก box-wing ที่ถูกออกแบบขึ้นใหม่ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 17.5 เมตร/วินาที และมีมุมปะทะ 0° อากาศยานไร้คนขับปีก box-wing มีอัตราส่วนระหว่างแรงยกต่อแรงต้านเพิ่มขึ้น 9.43% เมื่อเทียบกับอากาศยานไร้คนขับปีกขึ้นเดียว และมีการนำเสนอการติดตั้งชุดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถปรับมุมได้ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบร่าง (The preliminary design) ต่อไป

**คำสำคัญ:** อากาศพลศาสตร์ อากาศยานไร้คนขับ box-wing พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

# Aerodynamic Studies and Conceptual Design of a Small Box-Wing VTOL UAV

Danupol Sutthison<sup>1\*</sup>, Prasatporn Wongkamchang<sup>1</sup> and Nukul Sukuprakarn<sup>1</sup>  
danupol.sutthison@gmail.com<sup>1\*</sup>, wongkamchang@hotmail.com<sup>1</sup>, snukul@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup> The Graduate School, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 27-Sep-2021 |
| Revised  | : 24-Feb-2022 |
| Accepted | : 31-Mar-2022 |

## Abstract

This research presents a study of the aerodynamics of a small box-wing vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle with the airfoil S3010, which has a high lift coefficient from the results of a comparison of the airfoils commonly used in small UAV design by the XFLR5 program. This airfoil was used for the modeling of baseline mono-plane UAV and box-wing UAV to compare the aerodynamic characteristics using computational fluid dynamics methods. The results show that box-wing UAVs had a 9.43% higher lift-to-drag than mono-plane UAVs at a cruising speed of 17.5 m/s and an angle of attack of 0°. As the results, the installation of tilt motor has been proposed for the further proceeding in the preliminary design phase.

**Keywords:** Aerodynamics, Unmanned aerial vehicle, Box-wing, and Computational fluid dynamics

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการปฏิบัติการกิจต่าง ๆ ทางอากาศได้มีการนำอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned aerial vehicles: UAVs) เข้ามาแทนที่มากขึ้น เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับมีขีดความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างคล่องตัว และสามารถเข้าปฏิบัติการกิจในพื้นที่เสี่ยงภัยแทนการใช้ทรัพยากรมนุษย์และอากาศยานขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนและป้องกันความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นจากการปฏิบัติการกิจต่าง ๆ ที่มีความเสี่ยงอันตราย อีกทั้งในปัจจุบันยังเกิดการแพร่ระบาดของโรคติดต่อร้ายแรงและมีภัยพิบัติทางธรรมชาติเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนภายในประเทศ การพัฒนาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับจึงเป็นสิ่งหนึ่งที่จะสามารถนำไปต่อยอดในการช่วยเหลือและบรรเทาภัยพิบัติ เพื่อลดความสูญเสียต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ อากาศยานไร้คนขับยังสามารถปฏิบัติการกิจบินลาดตระเวนเพื่อหาข่าวและรวบรวมข้อมูลที่สำคัญด้วยการติดตั้งกล้องถ่ายภาพหรือเซนเซอร์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์เพื่อวางแผนยับยั้งการเกิดเหตุอันตรายหรือภัยพิบัติต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้งานอากาศยานไร้คนขับในด้านการเกษตร เพื่อเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นการผสมผสานการใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ กับการทำการเกษตร ทั้งยังเป็นการส่งเสริมให้เกษตรกรและผู้ประกอบการทางนวัตกรรมมีส่วนร่วมในการพัฒนาธุรกิจด้านการเกษตรของประเทศ

อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กที่มีความนิยมในปัจจุบันนั้นใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากแบตเตอรี่เพื่อใช้สร้างแรงขับเคลื่อน กล่าวคือทำการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าหลาย ๆ ตัว (Multirotor UAVs) โดยมีทิศทางขึ้น ทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูงเนื่องจากแรงยกที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นจากมอเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว อีกทั้งลำตัวของอากาศยานไร้คนขับยังมีลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic characteristics) ในการช่วยสร้างแรงยกที่ต่ำ จึงทำให้เกิดการพัฒนาลำตัวและรูปทรงของอากาศยานไร้คนขับให้มีลักษณะคล้ายกับอากาศยานปีกตรึงมากขึ้น (Fixed-wing

aircraft) และมีพื้นผิวแรงยก (Lifting surface) หรือปีก (Wing) ที่ช่วยสร้างแรงยกให้อากาศยานไร้คนขับ นอกเหนือจากการใช้พลังงานจากมอเตอร์ไฟฟ้า รวมถึงมีการใช้พื้นผิวบังคับ (Flight control surfaces) เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับสามารถเปลี่ยนทิศทางการบินไปตามแนวแกนต่าง ๆ ได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีด้านอากาศยานไร้คนขับเกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย ทั้งการพัฒนาระบบควบคุมการบิน อุปกรณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติการกิจและการออกแบบรูปทรงของอากาศยานไร้คนขับเพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางการบิน ในอดีตการออกแบบอากาศยานจะทำได้โดยการสร้างแบบจำลองและนำไปทดสอบเพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ในอุโมงค์ลม (Wind tunnels) ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้ มีงบประมาณในการดำเนินการสูง ในปัจจุบันจึงมีการประยุกต์ใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics: CFD) ซึ่งสามารถใช้คำนวณการทำงานของของไหล การไหลแบบปั่นป่วน และทิศทางการไหล เพื่อออกแบบและวิเคราะห์ในงานด้านวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องกังหันน้ำชนิดเพลตันโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [1] นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการคำนวณหาค่าลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของแบบจำลองอากาศยานไร้คนขับ [2] ในขั้นตอนของการออกแบบ เพื่อนำไปสู่กระบวนการผลิตต่อไป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาารูปทรงของอากาศยานไร้คนขับเพื่อเพิ่มค่าลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ให้สามารถสร้างแรงยก (Lift:  $L$ ) ได้มากขึ้น ทั้งยังมีอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้าน (Lift-to-drag ratio:  $L/D$ ) มากขึ้นด้วย โดยวิธีการศึกษาลักษณะเฉพาะของแผนอากาศหลาย ๆ แบบด้วยโปรแกรม XFLR5 เพื่อนำไปกำหนดเป็นแผนอากาศของปีกอากาศยานไร้คนขับลำต้นแบบ และพัฒนารูปทรงปีกให้เป็นแบบ Box-wing กล่าวคือการออกแบบปีกสองชั้นให้มีความเหลื่อมกัน (Staggered wing) และมีปลายปีก (Wingtip) ที่เชื่อมถึงกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงยกและลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำ (Induced drag coefficient:  $C_{di}$ ) โดยทำการคำนวณหาค่า

ลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ในโปรแกรม Ansys Fluent ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ทั้งยังทำการศึกษาและออกแบบลำตัว (Fuselage) เพื่อลดการเกิดแรงต้านให้น้อยลง จึงเป็นการเพิ่มค่าอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านให้กับอากาศยานไร้คนขับ นอกจากนี้ยังทำการศึกษานิวตริกในการติดตั้งชุดสร้างแรงขับเคลื่อนหรือมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถปรับมุมได้ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการขึ้น-

ลงทางตั้ง (Vertical take-off and landing: VTOL) ให้อากาศยานไร้คนขับสามารถทำการบินเข้าถึงพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างคล่องตัวมากขึ้น

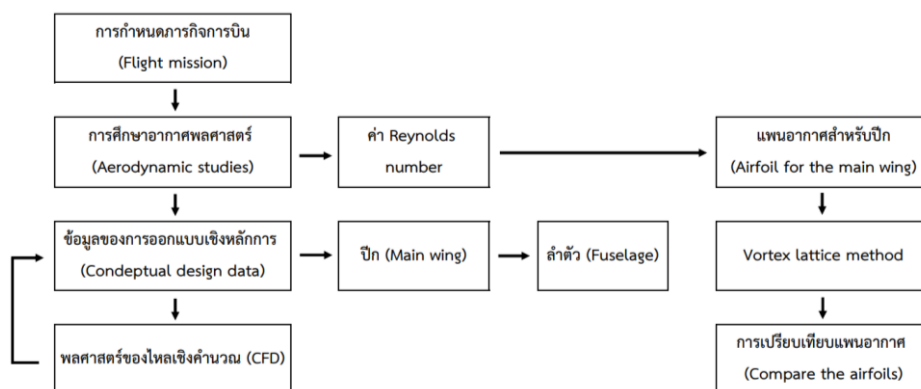
## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1. การออกแบบอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned aerial vehicle design)

การออกแบบอากาศยานไร้คนขับ [3] ประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงาน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการ (The conceptual design phase) ขั้นตอนการออกแบบร่าง (The preliminary design phase) และขั้นตอนการออกแบบรายละเอียด (The detail design phase) ในขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการมีแนวคิดมากจากการผลิตสินค้าหรือผลิตภัณฑ์

ให้เกิดผลกำไรหรือให้ผลประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน ขั้นการออกแบบเชิงหลักการจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลในการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้เกิดความคุ้มค่ากับต้นทุนในการผลิต โดยสามารถเริ่มต้นจากการตั้งคำถามในด้านความต้องการของสินค้า ขนาดของตลาด ต้นทุนในการผลิต ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการใช้งาน ความคุ้มค่าในการใช้งาน และกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ การพิจารณาคำถามเหล่านี้เป็นการช่วยตัดสินใจในการริเริ่มการผลิตหรือปรับเปลี่ยนแนวคิดต่าง ๆ ให้เกิดผลประโยชน์สูงสุดได้

การออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับเป็นการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะรูปทรงของอากาศยานไร้คนขับ ขนาด น้ำหนัก และประสิทธิภาพทางการบิน โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องมือต่าง ๆ เพื่อยืนยันทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์ และอาจเกิดการดัดแปลงรูปทรงหรือประยุกต์ใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ เพิ่มเติมมากขึ้น เพื่อตอบคำถามในด้านความคุ้มค่าในการใช้งาน และทำให้เกิดการพัฒนาไปสู่การออกแบบในขั้นตอนถัดไป ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการออกแบบเชิงหลักการ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับ

2.2. แผนอากาศความเร็วต่ำ (Low speed airfoil) แผนอากาศความเร็วต่ำหรือแผนอากาศที่มีค่า Reynolds number ต่ำ [4] นั้นถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ดีที่ค่า Reynolds number ต่ำกว่า 500,000 ซึ่งนิยมนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างปีก

ของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก การเลือกแผนอากาศที่เหมาะสมนั้นต้องมีลักษณะเฉพาะที่สามารถสร้างแรงยกได้ดีหรือมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่สูงและมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่น้อย ซึ่งสัมพันธ์กับมุมปะทะของอากาศที่กระทำต่อแผนอากาศนั้น ๆ ด้วย

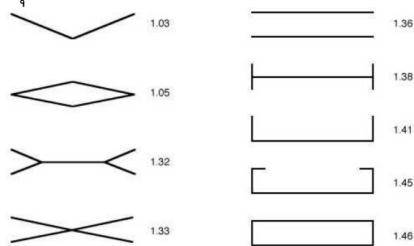
การหาค่า Reynolds number เพื่อศึกษา  
แผนอากาศ แสดงดังสมการที่ 1

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (1)$$

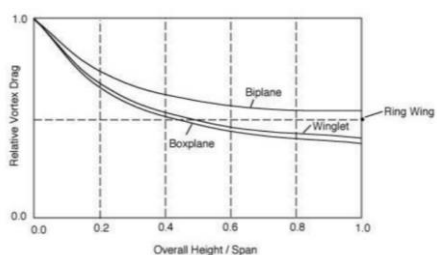
โดยที่  $Re$  คือ ค่า Reynolds number  $\rho$   
คือ ความหนาแน่นของอากาศ  $v$  คือ ความเร็วของ  
อากาศ  $l$  คือ ความยาวเส้นครีตของแผนอากาศ และ  
 $\mu$  คือ ความหนืดพลวัตของอากาศ

2.3. การลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเหนี่ยวนำ  
( $C_{Di}$ ) ด้วยรูปทรงปีกแบบไม่ระนาบ (Reduction of  
the induced drag using non-planar wing)

Kroo [5] ได้อธิบายวิธีการลดค่าสัมประสิทธิ์  
แรงต้านเหนี่ยวนำด้วยการเพิ่มค่าประสิทธิภาพกางปีก  
(Span efficiency factor) ให้มากขึ้น โดยวิธีการ  
ออกแบบรูปทรงปีกแบบไม่ระนาบ ในรูปที่ 2 แสดงค่า  
ประสิทธิภาพกางปีกที่ต่างกันไปในรูปทรงปีกแบบ  
ไม่ระนาบแต่ละแบบ โดยมีอัตราส่วนความสูงต่อความ  
กว้าง (Height-to-width ratio) ที่ 0.2 พบว่า รูปทรง  
ปีกแบบ box-wing มีค่าประสิทธิภาพกางปีกมากที่สุด  
และรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า รูปทรงปีก box-wing มี  
แรงต้านที่มาจากกระแสดังอากาศวนที่ปลายปีก  
น้อยที่สุด



รูปที่ 2 ค่าประสิทธิภาพกางปีกของรูปทรงปีกแบบไม่  
ระนาบ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านจากกระแสดัง  
อากาศวนกับอัตราส่วนความสูงของปีกต่อระยะกางปีก

## 2.4. ทฤษฎี Best wing system (BWS)

Prandtl [6] ได้ทำการคำนวณการประมาณ  
ประสิทธิภาพของปีกเนื่องจากการเกิดแรงต้านของปีก  
รูปทรง Best wing system ที่มีลักษณะเดียวกับปีก  
Box-wing โดยเปรียบเทียบกับปีกชั้นเดียว ซึ่งขึ้นอยู่กับ  
ค่าความสูงของระยะห่างปีกทั้งสองชั้น ( $h$ ) และความ  
กว้างของปีก ( $b$ ) ดังสมการที่ 2

$$\frac{D_{BWS}}{D_m} \approx \frac{1 + 0.45hb^{-1}}{1.04 + 2.81hb^{-1}} \quad (2)$$

2.5. การคำนวณอากาศพลศาสตร์ด้วยวิธี  
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational  
Fluid Dynamics)

โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [7]  
เป็นเครื่องมือในการจำลองผลลัพธ์ของการไหลที่มี  
ความซับซ้อนของของไหล ซึ่งมีทั้งการไหลของความ  
ร้อน การถ่ายเทมวล การเปลี่ยนสถานะของของไหล  
ปฏิกิริยาเคมี และการเคลื่อนที่ของของไหลต่าง ๆ โดยการใช้  
คอมพิวเตอร์ช่วยแก้สมการคณิตศาสตร์ด้วยสถานะ  
จำลองที่ต้องการจะศึกษา ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม  
Ansys Fluent ในการแก้สมการรูปแบบจำลองการไหล  
ของอากาศแบบเทอร์บูเลนซ์ (Reynolds Averaged  
Navier-Stokes Equation: RANS) โดยใช้เทอร์บูเลนซ์  
โมเดลแบบ SST k- $\omega$  [8] เนื่องจากมีความแม่นยำสูงใน  
การเกิดการไหลในแบบต่าง ๆ ทั้งการไหลที่มีความดัน  
ย้อนกลับสูง (Strong adverse pressure gradient)  
การไหลแยกตัวของอากาศ (Flow separations) และ  
การไหลในชั้นขีดผิว (Boundary layer) รวมถึงเทอร์บู  
เลนซ์โมเดลชนิดนี้ยังถูกพัฒนามาจากการผสมผสาน  
ข้อดีของเทอร์บูเลนซ์โมเดลแบบ Standard k- $\omega$  ที่มี  
ความแม่นยำในการวิเคราะห์การไหลชั้นขีดผิว และ  
เทอร์บูเลนซ์โมเดลตระกูล k- $\epsilon$  ที่เหมาะกับการ  
วิเคราะห์การไหลนอกชั้นขีดผิว โดยมีสมการที่เกี่ยวข้อง  
คือ สมการที่ 3 กฎอนุรักษ์มวล (Mass Conservation  
Equation) และสมการที่ 4 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม  
(Momentum Conservation Equations)

$$\frac{\partial(\bar{\rho})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (4)$$

## 2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Palaia G, et al. [9] ได้นำเสนอการออกแบบอากาศยานไร้คนขับที่สามารถบินขึ้นลงทางดิ่งได้ (Vertical take-off and landing: VTOL) โดยผสมผสานกับทฤษฎี Best wing system [8] ของ Prandtl ซึ่งอากาศยานไร้คนขับที่ได้ทำการออกแบบนั้นมีชื่อว่า “Tiltone” เนื่องจากปีกนั้นสามารถปรับมุมได้ 90° เพื่อปรับเปลี่ยนจากการบินแบบ multicopter เป็นการบินแบบ fixed-wing ได้ ซึ่งแนวคิดดังกล่าวนี้เป็นการวางรากฐานการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับในปัจจุบันให้กลายเป็นเครื่องบินโดยสารขนาดเล็กได้ในอนาคต

Ma T, et al. [10] ได้นำเสนอการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานไร้คนขับปีกตรึงที่มีรูปทรงแบบ box-wing โดยมีใบพัด (duct-fan) ติดตั้งอยู่ 2 ชุดซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ turboshaft ที่อยู่ในลำตัว ซึ่งใบพัดทั้งสองชุดสามารถปรับมุมมองได้เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับลำนี้สามารถบินขึ้นลงทางดิ่งได้ จากการวิจัยพบว่าปีก box-wing ทำให้อากาศยานไร้คนขับมีเสถียรภาพทางการบินที่ดีขึ้นและยังมีค่าความเร็วร่วงหล่น (stall speed) ที่ต่ำอีกด้วย

Chau T, Zingg D W. [11] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้สมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes เพื่อการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานปีก box-wing โดยพัฒนามาจากอากาศยานลำต้นแบบคือ Embraer E190 จากการศึกษาพบว่าอากาศยานปีก box-wing สามารถประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้มากกว่าอากาศยานลำต้นแบบถึง 7.2% เนื่องจากข้อดีในด้านการลดแรงต้านเหนี่ยวนำ

Andrews S A, Perez R E. [12] ได้นำเสนอการออกแบบอากาศยานปีก box-wing และทำการศึกษาร่วมกับอากาศยานปีกชั้นเดียวลำต้นแบบ พบว่าอากาศยานปีก box-wing มีค่าอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านมากกว่าถึง 2% และสามารถบรรจุน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทำการบินได้มากขึ้นอีกด้วย

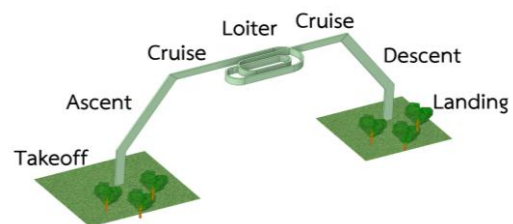
Kaparos P, et al. [13] ได้นำเสนอการออกแบบเชิงหลักการของอากาศยานปีก box-wing โดยมีต้นแบบมาจาก Airbus A320 จากการศึกษาด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและเปรียบเทียบคุณสมบัติ พบว่าอากาศยานปีก box-wing มีค่าประสิทธิภาพกางปีก (Span efficiency factor, Oswald factor: e) มากขึ้นถึง 58.9% ถึงช่วยให้อากาศยานมีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ยิ่งขึ้น

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ารูปทรงปีก box-wing มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามยังมียานวิจัยในหัวข้อนี้ไม่มากนัก ทั้งยังนำเสนอข้อมูลทางเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบค่อนข้างน้อยและยากต่อการนำไปต่อยอดในขั้นถัดไป งานวิจัยนี้จึงเป็นงานวิจัยที่ท้าทายและเป็นการส่งเสริมให้เกิดนวัตกรรมใหม่ทางเทคโนโลยีด้านการบินในอนาคต

## 3. วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

### 3.1. การกำหนดภารกิจการบิน

งานวิจัยนี้เริ่มขั้นตอนการออกแบบอากาศยานไร้คนขับด้วยการกำหนดภารกิจการบินของอากาศยานไร้คนขับ ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยให้สามารถทำการบินขึ้นในแนวตั้ง (Take off) ได้เหมือนอากาศยานไร้คนขับหลายใบพัด (Multirotor UAVs) เมื่ออากาศยานไร้คนขับบินไต่ระดับ (Ascent) ถึงความสูงที่ต้องการก็สามารถเปลี่ยนรูปแบบเป็นการบินในแนวระดับได้ (Cruise) และยังสามารถทำการบินแบบลอยตัว (Loiter) เหนือพื้นที่ต่าง ๆ ได้ เมื่อเสร็จภารกิจก็ทำการบินไปยังที่หมาย ทำการลดระดับ (Descent) และลงจอดในแนวตั้ง (Landing)



รูปที่ 4 ภารกิจการบิน (Flight mission) ของอากาศยานไร้คนขับ

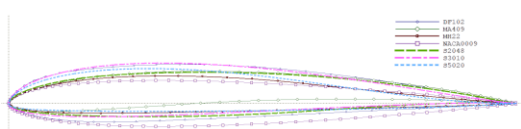
3.2. ลักษณะเฉพาะของอากาศยาน  
งานวิจัยนี้มีการกำหนดขอบเขตการศึกษาตามลักษณะเฉพาะของอากาศยานไว้ดังนี้

- ระยะกางปีก (Wingspan) ไม่เกิน 1.3 เมตร
- ความสูงทั้งหมด ไม่เกิน 0.5 เมตร
- ความยาวของลำตัวทั้งหมด ไม่เกิน 1 เมตร
- ความเร็วปฏิบัติการ 17.5 เมตร/วินาที
- ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า
- ทำการบินขึ้นและลงทางดิ่งได้

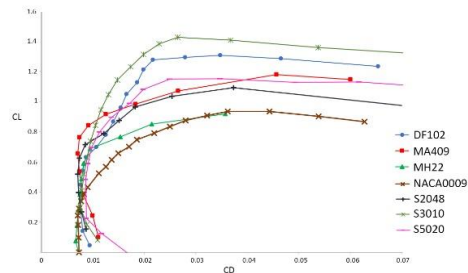
จากงานวิจัยด้านการออกแบบอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กจะทำการออกแบบให้มีค่า Aspect ratio เท่ากับ 10 [14] ซึ่งหากคำนวณจากระยะกางปีกที่กำหนดไว้ ทำให้ความยาวเส้นคอร์ด (Chord length) ของแพนอากาศเท่ากับ 0.245 เมตร และจากการคำนวณตามสมการที่ 1 โดยกำหนดให้มีค่าความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.225 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและค่าความหนืดพลวัตของอากาศเท่ากับ  $1.7894 \times 10^{-5}$  กิโลกรัม/(เมตร.วินาที) จึงได้ค่า Reynolds number เท่ากับ  $3 \times 10^5$

### 3.3. การเลือกแพนอากาศ

งานวิจัยนี้ศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้วยโปรแกรม XFLR5 ที่ค่า Reynolds number เท่ากับ  $3 \times 10^5$  โดยเลือกแพนอากาศที่นิยมใช้สำหรับการออกแบบอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก [15] ทั้งหมด 7 แบบ ได้แก่ DF102 MA409 MH22 NACA0009 S2048 S3010 และ S5020 ดังแสดงในรูปที่ 5 จากผลการคำนวณจากโปรแกรมด้วยวิธี Vortex Lattice Method พบว่าแพนอากาศ S3010 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่สูงที่สุดในขณะที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 6 จึงเลือกแพนอากาศ S3010 มาใช้ในการออกแบบอากาศยานไร้คนขับต่อไป



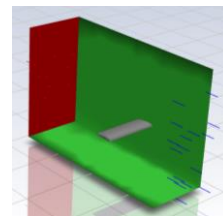
รูปที่ 5 แพนอากาศ 7 แบบ ที่ถูกเลือกนำมาศึกษา



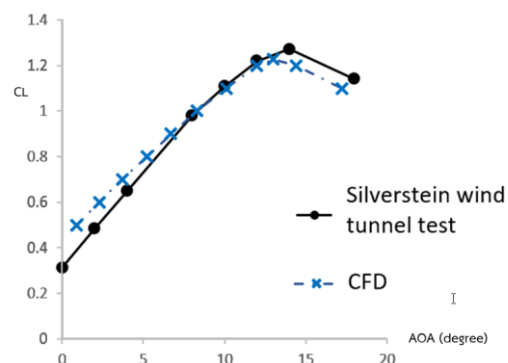
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแพนอากาศ

### 3.4. การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม CFD

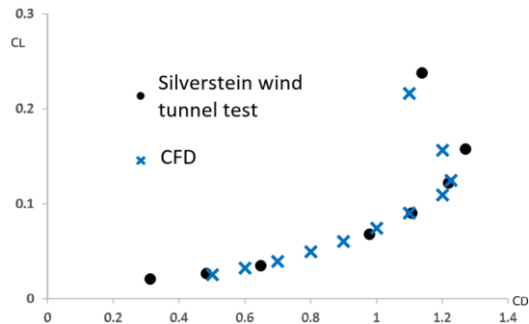
การตรวจสอบความถูกต้องในการใช้งานโปรแกรม CFD ทำโดยอ้างอิงจากค่าลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ที่ผ่านการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของแพนอากาศ Clark Y ที่มีค่า Reynolds number เท่ากับ  $1 \times 10^6$  [16] และทำการสร้างแบบจำลองปีกจากแพนอากาศ Clark Y ที่มีความยาวเส้นคอร์ด 0.245 เมตร และมีความเร็วของอากาศอยู่ที่ 55 เมตร/วินาที ดังรูปที่ 7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 7 การจำลองการไหลของอากาศเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะของปีกแพนอากาศ Clark Y

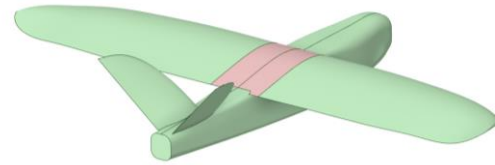


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของปีกแพนอากาศ Clark Y

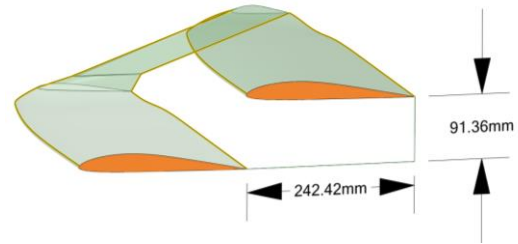
### 3.5. การสร้างแบบจำลองสามมิติ

ขั้นตอนนี้เป็นกรสร้างแบบจำลองอากาศยานไร้คนขับปีก Box-wing โดยมีต้นแบบมาจากอากาศยานไร้คนขับปีกชั้นเดียวขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติตามขอบเขตของงานวิจัย ดังรูปที่ 10 อากาศยานไร้คนขับลำต้นแบบมีขนาดลำตัวยาว 0.81 เมตร และความยาวกางปีก 1.28 เมตร มีโคนปีกเป็นแพนอากาศ S3010 ซึ่งการออกแบบรูปทรงปีก box-wing นั้นใช้วิธีการเพิ่มปีกอีกชั้นหนึ่งโดยจัดวางให้ปีกทั้งสองชั้นมีระยะความสูง (h) ห่างกันมากที่สุดเท่าที่จะสามารถเกาะยึดปีกกับลำตัวได้ เพื่อลดแรงต้านเหนียวน้ำที่จะเกิดขึ้นตามทฤษฎี Best wing system ในสมการที่ 2 จึงได้รูปทรงปีก box-wing แสดงดังรูปที่ 11 โดยมีระยะของแต่ละจุดที่ใช้สร้างเส้นโค้งเพื่อกำหนดชายหน้า (Leading edge) และชายหลัง (Trailing Edge) ของปีกขวา แสดงดังตารางที่ 1

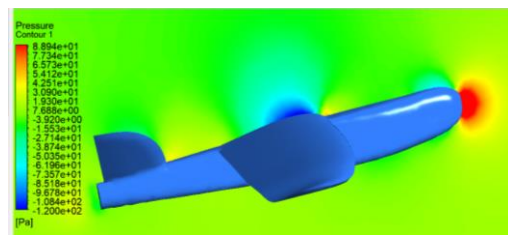
การออกแบบลำตัวของอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing ได้ทำการพัฒนาลำตัวมาจากอากาศยานไร้คนขับลำต้นแบบ โดยการวิเคราะห์จากเส้นสีแสดงระดับความดัน (Pressure contour) แสดงดังรูปที่ 12 พบว่าส่วนหัวของลำตัวมีแรงดันอากาศสูง จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปทรงของลำตัวขึ้นใหม่เพื่อให้อากาศไหลได้ราบเรียบยิ่งขึ้นและลดการเกิดแรงต้านโดยมีแนวคิดจากการสร้างลำตัวของ Goldschmied propulsor [17] จึงได้แบบจำลองอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing แสดงดังรูปที่ 13



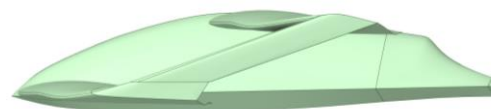
รูปที่ 10 แบบจำลองอากาศยานไร้คนขับปีกชั้นเดียวลำต้นแบบ



รูปที่ 11 รูปทรงปีก box-wing ที่ออกแบบขึ้นใหม่



รูปที่ 12 เส้นสีแสดงระดับความดัน (Pressure contour) รอบอากาศยานไร้คนขับลำต้นแบบ



รูปที่ 13 แบบจำลองอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing ที่ออกแบบขึ้นใหม่

ตารางที่ 1 ระยะจุดที่ใช้สร้างเส้นโค้งเพื่อกำหนดชายหน้าปีกขวา (a) และชายหลังปีกขวา (b)

| a)     |       |         | b)     |        |         |        |       |         |
|--------|-------|---------|--------|--------|---------|--------|-------|---------|
| x      | y     | z       | X      | y      | z       | x      | y     | z       |
| 4.7    | 0.03  | 0.02    | 247.62 | -14.82 | 0       | 243.71 | 12.73 | -572.4  |
| 3.94   | 0.15  | -231.39 | 247.49 | -14.73 | -36.39  | 458.31 | 89.43 | -572.4  |
| 13.88  | -0.45 | -351.39 | 247.26 | -14.57 | -111.24 | 468.9  | 82.42 | -554.75 |
| 33.74  | -1.71 | -466.39 | 247.27 | -14.57 | -186.09 | 474.34 | 77.9  | -537.45 |
| 73.45  | -4.22 | -556.39 | 247.44 | -14.69 | -226.52 | 478.09 | 75.35 | -519.3  |
| 94.35  | -0.85 | -576.38 | 247.73 | -14.89 | -260.94 | 480.76 | 74.53 | -500.81 |
| 144.18 | 12.73 | -576.88 | 247.93 | -15.03 | -298.37 | 483.93 | 75.83 | -463.55 |
| 378.16 | 96.36 | -576.9  | 245.39 | -13.71 | -410.59 | 484.98 | 76.83 | -444.89 |
| 315.95 | 87.09 | -534.64 | 244.47 | -13.64 | -429.28 | 486.97 | 77.67 | -407.53 |
| 276.24 | 89.6  | -444.64 | 242.48 | -14.48 | -466.64 | 487.89 | 77.6  | -388.84 |
| 256.38 | 90.86 | -329.64 | 241.43 | -15.48 | -485.3  | 489.4  | 76.97 | -351.45 |
| 246.44 | 91.46 | -209.64 | 240.12 | -16.43 | -503.94 | 490.25 | 76.4  | -314.04 |
| 246.44 | 91.46 | -14.64  | 235.59 | -15.96 | -541.05 | 490.23 | 76.42 | -239.19 |
| 246.74 | 91.41 | 0       | 228.82 | -10.87 | -569.89 | 490.04 | 76.55 | 0       |

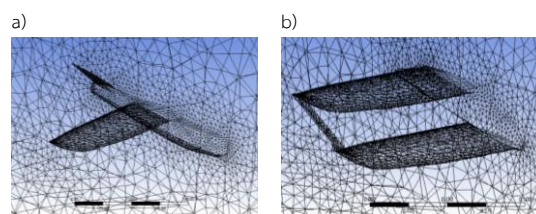
### 3.6. การสร้างกริด (Meshing)

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองเฉพาะครึ่งส่วนขวาของอากาศยานไร้คนขับเท่านั้น ในขั้นตอนต่อไปเป็นการตั้งค่าในการจำลองเพื่อเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับลำต้นแบบที่มีปีกชั้นเดียวและอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing โดยเริ่มจากการสร้างกริดของอากาศยานไร้คนขับ กริดที่ถูกสร้างขึ้นจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย และทำการกำหนดขอบเขตพื้นที่ที่จะจำลอง แสดงตามรูปที่ 14 โดยขนาดของขอบเขตที่ใช้คำนวณจะถูกกำหนดให้เหมาะสมกับการปฏิบัติการกิจในพื้นที่แคบ หากกำหนดขอบเขตการคำนวณที่ใหญ่เกินไป อาจส่งผลให้สิ้นเปลืองต่อทรัพยากรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

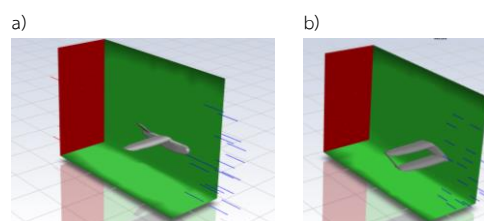
### 3.7. การจำลองการไหลของอากาศ

งานวิจัยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกำหนดให้อากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองของอากาศยานไร้คนขับที่มีความเร็ว 17.5 เมตร/วินาที และทำการปรับมุมปะทะ (Angle of Attack) ตั้งแต่  $-6^{\circ}$  ถึง  $18^{\circ}$  ครึ่งละ  $2^{\circ}$  เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางอากาศ

พลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับอากาศยานไร้คนขับทั้งสองแบบขณะทำการบินที่มุมปะทะต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 15



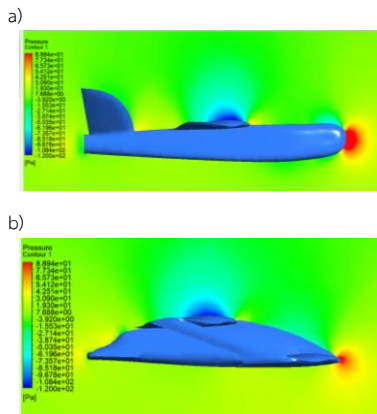
รูปที่ 14 การสร้างกริดของอากาศยานไร้คนขับปีกชั้นเดียว (a) และปีก box-wing (b)



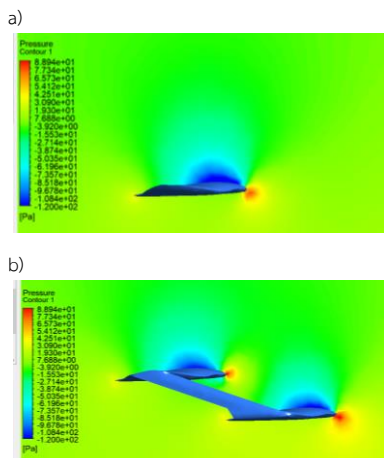
รูปที่ 15 การไหลของอากาศผ่านอากาศยานไร้คนขับปีกชั้นเดียว (a) และปีก box-wing (b)

### 3.8. เส้นสีแสดงระดับความดัน

จากการจำลองการไหลของอากาศรอบอากาศยานไร้คนขับทั้งสองลำ สามารถแสดงผลลัพธ์เป็นเส้นสีแสดงระดับความดัน พบว่าอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing ที่ได้ทำการออกแบบใหม่ เกิดแรงดันอากาศที่ส่วนหัวของลำตัวที่น้อยลง แสดงดังรูปที่ 16 และจากภาพตัดในแนวเส้นคอร์คของปีก จะเห็นได้ว่าปีก Box-wing สามารถสร้างแรงยกได้มากกว่าปีกชั้นเดียว แสดงดังรูปที่ 17 อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงแรงดันที่เกิดขึ้นด้วย



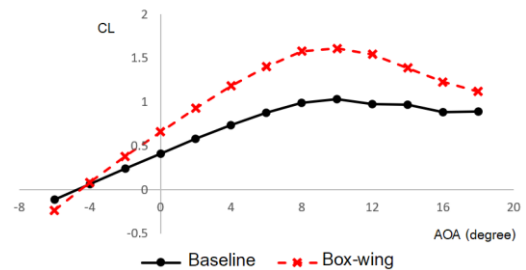
รูปที่ 16 เส้นสีแสดงระดับความดันรอบอากาศยานไร้คนขับปีกชั้นเดียว (a) และปีก box-wing (b)



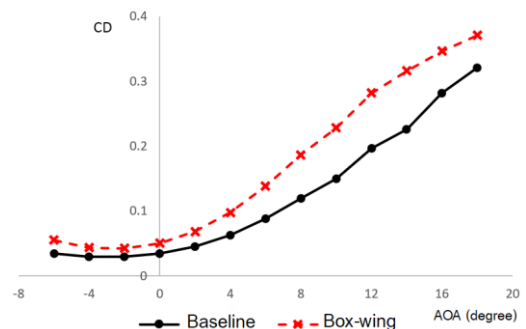
รูปที่ 17 เส้นสีแสดงระดับความดันรอบปีกชั้นเดียว (a) และปีก box-wing (b)

### 3.9. ลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์

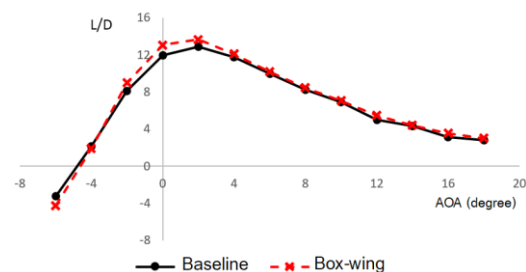
จากผลการทดสอบที่มุมปะทะตั้งแต่  $-6^\circ$  ถึง  $18^\circ$  ได้มีการนำลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับทั้งสองลำ ได้แก่ แรงยก ( $L$ ) แรงต้าน ( $D$ ) ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก ( $C_L$ ) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) และอัตราส่วนระหว่างแรงยกต่อแรงต้าน ( $L/D$ ) มาเปรียบเทียบกับ แสดงในรูปที่ 18 19 และ 20



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะ



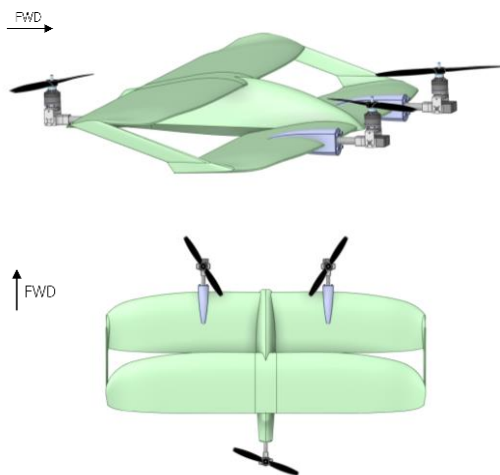
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านกับมุมปะทะ



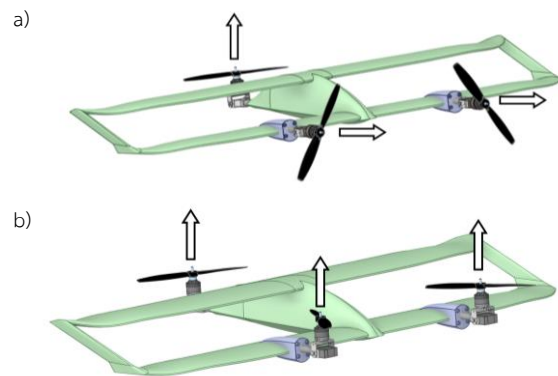
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านกับมุมปะทะ

### 3.10. แนวคิดในการติดตั้งชุดขับเคลื่อน

จากผลลัพธ์ในค่าลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ของการทดลองพบว่า อากาศยานไร้คนขับปีก box-wing มีค่าอัตราส่วนระหว่างแรงยกต่อแรงต้านที่สูงขึ้น ผู้วิจัยจึงนำแบบจำลองสามมิติดังกล่าวเป็นต้นแบบของโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับเพื่อนำไปออกแบบการติดตั้งชุดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่นิยมใช้กับอากาศยานไร้คนขับ [18] ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการแสดงการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้า Brushless แบบ 2814 และใบพัดขนาด 11x6 นิ้ว จากการประยุกต์แนวคิดในการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้ามาจากอากาศยานไร้คนขับแบบ 3 ปีกหมุน (Tri-rotor UAV) ดังรูปที่ 21 และกำหนดให้มอเตอร์สองตัวที่ติดตั้งอยู่บริเวณชายหน้าปีกสามารถปรับมุมได้ด้วยมอเตอร์ควบคุมกลไก (Servo motor) เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับสามารถทำการบินในแนวระดับและขึ้น-ลงทางดิ่งได้ แสดงดังรูปที่ 21 และ 22 ซึ่งแนวคิดนี้สามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบร่าง (The preliminary design) ต่อไป



รูปที่ 21 การติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าของอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing



รูปที่ 22 การปรับมุมมอเตอร์ไฟฟ้าใน  
รูปแบบการบินแนวระดับ (Cruise mode) (a)  
และแนวตั้ง (Vertical mode) (b)

### 4. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่าที่มุมปะทะ  $0^\circ$  ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของอากาศยานไร้คนขับปีกชั้นเดียวอยู่ที่ 0.4096 และอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing อยู่ที่ 0.6598 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 61.08% ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศยานไร้คนขับปีกชั้นเดียวอยู่ที่ 0.0343 และอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing อยู่ที่ 0.0505 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 47.2% รวมถึงอัตราส่วนระหว่างแรงยกต่อแรงต้านของอากาศยานไร้คนขับปีกชั้นเดียวอยู่ที่ 11.95 และอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing อยู่ที่ 13.08 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 9.43% จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing มีอัตราส่วนระหว่างแรงยกต่อแรงต้านสูงกว่าอากาศยานไร้คนขับปีกชั้นเดียว จากข้อดีของลักษณะเฉพาะทางอากาศพลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวทำให้ต้นแบบของอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing มีความเหมาะสมในการนำไปติดตั้งชุดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถปรับมุมได้ เพื่อนำไปใช้การออกแบบร่างของอากาศยานไร้คนขับปีก box-wing ขึ้น-ลงทางดิ่งขนาดเล็ก

## 5. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Posew K, Ananchaipattana CH. Pelton turbine efficiency analysis using computational fluid dynamics technique. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2016;14(2):11-9. (in Thai)
- [2] Sreelakshmi K, Jagadeeswar K. Aerodynamic analysis over Unmanned Aerial Vehicle (UAV) using CFD. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018;455
- [3] Austin R. Unmanned aircraft systems : UAVS design, development and deployment. John Wiley & Sons Ltd; 2010.
- [4] Winslow J, Otsuka H, Govindarajan B, Chopra I. Basic understanding of airfoil characteristics at low reynolds numbers ( $10^4$ - $10^5$ ). *Journal of Aircraft* 2018;55(3):1050-61
- [5] Kroo I. Nonplanar wing concepts for increased aircraft efficiency. Innovative configurations and advanced concepts for future civil aircraft. 2005.
- [6] Prandtl L. Induced Drag of Multiplanes. NACA Technical Report No. 182. National Advisory Committee for Aeronautics. 1924.
- [7] Manikantissar, Geete A. CFD analysis of conceptual aircraft body. *Int. J. Eng. Technol.* 2017;4(1):217-22
- [8] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.* 1994;32(8):1598-605
- [9] Palaia G, Cipolla V, Binante V, Rizzo E. Preliminary design of a box-wing VTOL UAV. *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 2019;92(5):737-43.
- [10] Ma T, Wang X, Wei Z, Zihan X, Bie D. Conceptual design of a VTOL box-wing UAV with rotatable duct-fans. *AIAA Scitech Forum.* 2019.
- [11] Chau T, Zingg D W. Aerodynamic shape optimization of a box-wing regional aircraft based on the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations. 35th AIAA Applied Aerodynamics Conference. 2017.
- [12] Andrews S A, Perez R E. Comparison of box-wing and conventional aircraft mission performance using multidisciplinary analysis and optimization. *Aerosp Sci Technol.* 2018;79:336-51.
- [13] Kaparos P, Papadopoulos C, Yakinthos K. Conceptual design methodology of a box wing aircraft: A novel commercial airliner. *Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng.* 2018:1-12.
- [14] Kody F, Bramesfeld G. Small UAV design using an integrated design tool. *Int. J. Micro Air Veh.* 2012;4(2):151-63.
- [15] Hamburg S D. Conceptual and preliminary design of a stowable ruggedized micro air vehicle [graduate Thesis]. Morgantown, WV: West Virginia University; 2010.
- [16] Silverstein A. Scale effect on Clark Y airfoil characteristics from NACA full-scale wind-tunnel tests. NACA Technical Report No. 502. National Advisory Committee for Aeronautics. 1934.
- [17] Seubert C A. Analysis of a Goldschmied Propulsor using computational fluid dynamics referencing California Polytechnic's Goldschmied Propulsor testing [master's thesis]. San Luis Obispo, CA : California Polytechnic State University; 2012.
- [18] Bacchini A. Electric VTOL preliminary design and wind tunnel tests [dissertation]. Torino TO, Italy: Politecnico di Torino; 2020.

# การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสมของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

วิภูษณะ ฉายินทุ<sup>1\*</sup>

wiphusana.c@rmutsb.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 24-Nov-2021 |
| Revised  | : 18-May-2022 |
| Accepted | : 19-May-2022 |

## บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสมของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสขนานกัน ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สามารถหาได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แทนการใช้แบบจำลองผ่านระบบจริงบนคอมพิวเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบที่นำเสนอสามารถให้ผลการตอบสนองทางระบบควบคุมพลวัตของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ขนานกัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม ในเรื่องของช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกินน้อยกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.01 วินาที 1.04 วินาที และ 0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้วิธีการออกแบบที่นำเสนอในบทความนี้ยังเป็นวิธีการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบอื่นๆ ได้

**คำสำคัญ:** วงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้า ตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสม อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม  
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

# The Suitable PI Controller Design of the Parallel Synchronous Buck Converter Using the Genetic Algorithm

Wiphusana Chayinthu<sup>1\*</sup>  
wiphusana.c@rmutsb.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 24-Nov-2021 |
| Revised  | : 18-May-2022 |
| Accepted | : 19-May-2022 |

## Abstract

This article offers the Suitable PI controller design of the parallel synchronous buck converter using the genetic algorithm. The mathematical model of the power electronics control system is proved from the generalized state-space averaging method, which is used as an objective function instead of using a physical model on a computer. The results show that the suggested design method can allow more control efficient responses of the DC output voltage of parallel synchronous buck converter than traditional methods. In terms of the rise times, settling times, and percent overshoot, which equal to 1.01 seconds, 1.04 seconds, and 0 percent, respectively. In addition, the suggested design methods in this article can use for application to other DC-to-DC converters.

**Keywords:** synchronous buck converter, suitable PI controller, genetic algorithm, mathematical model, generalized state-space averaging method

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มีการใช้กันอย่างแพร่หลายทางด้านวิศวกรรมหลากหลายแขนง ซึ่งมีหลายด้าน เช่น การระบุเอกลักษณ์ของกำลังงานสูญเสียมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้วิธีดาบูเชิงปรับตัว [1] และการออกแบบตัวควบคุมของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินโดยใช้วิธีดาบูเชิงปรับตัว [2] (Adaptive Tabu Search: ATS) การออกแบบวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม [3] และการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของวงจรแปลงผันกำลังแบบบูสต์ โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม [4] (Genetic Algorithm: GA) การจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่โดยใช้การเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค [5] และการหาขนาดและตำแหน่งของสถานีชาร์จที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอิน โดยใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค [6] (Particle Swarm Optimization: PSO) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมไอพีดีสำหรับพลังงานอินทิเกรตลาหลังอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้ผลสนอง โดยใช้การค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search: CS) [7] และการปรับปรุงขั้นตอนวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีปลาฉลามสำหรับการจัดสรรกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมที่สุดเมื่อภาระโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (Whale Optimization Algorithm: WOA) [8]

ในบทความนี้วิธีปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้จะเป็นอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม เพื่อใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสมของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน (Parallel synchronous buck converter) ตัวควบคุมสำหรับวงจรนี้จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ตามที่ต้องการได้ ดังนั้น อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสม ซึ่งทำให้ได้ผลการตอบสนองทางพลวัตของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ให้มีผลการตอบสนองทางระบบควบคุมที่ดีที่สุดเท่าที่ตัวควบคุมจะทำได้ โดยทั่วไปแล้วแผนภาพบล็อกไดอะแกรมอย่าง

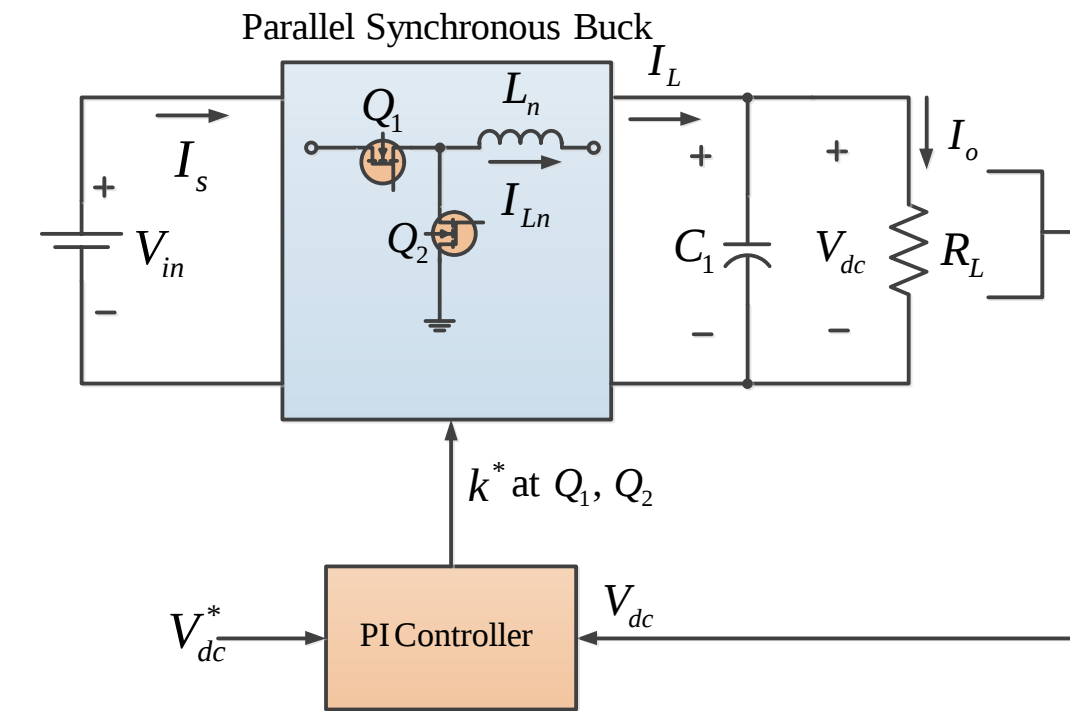
ง่ายจะถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (Classical method) ด้วยเหตุผลนี้ การออกแบบตัวควบคุมพีไอจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือที่เรียกว่าแบบจำลองพลวัตของระบบ ซึ่งสามารถหาได้จากการใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging Method: GSSA) การหาด้วยวิธีการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่แปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC choppers converter) [9-10] เมื่อตัวควบคุมถูกออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ขั้นตอนในการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะต้องสร้างแบบจำลองบนระบบบิเล็กทรอนิกส์กำลังผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจากวงจรทางไฟฟ้าอย่างง่าย สำหรับใช้ปรับจูนตัวควบคุมจนกระทั่งได้ค่าพารามิเตอร์ที่ยอมรับได้และต้องมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด (Fitness value)

สำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ที่ใส่ตัวควบคุมไปนั้นมีปัญหาที่สำคัญคือ ตัวอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร ซึ่งเมื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วทำให้ได้แบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent model) เมื่อนำไปหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม จะหาสมการทางคณิตศาสตร์และใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่ค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลานาน ดังนั้น จึงต้องเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา โดยใช้วิธีเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ วิธีการนี้ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time-independent model) [11-12] ผลลัพธ์ที่ได้สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ง่ายขึ้นและใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์มีความรวดเร็วขึ้น และนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมได้

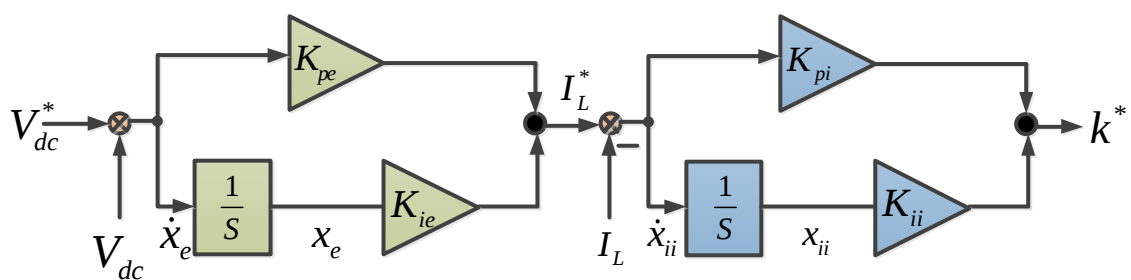
เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลาแล้ว ก่อนที่จะนำไปออกแบบตัวควบคุมต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อน โดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เปรียบเทียบกับชุดบล็อกสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Simscape ในโปรแกรม MATLAB จากผลการเปรียบเทียบที่ได้ของทั้งสองจะให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องทั้งสภาวะชั่วครู่ (Transient state) และสภาวะคงตัว (Steady state) ทำให้สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ของ

อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมได้ ขั้นตอนต่อไปนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปออกแบบตัวควบคุมพีโอ โดยใช้กระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ยอมรับได้และต้องมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุดก็จะนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วย



รูปที่ 1 วงจรไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 2 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมพีโอ

วิธีดั้งเดิม ซึ่งพบว่า การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ให้ผลการตอบสนองของ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอน แรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ดีกว่าวิธีการ ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ในเรื่องการตอบสนองทาง

ระบบควบคุมคือ ให้ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise-time) เวลา เข้าที่ (Settling-time) ที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกิน (Percent overshoot) น้อยกว่า ดังนั้น การออกแบบ ตัวควบคุมพีโอด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม มีข้อดีและ เป็นประโยชน์อย่างมาก สำหรับวิศวกรในการออกแบบ

ตัวควบคุมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยในอนาคตจะออกแบบตัวควบคุมสำเร็จรูปที่สามารถรอกค่าพารามิเตอร์ได้อย่างอัตโนมัติ โดยที่ไม่ต้องมาปรับจูนที่ตัวควบคุม มากนัก

## 2. วงจรไฟฟ้าที่พิจารณา

วงจรไฟฟ้าที่พิจารณาคือเป็นวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน 4 วงจร แสดงได้ดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง  $V_{in}$  มีตัวเหนี่ยวนำในวงจรเป็น  $L_n$  ซึ่งกำหนดให้มีตัวเหนี่ยวนำ  $L_1, L_2, L_3$  และ  $L_4$  มีตัวเก็บประจุ  $C_1$  โหลดตัวต้านทาน  $R_L$  และตัวควบคุมพีโอ ซึ่งภายในมีลู่วควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current control loop) และลู่วควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage control loop) มาต่อเรียงกัน (Cascade) เพื่อให้ประสิทธิภาพของการควบคุมดียิ่งขึ้น ซึ่งตัวแปรของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแทนด้วยค่า  $K_{pe}$ ,  $K_{ie}$ ,  $K_{pi}$ , และ  $K_{ii}$  ตามลำดับ แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีโอที่นำลู่วควบคุมกระแสไฟฟ้าและลู่วควบคุมแรงดันไฟฟ้า มาต่อเรียงกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบธรรมดา (Traditional buck converter) จะช่วยลดการเกิดกำลังงานสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตซ์กำลังและมีประสิทธิภาพสูงกว่าวงจรแบบธรรมดา [13] การนำวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสมาขนานกันจะช่วยแบ่งและลดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์ไม่ให้มีค่ามากจนเกินไป ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความร้อนและ ความเสียหายที่ตัวอุปกรณ์ได้ [13] ดังนั้น ในบทความนี้จึงเลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน มาออกแบบตัวควบคุม ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

## 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ในรูปที่ 1 สามารถทำได้โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเมื่อหาแบบจำลองที่อยู่ในรูปสมการเชิง

อนุพันธ์ (Differential equation) ได้จะนำมาใช้เป็น ฟังก์ชันวัตถุประสงคของอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม เพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม แบบจำลองคณิตศาสตร์ของวงจรไฟฟ้าที่พิจารณาจะเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น (Linear time-independent model) โดยแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้งานกับอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมได้ ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปสมการตัวแปรสถานะ (State variable) ได้ ดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_1(x, u)x + B_1(x, u)u \\ y &= C_1(x, u)x + D_1(x, u)u\end{aligned}\quad (1)$$

เมื่อ

$$\dot{x} = [I_{L1} \ I_{L2} \ I_{L3} \ I_{L4} \ V_{dc} \ x_e \ x_{ii}]^T$$

$$u = [V_{dc}^*]$$

$$y = [V_{dc}]$$

$$A_1(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{K_{pi}V_{in}}{L_1} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_1} & \frac{K_{pi}V_{in}}{L_1} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_1} & a_1(1,5) & \frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_1} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L_1} \\ \frac{K_{pi}V_{in}}{L_2} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_2} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_2} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_2} & a_1(2,5) & \frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_2} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L_2} \\ \frac{K_{pi}V_{in}}{L_3} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_3} & \frac{K_{pi}V_{in}}{L_3} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_3} & a_1(3,5) & \frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_3} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L_3} \\ \frac{K_{pi}V_{in}}{L_4} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_4} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_4} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_4} & a_1(4,5) & \frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_4} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L_4} \\ \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_1 R_L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -K_{pe} & K_{ie} & 0 \end{bmatrix}_{7 \times 7}$$

$$a_1(1,5) = -\frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_1} - \frac{1}{L_1}, \quad a_1(2,5) = -\frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_2} - \frac{1}{L_2}$$

$$a_1(3,5) = -\frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_3} - \frac{1}{L_3}, \quad a_1(4,5) = -\frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_4} - \frac{1}{L_4}$$

$$B_1(x, u) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{7 \times 1}$$

$$C_1(x, u) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]_{1 \times 7} \quad D_1(x, u) = [0]_{1 \times 1}$$

โดยที่ค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty cycle:  $k^*$ ) ของตัวควบคุมพีไอกำหนดให้เป็น

$$k^* = -K_{pi}I_L - K_{pe}K_{pi}V_{dc} + K_{ie}K_{pi}x_e + K_{ii}x_i + K_{pe}K_{pi}V_{dc}^* \quad (2)$$

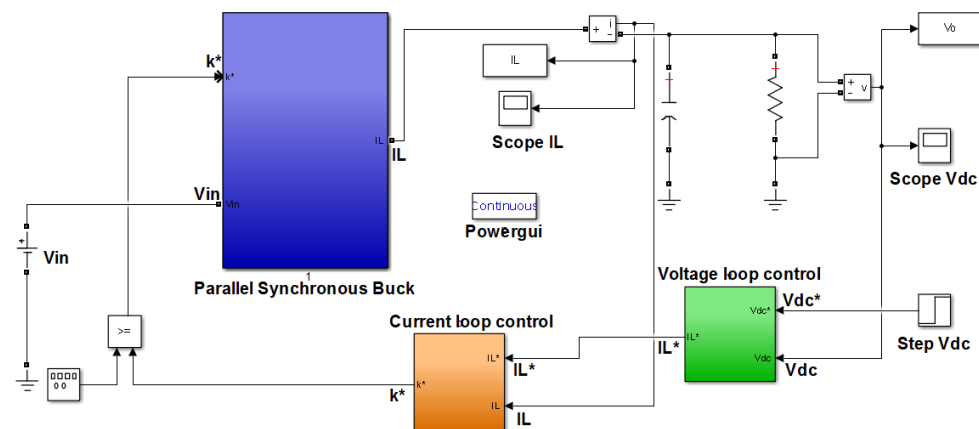
#### 4. การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัส โดยในหัวข้อนี้ จะมีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม ตามทฤษฎี

ทางระบบควบคุม (Control theory) ซึ่งผลการตอบสนองของระบบจะพิจารณาในโดเมนของเวลา และมาเปรียบเทียบกับ การออกแบบตัวควบคุมด้วย อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

#### 4.1 การออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 รูป โดยจะมีรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า สามารถออกแบบ โดยอ้างอิงมาจากบทความ [14] ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 บล็อกสำเร็จรูปโดยใช้ Simscape บนโปรแกรม MATLAB

##### 4.1.1 รูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า

รูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ กำหนดค่าเป็น  $K_{pe}$  และ  $K_{ie}$  ซึ่งสามารถออกแบบได้ดังสมการที่ (3)

$$\begin{cases} K_{pe} = \frac{2\zeta_e \omega_{ne} R_L C_1 - 1}{R_L} \\ K_{ie} = \omega_{ne}^2 C_1 \end{cases} \quad (3)$$

##### 4.1.2 รูปควบคุมกระแสไฟฟ้า

รูปควบคุมกระแสไฟฟ้าจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ กำหนดค่าเป็น  $K_{pi}$  และ  $K_{ii}$  ซึ่งสามารถออกแบบได้ดังสมการที่ (4)

$$\begin{cases} K_{pi} = \frac{2\zeta_{ii} \omega_{ni} L_1}{V_{in}} \\ K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L_1}{V_{in}} \end{cases} \quad (4)$$

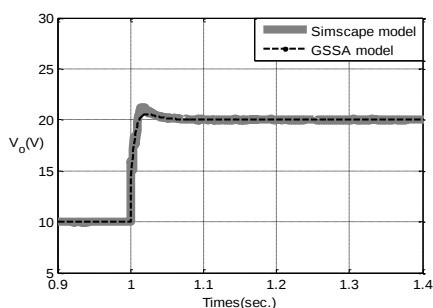
จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4) สามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอได้ โดยพิจารณาตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีดั้งเดิม

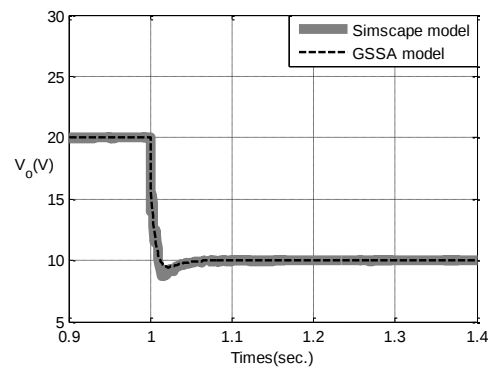
| คำอธิบายของตัวแปร       | ค่าที่ได้                |
|-------------------------|--------------------------|
| แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย | $V_{in} = 30 \text{ V}$  |
| ตัวเหนี่ยวนำในวงจร      | $L_1 = 6 \text{ mH}$     |
| ตัวเก็บประจุในวงจร      | $C_1 = 1000 \mu\text{F}$ |
| โหลดตัวต้านทานในวงจร    | $R_L = 100 \Omega$       |

| คำอธิบายของตัวแปร                                              | ค่าที่ได้                                                               |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| อัตราส่วนความหน่วงของ<br>ลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้าและ<br>กระแสไฟฟ้า | $\zeta_e = \zeta_{ii} = 0.8$                                            |
| ความถี่ธรรมชาติของ<br>ลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า                     | $\omega_{nv} = 80 \text{ rad/s}$<br>$K_{pe} = 0.118$<br>$K_{ie} = 6.4$  |
| ความถี่ธรรมชาติของ<br>ลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า                      | $\omega_{ni} = 800 \text{ rad/s}$<br>$K_{pi} = 0.256$<br>$K_{ii} = 128$ |

จากตารางที่ 1 เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้ง 4 ค่า ( $K_{pe}$ ,  $K_{ie}$ ,  $K_{pi}$ , และ  $K_{ii}$ ) มาได้แล้ว ต่อไปจะนำพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (1) ซึ่งตัวแบบจำลองที่ได้ต้องไปตรวจสอบความถูกต้อง ก่อนที่จะนำแบบจำลองดังกล่าวไปออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจะพิจารณาผลการตอบสนองทางพลวัต ซึ่งเปรียบเทียบกับระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (GSSA model) กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยระบบจริง (Simscape model) โดยอาศัยบล็อกสำเร็จรูป Simscape บนโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 3 กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าซิงโครนัส  $V_{dc}^*$  โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 10 V เป็น 20 V และลดแรงดันไฟฟ้าจาก 20 V ปรับเป็น 10 V ที่เวลา 1 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 ผลการตอบสนอง  $V_{dc}$  เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 10 V เป็น 20 V

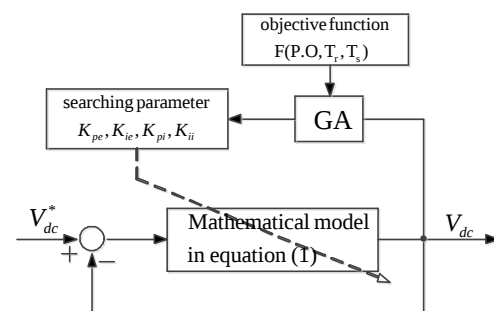


รูปที่ 5 ผลการตอบสนอง  $V_{dc}$  เมื่อลดแรงดันไฟฟ้าจาก 20 V ปรับเป็น 10 V

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองทางพลวัตของ  $V_{dc}$  เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 10 V เป็น 20 V และลดแรงดันไฟฟ้าจาก 20 V ปรับเป็น 10 V ให้ผลของการตอบสนองในโดเมนเวลาทั้งสภาวะชั่วครู่ (Transient state) และสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ที่สอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอในบทความนี้มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้กับอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมได้

#### 4.2 การออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีที่สามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอได้ โดยเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่ง อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมมีฟังก์ชันสำเร็จรูปที่สามารถเรียกใช้ได้เลยจากตัวโปรแกรม MATLAB ซึ่งง่ายต่อการออกแบบโดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมมากนัก [15] สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมจะพิจารณาแผนภาพบล็อกไดอะแกรม แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กระบวนการค้นหาค่าด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

จากรูปที่ 6 เป็นกระบวนการค้นหาอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (1) มาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งจะอยู่ในรูปของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด ( $w$ ) แสดงได้ดังสมการที่ (5)

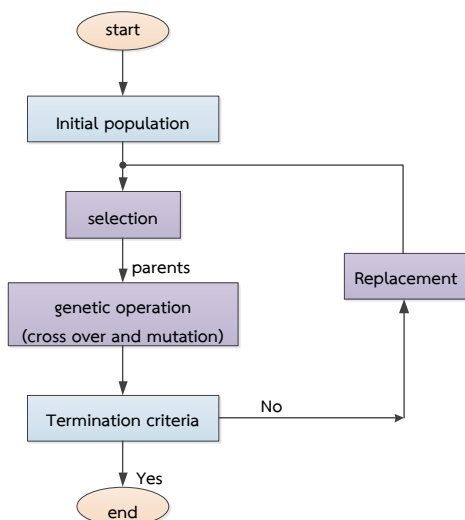
$$W = f(T_r, T_s, P.O.) = aT_r + bT_s + cP.O. \quad (5)$$

เมื่อ  $P.O.$  = คือค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันพุ่งเกิน ( $V_{dc}$ )

$T_r$  = คือค่าช่วงเวลาขึ้นของแรงดัน ( $V_{dc}$ )

$T_s$  = คือค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของแรงดัน ( $V_{dc}$ )

ในบทความนี้กำหนดให้ค่า  $a, b$  และ  $c$  มีค่าเท่ากับ 0.33, 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ กระบวนการค้นหาด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแสดงแผนผังการทำงาน (flow chart) ได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

จากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวควบคุมพีไอ  $K_{pe}$ ,  $K_{ie}$ ,  $K_{pi}$ , และ  $K_{ii}$  ให้มีค่าเท่ากับ  $[0.001 \ 1]$ ,  $[1 \ 10]$ ,  $[0.01 \ 2]$  และ  $[20 \ 2000]$  ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดให้โครโมโซมประชากร

และการเข้ารหัสเป็นค่าจริง

ขั้นตอนที่ 3: กำหนดขนาดของโครโมโซมของประชากรเท่ากับ 50 โครโมโซม

ขั้นตอนที่ 4: กำหนดค่าเริ่มต้นของประชากร โดยการสุ่มค่าจนได้ค่าที่อยู่ในช่วงขอบเขตการค้นหา

ขั้นตอนที่ 5: กำหนดจำนวนรุ่นสูงสุดของลูกหลานเท่ากับ 50 รุ่น

ขั้นตอนที่ 6: กำหนดให้กระบวนการคัดเลือกทางสายพันธุ์เป็นแบบการ फैนสุ่มแบบสม่ำเสมอ (stochastic uniform) การกลายพันธุ์แบบเกาส์เซียน (Gaussian mutation) และการครอสโอเวอร์แบบกระจัดกระจาย (scattered crossover)

## 5. ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

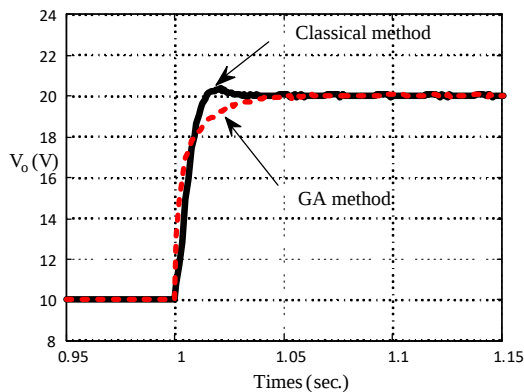
จากการออกแบบโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม และการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ได้ผลการค้นหาพารามิเตอร์  $K_{pe}$ ,  $K_{ie}$ ,  $K_{pi}$ , และ  $K_{ii}$  ของตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีดั้งเดิมและอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

| พารามิเตอร์<br>ของตัว<br>ควบคุม | วิธีการออกแบบ |                             |
|---------------------------------|---------------|-----------------------------|
|                                 | วิธีดั้งเดิม  | อัลกอริทึมเชิง<br>พันธุกรรม |
| $K_{pv}$                        | 0.118         | 0.0644                      |
| $K_{iv}$                        | 6.4           | 8.1945                      |
| $K_{pi}$                        | 0.256         | 1.3616                      |
| $K_{ii}$                        | 128           | 1013.8                      |
| $w$                             | 3.0433        | 0.66                        |

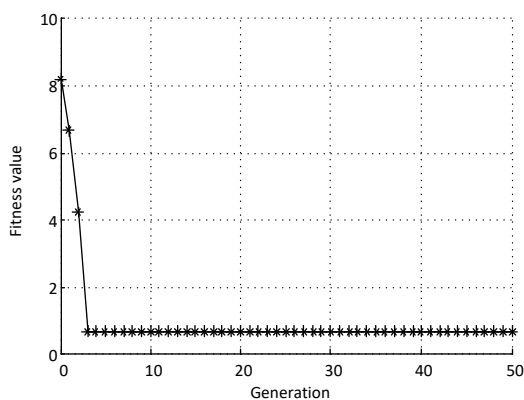
จากตารางที่ 1 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ทำให้ได้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด ( $w$ ) ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม และวิธีดั้งเดิม จะจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสขนานกัน ( $V_{dc}$ ) โดยให้มีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า  $V_{dc}^*$

จาก 10 V เป็น 20 V ที่เวลา 1 วินาที ได้ผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 8 และผลการหาค่าตอบของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด ( $w$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า  $V_{dc}$

จากรูปที่ 8 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสขนานกัน ( $V_{dc}$ ) ได้ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ซึ่งหมายถึงให้ช่วงเวลาขึ้น (Rise-time) และเวลาเข้าที่ของแรงดัน (Settling-time) ที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกินของแรงดัน (Percent Overshoot) น้อยกว่า แสดงการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 9 ผลหาค่าตอบจากอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบช่วงเวลาขึ้น และเวลาเข้าที่ของแรงดัน และส่วนที่พุ่งเกินของแรงดัน

| ผลการตอบสนองในโดเมนเวลา | วิธีการออกแบบ |                         |
|-------------------------|---------------|-------------------------|
|                         | วิธีดั้งเดิม  | อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม |
| $T_r$ (sec.)            | 1.035         | 1.01                    |
| $T_s$ (sec.)            | 1.064         | 1.04                    |
| P.O.(%)                 | 20.15         | 0                       |

## 6. สรุปผล

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน โดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสม จากผลลัพธ์ของการออกแบบตัวควบคุมจะเห็นได้ว่า การออกแบบตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม มีผลการตอบสนองทางพลวัตของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่น่าเสนอจึงเหมาะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด ดังนั้น การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม มีข้อดีและเป็นประโยชน์อย่างมาก สำหรับวิศวกรในการออกแบบตัวควบคุมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยในอนาคตจะออกแบบตัวควบคุมสำเร็จรูป ที่ไม่ต้องคอยมาปรับจูนที่ตัวควบคุม มากนัก

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] Sasiya U, Kongpan A, Kongpol A. Power loss identification of three-phase induction motor using adaptive tabu search. 5<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress. March, 8-10, 2017, Pattaya, Thailand.

- [2] Apichai S, Kongpan A, Kongpol A. A controller design of more electric aircraft power systems using an adaptive tabu search algorithm. 5<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress. March, 8-10, 2017, Pattaya, Thailand.
- [3] Tosaporn N, Kongpan A, Kongpol A. Design of an active power filter using genetic algorithm technique. The 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases. February, 20-22, 2010, Cambridge, United Kingdom.
- [4] Wiphusana C. The optimal controller design of boost converter using a genetic algorithm. Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology. 2016;393-6. (in Thai).
- [5] Nonthanan P, Pracha K. Particle swarm optimization for energy management based on grid-connected photovoltaic - battery hybrid system. The 42<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference. 2019;53-6. (in Thai).
- [6] Kulsomsup Y, Yutthana K, Krischonme P, Nadarajah M. Optimal sizing and location of the charging station for plug-in electric vehicles using the particle swarm optimization technique. 6<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress. 2018;400-3.
- [7] Anuthita L, Satthapoom T, Danupon K. Optimization of I-PD controller for a FOLIPDT plant model using cuckoo search. The 42<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference. 2019;257-60. (in Thai).
- [8] Kasem N, Silawat R, Kittisak S. Modified whale optimization algorithm for optimal reactive power dispatch with considering load uncertainty. The 42<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference. 2019; 61-64. (in Thai).
- [9] Emadi A. Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging method. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 2004;51(3):661-8.
- [10] Sarwar A, Shahid A, Hudaif A, Gupta U, Wahab M. Generalized state-space model for an n-phase interleaved buck-boost converter. 4<sup>th</sup> IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics. October, 26-28, 2017, Mathura, India.
- [11] Azer P, Emadi, A. Generalized state space average model for multi-phase interleaved buck, boost and buck-boost DC-DC converters: transient, steady-state and switching dynamics. IEEE Access. 2020;77735–77745.
- [12] Wiphusana C, Kongpol A, Kongpan A. The dynamic model of electrical aircraft system feeding a buck-boost converter. 5<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017), March, 8-10, 2017, Pattaya, Thailand.
- [13] Tsang K.M, Chan W.L. Cascade controller for DC/DC buck convertor. IEE Proc.- Electr. Power. 2005;152(4):827-31.
- [14] Suthep S. Analysis and design of paralleling synchronous buck for low voltage high current DC-DC converter. Master of Engineering in Electrical Engineering Thesis. King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. 2006. (in Thai)
- [15] Arthit S. Computational Intelligence. 1<sup>th</sup> ed. Suranaree University of Technology; 2009. (in Thai)

# การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผสมผักตบชวากับปุ๋ยอินทรีย์

วีรศักดิ์ หมู่เจริญ<sup>1\*</sup>

weerasak.m@en.rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 15-Feb-2022 |
| Revised  | : 28-Apr-2022 |
| Accepted | : 6-May-2022  |

## บทคัดย่อ

การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผสมผักตบชวากับปุ๋ยอินทรีย์ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำผักตบชวาซึ่งเป็นวัชพืชมานำมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยนำมาสับย่อยแล้วผสมกับปุ๋ยอินทรีย์เพื่อทำปุ๋ย ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ โครงสร้าง ชุดสับย่อยใช้ใบมีดหลักจำนวน 2 ใบทำมุม 30 องศา ใบมีดชุดย่อย 6 ใบ และชุดผสม ใช้เครื่องยนต์เบนซินเล็กขนาด 5.5 แรงม้า ร่วมกับชุดเกียร์ อัตราทด 1:60 เป็นต้นกำลังร่วมกับการผสมเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของชุดสับย่อย 550 750 และ 950 รอบต่อนาที ตามลำดับ เพื่อศึกษาสมรรถนะการทำงานของเครื่องต้นแบบ จากการทดสอบพบว่าอัตราการสับย่อยและสมรรถนะของเครื่องจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบซึ่งเครื่องสับย่อยมีสมรรถนะสูงสุดที่ 950 รอบต่อนาที สามารถสับย่อยผักตบชวาได้ 16.7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพของเครื่องคือ 92.8 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 0.71 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม พบว่าต้นทุนของการผลิตปุ๋ยผสมจากเครื่องสับย่อยผักตบชวาผสมปุ๋ยอินทรีย์คือ 0.243บาท/กิโลกรัม และมีระยะเวลาคืนทุน 2.9 ปี

**คำสำคัญ:** ผักตบชวา เครื่องสับย่อย เครื่องผสม

# Design and Fabrication of Mixing and Chopping Machine for Water Hyacinth and Organic Fertilizer

Weerasak Moocharoen<sup>1\*</sup>  
weerasak.m@en.rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Agricultural Engineering Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 15-Feb-2022 |
| Revised  | : 28-Apr-2022 |
| Accepted | : 6-May-2022  |

## Abstract

Design and Build a Water Hyacinth Mixing Shredder with Organic Fertilizer The objective is to bring water hyacinth, which is a weed, to use it to benefit by chopping it down and mixing it with organic fertilizer to make fertilizer. The prototype built has three main parts: the structure, the sub-chopper uses two main blades at a 30-degree angle, six sub-blades, and the blender uses a small 5.5-horsepower gasoline engine with a gear ratio. Computing 1:60 is the power source with the mix. Change the rotational speed of the sub chopper 550, 750 and 950 rpm, respectively. To study the performance of the prototype The test showed that the shredding rate and the performance of the machine increase with the rotational speed at which the shredder has a maximum efficiency of 950 rpm. It can chop 16.7 kg of water hyacinth per hour. The efficiency of the machine is 92.8 percent with a fuel consumption of 0.71 liters per hour. Engineering Economic Analysis It was found that the cost of production of compound fertilizer from water hyacinth shredder mixed with organic fertilizer was 0.243 baht/kg and has a payback period of 2.9 years.

**Keywords:** Water Hyacinth, Shredders, Mixer

## 1.บทนำ

ผักตบชวามีรูปที่ 1 มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Eichhornia crassipes* Solms ชื่อสามัญว่า Water Hyacinth อยู่ในวงศ์ Pontederiaceae เป็นพืชน้ำประเภทใบเลี้ยงเดี่ยว เป็นพืชที่เจริญอยู่บนผิวน้ำ จัดเป็นประเภทลอยน้ำ (floating plant) โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดินลอยน้ำได้โดยไม่ต้องมีที่ยึดเกาะสามารถแพร่พันธุ์ได้รวดเร็วมาก แผ่นใบคล้ายรูปหัวใจเป็นมันหนา ก้านใบพองออกตรงช่องกลาง ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุนช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้จึงถูกกระแสน้ำหรือน้ำพัดพาไปได้ไกล ๆ แต่ถ้าน้ำตื้นแล้วรากสามารถหยั่งยึดติดกับพื้นดินได้ลักษณะทรงต้น



รูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของผักตบชวา [1]

ออกดอกปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน และแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วจนกลายเป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำทั่วไป ผักตบชวาเป็นพืชที่มีความสามารถพิเศษในการสร้างโครงสร้างที่กว้าพีชอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น ในพื้นที่หนึ่งไร่ ผักตบชวาสามารถสร้างสารอินทรีย์ (แห้ง) ได้ถึง 24 ตันต่อปี เราสามารถสังเกตการยึดของก้านใบหรือไหลภายในเวลา 1 ชั่วโมง จึงเป็นสาเหตุทำให้ผักตบชวาระบาดแผ่กระจายอาณาเขตในแหล่งน้ำได้อย่างรวดเร็วกว่าพืชชนิดอื่นๆ ผักตบชวาเป็นวัชพืชที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยขวางทางน้ำในแม่น้ำลำคลอง อีกทั้งยังมีผลต่อสัตว์น้ำเนื่องจากผักตบชวาที่มีความหนาแน่นจะไปปิดบังแสงแดดทำให้น้ำตามแหล่งนั้นขาดออกซิเจนส่งผลให้เกิดการเน่าเสีย ซึ่งกระทบต่อสัตว์น้ำโดยตรงการนำผักตบชวามาใช้ให้เกิดประโยชน์จำเป็นจะต้องมี

การสับย่อยเพื่อลดขนาดลงก่อน โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องสับย่อย เช่น เครื่องย่อยใบไม้กิ่งไม้ [2] ออกแบบ 3 ส่วนได้แก่ ชุดป้อนวัตถุดิบเข้า, ชุดหั่นตัด ย่อยประกอบด้วยใบมีดตัดและหัน 2 ใบ มุมคมตัด 30 องศา ติดตั้งในแนวรัศมีและชุดใบมีดย่อยเชื่อมติดตายตัวแบบฟันปลา จำนวน 3 ชุดๆละ 12 ใบ วางทำมุม 120 องศา มุมคมตัด 70 องศา หมุนด้วยความเร็วรอบ 360 รอบต่อนาที และชุดส่งกำลังใช้เครื่องยนต์อเนกประสงค์ 4 จังหวะขนาด 9 แรงม้า ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่อง พบว่าเครื่องสามารถย่อยใบไม้สดขนาด 100-200 มิลลิเมตร ได้น้ำหนักเฉลี่ย 18.7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ย่อยใบไม้แห้งขนาด 100-200 มิลลิเมตรได้น้ำหนักเฉลี่ย 13.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ย่อยกิ่งไม้สดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 40 มิลลิเมตร ได้น้ำหนักเฉลี่ย 60.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ย่อยกิ่งไม้แห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 40 มิลลิเมตร ได้น้ำหนักเฉลี่ย 42.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และใช้วิธีการประเมิน แบบ IOC ทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องจากผู้เชี่ยวชาญ 15 ท่าน มีความเห็นสอดคล้องกันว่าเครื่องที่สร้างขึ้นมีคุณภาพและประสิทธิภาพในการย่อยใบไม้ กิ่งไม้ ได้ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย แต่ยังไม่ได้ออกแบบเพื่อให้กิ่งไม้ที่ถูกสับย่อยเพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการอื่นต่อไปได้ งานวิจัยเครื่องหั่นผักตบชวา [3] ซึ่งออกแบบเครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรม Auto CAD ใช้มอเตอร์ 2 แรงม้าเป็นต้นกำลัง ที่ความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาทีและมีชุดใบมีด 2 ชุดวางห่างกันเป็นระยะ 5 ซม. หมุนเพื่อหั่นผักตบชวา ผลการทดลองพบว่าเครื่องต้นแบบนี้สามารถหั่นผักตบชวาเฉลี่ย 18.8 กิโลกรัมภายในเวลา 5 นาที ทดสอบ 5 ครั้ง มีเศษผักตบชวาที่มีขนาดไม่เกิน 5 ซม. เฉลี่ย 7.88 กิโลกรัม (42.15 เปอร์เซ็นต์) และเศษผักตบชวาที่มีขนาดเกิน 5 ซม. เฉลี่ย 10.92 กิโลกรัม (57.85 เปอร์เซ็นต์) แต่ก็ยังพบว่าไม่ได้ออกแบบเพื่อให้ผักตบชวาที่ถูกสับย่อยเพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ต่อไปได้ การพัฒนาเครื่องย่อยและอัดหญ้าอาหารสัตว์ [4] มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงาน ช่วยประหยัดเวลาและแรงงานคนในการย่อยและอัด ประกอบด้วย 4 ส่วน

คือ โครงเครื่องชุดย่อยหญ้า ชุดอัดหญ้าและระบบ ถ่ายทอดกำลัง ใช้มอเตอร์ 4 แรงม้า เป็นต้นกำลังในการทำงานของเครื่อง ทดสอบที่ความเร็วรอบ 870 รอบต่อนาที โดยศึกษามุมองศาใบมีด 3 ระดับเพื่อหามุมองศาที่ดีที่สุด ผลทดสอบพบว่า ที่มุมองศา 5 องศา เป็นมุมที่ใบมีดกระทำกับหญ้าได้ดีที่สุด ความสามารถของเครื่อง 127.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3.8 กิโลวัตต์ชั่วโมงและผลการวิเคราะห์ทาง เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่า จุดคุ้มทุนในการทำงานที่ 374 ชั่วโมงต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 0.63 ปี จากการ ทำงาน 600 ชั่วโมงต่อปี ก็ยังพบว่าไม่ได้ออกแบบเพื่อให้หญ้าที่ถูกสับย่อยและอัดหญ้าเพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบ ในกระบวนการผสมกับสารอาหารของสัตว์ต่อไปได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเรื่อง การออกแบบและ สร้างเครื่องสับย่อยเศษพืชในครัวเรือน [5] ซึ่งมี วัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาเศษวัสดุจากครัวเรือนหลังใช้ ทำอาหาร มีขนาดไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ทางเกษตรกรรมและพลังงานทดแทนจำเป็นต้องทำให้ ขนาดเล็กลง โดยใช้หลักการของแรงเฉือนและทดสอบ สมรรถนะการตัดวัสดุ ด้วยการออกแบบการทดลองเพื่อ หาความเหมาะสมของความเร็วรอบ 5 ค่า และความชัน ของเศษวัสดุที่มีต่อร้อยละของวัสดุที่ถูกตัดให้มีขนาด เล็กได้ พบว่า ที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมของเครื่องคือ 763 รอบต่อนาที สามารถตัดวัสดุได้ขนาดเล็ก 46.2-120.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมงคิดเป็นร้อยละ 65.0 อยู่ใน ระดับดีซึ่งมากกว่า ร้อยละ 50 เป็นไปตามวัตถุประสงค์ การออกแบบ และ ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้เท่ากับ 0.001-0.003 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ก็ยังพบว่า ไม่ได้ออกแบบเพื่อให้เศษพืชในครัวเรือนที่ถูกสับย่อย เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผสมกับปุ๋ย อินทรีย์ต่อไปได้ การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อย ผักตบชวา[6] ใช้เครื่องยนต์เกษตรชนิดเบนซินขนาด 6.5 แรงม้า เป็นต้นกำลัง ออกแบบใบมีดจำนวน 2 ใบ ติดตั้งตรงข้ามกันมีขนาดมีความกว้าง 73 มิลลิเมตร ความยาว 180 มิลลิเมตร ทำมุม 5 องศากับหัวสับชนิด จานกลม โดยความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับเครื่องสับ ย่อยผักตบชวา เท่ากับ 2,000 รอบต่อนาที เวลาเฉลี่ย ในการสับย่อยเท่ากับ 28.65 วินาที มีขนาดของ

ผักตบชวาที่ถูกสับย่อย เฉลี่ยเท่ากับ 13.45 มิลลิเมตร สมรรถนะสูงสุดของเครื่องมีค่าเท่ากับ 628.27 กิโลกรัม ต่อชั่วโมง และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด เท่ากับ 96.46 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าขนาดชิ้นส่วนของ ผักตบชวาที่ผ่านการสับย่อยด้วยเครื่องสับย่อย ผักตบชวาที่ออกแบบมีขนาดน้อยกว่า 4 เซนติเมตร สามารถนำไปทำปุ๋ยหมักได้ แต่ก็ยังพบว่าไม่ได้ออกแบบ เพื่อให้ผักตบชวาที่ถูกสับย่อยเพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบใน กระบวนการผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ในทันที เครื่องหั่นย่อย สลายทางปาล์ม[7] พบว่าการทำงานของเครื่องนี้มี ประสิทธิภาพมาก มีใบมีดจำนวน 4 ใบมีด อยู่บนโครง แกนเพลาลูกผ่านศูนย์กลาง 1.2 นิ้ว ความกว้างของ ใบมีด 95 มิลลิเมตรความยาวของพื้นที่ในการตัดหรือ ความยาวของใบมีด 240 มิลลิเมตร และตัวใบมีดจะมี การชุบแข็ง ใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ก่อนที่จะมีการตัดจะมีตัวบดก่อนเพื่อกระแทกให้ทาง ปาล์มขนาดเล็กลง เพื่อจะช่วยให้ในการตัดทางปาล์ม ง่ายขึ้น ในการใช้เครื่องนี้ในการย่อยสลายทางปาล์ม จะ เป็นการช่วยทุ่นแรงและประหยัดเวลาได้เยอะกว่าการใช้คนในการสับทางปาล์มแต่ก็ยังพบว่าไม่ได้ออกแบบ เพื่อผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ในทันทีเช่นกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมี แนวคิดที่จะออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยผสม ผักตบชวากับปุ๋ยอินทรีย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลด ขนาดผักตบชวาให้เล็กลงพร้อมเข้าสู่กระบวนการผสม เพื่อทำปุ๋ยหมัก[8] เนื่องจากปัญหาการทำปุ๋ยอินทรีย์คือ ถ้าใช้ผักตบชวาที่มีขนาดเป็นกอใหญ่ซึ่งโครงสร้าง ประกอบด้วย น้ำ 70-80 เปอร์เซ็นต์ มาทำเป็นส่วนผสม กับปุ๋ยอินทรีย์ ต้องใช้เวลาหลายเดือนจึงจะใช้เป็นปุ๋ยได้ ซึ่งถ้าใช้เทคโนโลยีเครื่องจักรกลเกษตรมาลดขนาดของ ผักตบชวาจะสามารถลดระยะเวลาในการผลิตปุ๋ย อินทรีย์ที่มีส่วนผสมของผักตบชวาลงได้ อีกทั้งจะเป็น การช่วยกำจัดวัชพืชที่ส่งผลกระทบต่อแม่น้ำลำคลอง เป็นการนำผักตบชวามาสรางมูลค่าเพิ่มด้วยต้นทุนต่ำ และลดงบประมาณของหน่วยงานราชการที่ต้องเสียไป กับการกำจัดผักตบชวาอีกด้วย

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 ศึกษาข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบเครื่องต้นแบบ

#### 2.1.1 ศึกษาปัญหาและขั้นตอนในการลดขนาดผักตบชวาสด

ศึกษาถึงปัญหาและข้อมูลในการลดขนาดผักตบชวาสดของเกษตรกรในการนำมาผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ เพื่อใช้วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม จากการศึกษาข้อมูลในการทำปุ๋ยผสมพบว่าขนาดของผักตบชวาสดจะมีผลต่อระยะเวลาการทำปุ๋ยผสมอินทรีย์ ซึ่งถ้าขนาดของผักตบชวามีขนาดใหญ่จะทำให้ต้องใช้เวลาในการหมักเพื่อทำปุ๋ยผสมอินทรีย์นาน ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการทำปุ๋ยผสมอินทรีย์ จึงจำเป็นต้องสับลดขนาดของผักตบชวาสดลง

#### 2.1.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของผักตบชวาสด

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของผักตบชวาสด ซึ่งพบว่ามีลักษณะต้นและใบ รูปทรงคล้ายทรงกรวยโคนจะใหญ่เรียวเล็กไปหาส่วนใบ ดังรูปที่ 2



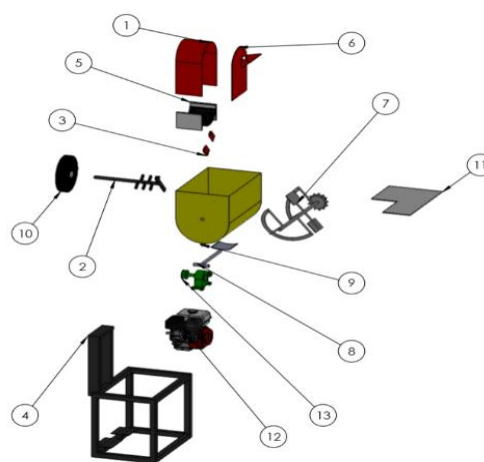
รูปที่ 2 ลักษณะลำต้นของผักตบชวาสด

เมื่อหั่นลำต้นแบบตามขวางลำต้นจะมีลักษณะเป็นเส้นใยคล้ายฟองน้ำ เป็นรูปวงรี สีของผักตบชวามีสีเขียวตรงปลายลำต้นหรือก้าน การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผักตบชวาสด ได้แก่ ความยาวของลำต้น หรือก้าน ใบ ความกว้างลำต้นบริเวณโคนต้นและปลายลำต้นด้านที่ติดใบ สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ ผลการศึกษาผักตบชวาสดจากคลองรังสิตพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่โคนต้นมีค่าเฉลี่ย 2.8

เซนติเมตร บริเวณปลายมีค่าเฉลี่ย 0.9 เซนติเมตร และความยาวก้านใบ 70.5 เซนติเมตร โดยจะนำข้อมูลนี้ไปใช้ออกแบบและสร้างเครื่อง

#### 2.2 การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยและผสมผักตบชวาสด

ข้อมูลจากหัวข้อ 2.1 ถูกใช้ในการออกแบบเครื่องต้นแบบ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ช่วยในการออกแบบก่อนที่จะสร้างเครื่องเพื่อหาขนาดและความเหมาะสมในการติดตั้งชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆของเครื่อง แบบของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องสับย่อยและผสมผักตบชวาสดที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

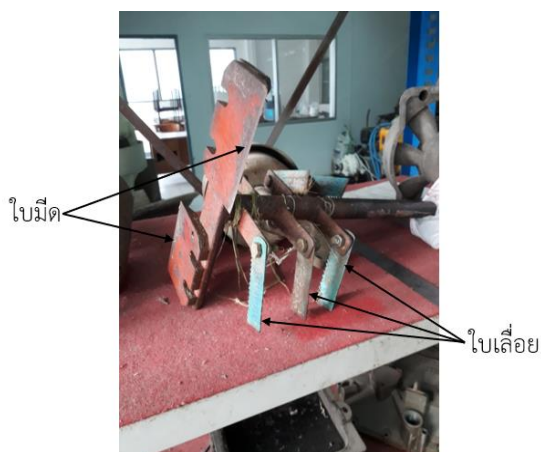
#### ตารางที่ 1 ชิ้นส่วนเครื่องสับย่อยและผสมผักตบชวาสด

| หมายเลขชิ้นส่วน | ชื่อชิ้นส่วน      | หมายเลขชิ้นส่วน | ชื่อชิ้นส่วน                                     |
|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------------------|
| 1               | กล่องชุดตัด       | 8               | แผ่นกันถังผสม                                    |
| 2               | แกนใบมีด          | 9               | ถังผสม                                           |
| 3               | ใบมีด ชนิด AUG 11 | 10              | พู่เลย์ 10 นิ้ว                                  |
| 4               | โครงเครื่อง       | 11              | ฝาปิดถังผสม                                      |
| 5               | ตะแกรงกรอง        | 12              | เครื่องยนต์เล็ก<br>เบนซิน ดิตพู่เลย์<br>3.5 นิ้ว |
| 6               | ฝาปิดชุดตัด       | 13              | เกียร์ทด<br>(อัตราทด 1 : 60)                     |
| 7               | แกนผสม            |                 |                                                  |



รูปที่ 4 เครื่องสับย่อยและผสมผักตบชวาสด

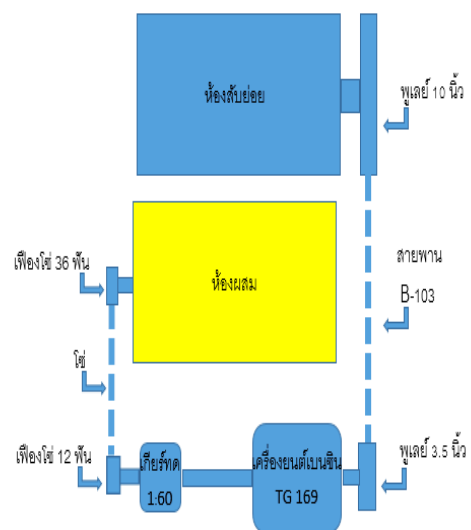
เนื่องจากในการลดขนาดผักตบชวาสดจะกระทำครั้งละหลายๆต้นเพื่อความรวดเร็วในการทำงาน ดังนั้นช่องที่ใส่ผักตบชวาสดที่ออกแบบและสร้างจึงกำหนดขนาด 240 x 90 x 60 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 ใบมีดที่ใช้ตัดเฉือนผักตบชวาสด ใช้ใบมีด 2 ใบ ซึ่งติดกับแกนเพลลา ใบมีดทั้งสองจะวางทำมุมกัน 180 องศาในแนวรัศมี ใบมีดแต่ละใบทำมุม 30 องศา กับแนวระนาบเพื่อลดแรงต้านและเพิ่มแรงตัดเฉือนผักตบชวา มีการเสริมใบตีแบบฆ้อน (Hammer mill) ซึ่งสร้างขึ้นจากใบเลื่อยเล็กฝั่มละ 3 ใบทำมุม 90 องศา กับแกนเพลลา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสับย่อย ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ใบมีดตัดเพื่อลดขนาดผักตบชวาสด

การทำงานของเครื่องสับย่อยและผสมผักตบชวาสด เริ่มจากนำลำต้นผักตบชวาสดใส่ลงไปทางช่องป้อน ของเครื่องซึ่งใช้ต้นกำลังจากเครื่องยนต์เกซตร ชนิดเบนซิน 5.5 แรงม้า ส่งกำลังผ่านมูเลย์ขับ 9.0 เซนติเมตร (3.5 นิ้ว) โดยสายพานร่อนวี ชนิด B-103 ยาว 270 เซนติเมตร (103 นิ้ว) ไปยังมูเลย์ตาม 25 เซนติเมตร (10 นิ้ว) ของแกนเพลลาใบมีด ในอัตราทด 2.85 ใบมีดทั้งสองจะหมุนในแนวตั้งและตัดเฉือนผักตบชวาสดเมื่อถูกลดขนาดแล้วจะตกลงผ่านช่องตะแกรงขนาด 2 ตารางเซนติเมตร ลงถังผสมด้านล่างของเครื่องเพื่อผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ ถังผสมนี้จะมีใบกวนคลุกเคล้าให้ผักตบชวาสดที่ถูกลดขนาดแล้วผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งแรงที่ใช้กวนผสมมาจากต้นกำลังเดียวกันกับที่ลดขนาดของผักตบชวาสด

## 2.3 องค์ประกอบกลไกการสับ ย่อย และผสมปุ๋ยอินทรีย์



รูปที่ 6 กลไกการสับ ย่อย และผสมปุ๋ยอินทรีย์

## 2.4 วิธีการทดสอบ

การทดสอบเครื่องสับย่อยและผสมผักตบชวาสด เพื่อหาสมรรถนะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่อง โดยทดสอบที่ความเร็วรอบของเพลลาขับใบมีด 550 750 และ 950 รอบต่อนาที รอบละ 3 ครั้ง วิธีทดสอบเป็นดังนี้

1) เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับทดสอบ ได้แก่ เครื่องวัดความเร็วรอบ นาฬิกาจับเวลา ไม้บรรทัด ภาชนะบรรจุ และตาชั่งน้ำหนัก

2) เดินเครื่องลดขนาดผักตบชวาสด ใช้เครื่องมือวัดความเร็วรอบ (Hand tachometer) วัดความเร็วรอบที่เพลาชับใบมีด เพื่อให้ได้ความเร็วรอบ 550 รอบต่อนาทีทดสอบ 3 ครั้ง

3) นำผักตบชวาสดหนัก 300 กรัม ใส่ลงในช่องบ่อนขณะเครื่องทำงานด้วยความเร็วบ่อนด้วยมือบันทึกผล น้ำหนักผักตบชวาที่ย่อยผ่านตะแกรงต่อเวลา

4) ทำการตรวจสอบคุณภาพของขนาดผักตบชวาสดบันทึกผล ขนาดผักตบชวาที่ถูกสับรูดผ่านตะแกรงขนาด 2 ตารางเซนติเมตร

5) บันทึกปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ (ลิตรต่อชั่วโมง)

6) ทำการทดสอบตามข้อ 2 ถึง 5 โดยปรับความเร็ว 750 และ 950 รอบต่อนาที ตามลำดับ

7) นำผลการทดสอบมาคำนวณค่าสมรรถนะของเครื่องสับย่อยผักตบชวาสด ประสิทธิภาพการลดขนาดผักตบชวาสดที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบต่างๆ

7.1 สมรรถนะของเครื่องสับย่อยผักตบชวาสด  

$$= \frac{\text{น้ำหนักผักตบชวาที่บ่อน (กิโลกรัม)}}{\text{เวลาการทำงาน (ชั่วโมง)}} \quad (1)$$

7.2 ประสิทธิภาพประสิทธิภาพการลดขนาดผักตบชวาสด ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ  

$$= \frac{\text{น้ำหนักผักตบชวาสดที่ผ่านตะแกรงร่อน (กิโลกรัม)}}{\text{น้ำหนักผักตบชวาที่บ่อน (กิโลกรัม)}} \times 100 \quad (2)$$

7.3 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบต่างๆ  

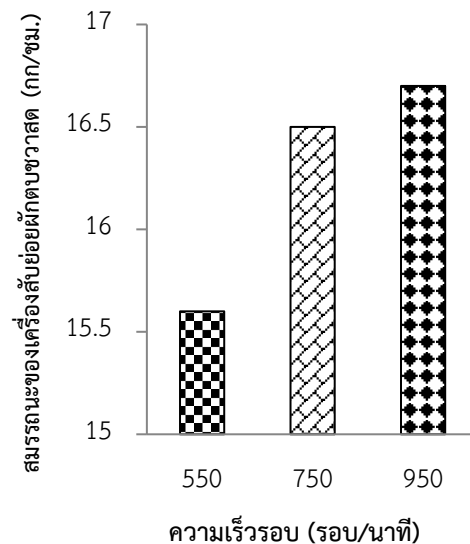
$$= \frac{\text{ปริมาตรก่อนการใช้ - ปริมาตรหลังการใช้ (ลิตร)}}{\text{เวลา (ชั่วโมง)}} \quad (3)$$

### 3. ผลและวิจารณ์

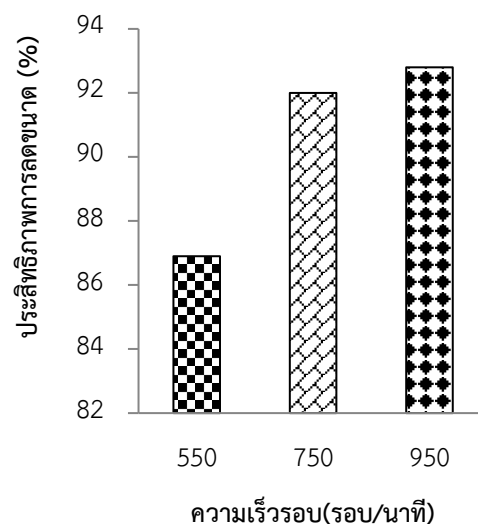
#### 3.1 ผลการทดสอบเครื่องสับย่อยและผสมผักตบชวา

จากการทดสอบพบว่า ปริมาณผักตบชวาสดที่ถูกลดขนาด โดยใช้เครื่องยนต์และเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเป็น 550 750 และ 950 รอบต่อนาที มี

ความสามารถในการลดขนาดเฉลี่ยผักตบชวาสดได้ 260 276 และ 278.3 กรัมต่อนาที (15.6 16.5 และ 16.7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 สมรรถนะของเครื่องสับย่อยผักตบชวาสด



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการลดขนาดผักตบชวาสดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

จะเห็นว่า ถ้าใช้ความเร็วสูงขึ้น จะทำให้ใบมีดของเครื่องลดขนาดผักตบชวาสดได้มากขึ้นเป็นผลเนื่องจากใช้ความเร็วรอบมากขึ้น ดังนั้นที่ความเร็วรอบ 550 750 และ 950 รอบต่อนาที สามารถลดขนาดผักตบชวาสดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 86.9 92 และ 92.8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 9 ส่วนที่ถูกสับย่อยไม่ผ่านตะแกรง 2 ตร.ซม.



รูปที่ 10 ส่วนที่ถูกสับย่อยผ่านตะแกรง 2 ตร.ซม.

### 3.2 ผลการทดสอบเครื่องผสมผักตบชวากับปุ๋ยอินทรีย์

จากการทดสอบเครื่องผสมผักตบชวากับปุ๋ยอินทรีย์ ที่ความเร็วรอบ 550 750 และ 950 รอบต่อนาที พบว่าเวลาที่เครื่องผสมใช้เพื่อการเข้ากันได้ดีคือ 45 30 และ 18 วินาที ตามลำดับ โดยผสมปุ๋ยอินทรีย์ในสัดส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก หลังจากสับย่อยปล่อยลงถังผสมแล้ว สังเกตจากสายตาพบว่าการผสมเข้ากันได้ดีในทุกรอบความเร็ว ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดจะพลิกตัวและผสมกันได้อย่างทั่วถึงเป็นผลให้ปุ๋ยผสมมีคุณภาพดีขึ้น[8]



รูปที่ 11 ปุ๋ยผสมระหว่างผักตบชวาสับกับปุ๋ยอินทรีย์

### 3.3 ผลการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เกษตรชนิดเบนซินที่ใช้เป็นต้นกำลัง พบว่าที่ความเร็วรอบ 550 750 และ 950 รอบต่อนาที มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 0.54 0.625 และ 0.71 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์

### 3.4 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ทางวิศวกรรมการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ [9]

ต้นทุนในการสร้างเครื่องพิจารณาจากค่าใช้จ่ายและการทำงานของเครื่องจากต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน ดังนี้

#### 3.4.1 ต้นทุนคงที่ จากสมการค่าเสื่อมราคาต่อปี แบบ straight line method

$$\text{ค่าเสื่อมราคา, } DP = (P-S)/L \quad (4)$$

พิจารณา : ต้นทุนทรัพย์สิน (P) = 15,000 บาท อายุการใช้งานของเครื่อง (L) 5 ปี ให้มูลค่าซาก (S) ของเครื่องย่อยผสมผักตบชวาปุ๋ยอินทรีย์ คงเหลือ 10 % ของราคาต้นทุนเครื่อง เท่ากับ 1,500 บาท แทนค่าในสมการ (4) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\text{ค่าเสื่อมราคา} &= (15,000 - 1,500) / 5 \\ \text{เท่ากับ } 2,700 \text{ บาท} \\ \text{ค่าเสียโอกาสหรือค่าดอกเบี้ย(ต่อปี),} &= \\ &((P+S)/2) \times (i/100) \quad (5)\end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ (5) จะได้ว่า

ค่าเสียโอกาสหรือค่าดอกเบี้ย(ต่อปี)  
 $((15,000 + 1,500) / 2) \times (5 / 100) = 412.5$  บาทต่อปี  
 หมายเหตุ ใช้อัตราดอกเบี้ยธนาคารพาณิชย์ (i) ร้อยละ 5.0 ต่อปี  
 รวมต้นทุนคงที่ต่อปี คือ ค่าเสื่อมราคา + ค่าเสียโอกาสหรือค่าดอกเบี้ย =  $2,700 + 412.5 = 3,112.5$  บาทต่อปี

### 3.4.2 ต้นทุนแปรผัน

ประกอบด้วยค่าบำรุงรักษา และค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ที่ใช้ไม่คิดค่าแรงงาน เนื่องจากสร้างเครื่องเพื่อช่วยในการทำงานให้ง่ายขึ้นและแก้ปัญหการย่อยที่มีปริมาณมาก ค่าบำรุงรักษา คิดเฉลี่ยวันละ 30 บาทต่อวัน ทำงาน 100 วัน คิดเป็น  $30 \times 100 = 3,000$  บาทต่อปี รวมต้นทุนแปรผันต่อปี คือ ค่าบำรุงรักษา + ค่าน้ำมันเบนซิน =  $3,000 + 36,500 = 39,500$  บาทต่อปี

### 3.4.3 รวมต้นทุนดำเนินงาน

ทั้งหมด

ในหนึ่งปีคือ  
 ต้นทุนคงที่ + ต้นทุนแปรผัน =  $3,112.5 + 39,500 = 42,612.5$  บาทต่อปี

### 3.4.4 คำนวณต้นทุนต่อหน่วย

การผลิต

เพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกกระบวนการผลิต เครื่องทำงานวันละ 4 ชั่วโมง (ทำงาน 1 ปี หรือ 365 วัน หรือคิดเป็น 1,460 ชั่วโมง เครื่องย่อยผักตบชวาผสมปุ๋ยอินทรีย์เฉลี่ยได้ 120 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยเท่ากับ  $(42,612.5 \text{ บาท}) / (1,460 \text{ ชั่วโมง} \times 120 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}) = 0.243$  บาทต่อกิโลกรัม ดังนั้นต้นทุนของการผลิตปุ๋ยผสมจากเครื่องย่อยผักตบชวาผสมปุ๋ยอินทรีย์ต่อ 1 กิโลกรัม เท่ากับ 0.243 บาท ระยะเวลาในการคืนทุน

เท่ากับ ต้นทุนดำเนินงานทั้งหมด (บาท)ต่อผลประโยชน์สุทธิ ที่ได้รับจากการทำงานใน 1 ปี จะได้ว่า  $[42,612.5 / (1,460 \times 120)] \times 12 = 2.9$  ปี

## 4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยผักตบชวาผสมปุ๋ยอินทรีย์ ตัวเครื่องประกอบด้วยโครงสร้างมีขนาด  $760 \times 780 \times 1,065$  มิลลิเมตร เป็นที่ติดตั้ง ชุดย่อย ชุดผสม และ ใช้เครื่องยนต์เกเซอร์ไทเกอร์ รุ่น TG 169 ผลิตในประเทศไทย ขนาด 5.5 แรงม้า ส่งกำลังโดยใช้สายพานไปยังชุดย่อยและชุดผสมปุ๋ยอินทรีย์ ใบมีดทำจากเหล็ก AUD 11 ขนาด  $60 \times 100$  มิลลิเมตร คมตัดเดียวทำมุม 30 องศาับระนาบ จำนวน 2 ชุด ประสิทธิภาพการย่อยที่ความเร็วรอบทดสอบที่ 550 750 และ 950 รอบต่อนาที ได้เฉลี่ยที่ 90.57% ทั้ง 3 ความเร็วรอบ สามารถลดขนาดเฉลี่ยผักตบชวาสดได้ 16.7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความสามารถในการทำงานของเครื่องผสมผักตบชวา กับปุ๋ยอินทรีย์ อยู่ที่เวลาเฉลี่ย 31 วินาทีต่อ 1 รอบการผสม อัตราการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเบนซินเฉลี่ยที่ 0.625 ลิตรต่อชั่วโมง ต้นทุนการผลิตปุ๋ยผสมจากเครื่องย่อยผักตบชวาผสมปุ๋ยอินทรีย์ ต่อ 0.243 บาท/กิโลกรัม ระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 2.9 ปี

4.2 ข้อเสนอแนะควรออกแบบใบมีดใหม่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการย่อยวัชพืชชนิดอื่น ที่มีขนาดใหญ่และแข็งขึ้น เช่น กาบกล้วย ต้นรูปูชิ และกิ่งกระถินเพื่อเป็นอาหารสัตว์ หรือส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานเกษตรต่อไป เพื่อส่งเสริมอาชีพกับผู้สูงอายุและคนชรา นอกจากนี้ควรติดตั้งระบบป้องกันอุบัติเหตุส่วนบุคคลให้มากขึ้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ ธีระพงษ์ ควรคำนวณ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทั้งงบประมาณ สถานที่ และบุคลากรในสังกัด เพื่องานวิจัยนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thepjan S and Thong Aram A. Design and construction of water hyacinth and organic fertilizer. [engineering project report]. Pathumthani: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2018. (In Thai)
- [2] PanLuang C, Nualma S, and Tesswat A. Leaf and branch shredding machine [engineering project report]. Cholburi: Burapha University; 2011. (In Thai)
- [3] Kamron C, Chunchay W, Krudngan W, and Meesri A water hyacinth shredders machine. [engineering project report]. Bangkok: Rajamangala University of Technology Krungthep; 2013. (In Thai)
- [4] Luengpipatsorn N, Kalsirisilp R, and Langkapin J. Development of animal feed shredding and compressing machine. The 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference; TSAE 2017. Bangkok: Thai Society Of Agricultural Engineering ; 2017;144-9. (In Thai)
- [5] Kamma S. Design and construction of a household shredder. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal. 2018;11(1):82-95. (In Thai)
- [6] Kassaruk T, Phasinam K. Design and construction of water hyacinth chopper. RMUTJ JOURNAL Science and Technology. 2020;(3):59-68. (in Thai)
- [7] Muksan C, Whangkuenklang V. Plant multi purpose shreddermounted PTO tractor. Acad Pediatr. Forthcoming 2019.
- [8] Wongs V. editors. Composting and using Water Hyacinths [Internet]. Suphanburi: Suphanburi Land Development Station; [cited 2022 April 3]. Available from: <http://r01.ddd.go.th/spb/>.
- [9] Yaemphuan, P. Engineering Economy. Bangkok: SE-Ed. Public Co. Ltd; 2005. (in Thai)

# คุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

ประชุม คำพุฒ<sup>1</sup> และ ทวิช กล้าแท้<sup>2\*</sup>

prachoom.k@en.rmutt.ac.th<sup>1</sup>, tawich.k@rmutsv.ac.th<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>2\*</sup> หลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 24-May-2022 |
| Revised  | : 7-Jun-2022  |
| Accepted | : 10-Jun-2022 |

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเถ้าแกลบเพื่อทดแทนมวลรวมละเอียดบางส่วน ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC) ต่อเถ้าแกลบ (RHA) 1:3 (3RHA), 1:4 (4RHA) และ 1:5 (5RHA) ในการผลิตคอนกรีตบล็อก ทำการทดสอบหาความต้านทานแรงอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน การดูดกลืนน้ำ การหดตัวแห้ง ความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อก ที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเถ้าแกลบในคอนกรีตบล็อก ในขณะที่การดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลง เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเปรียบเทียบกับ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 58-2533 คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกต้องสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 2.5 MPa ที่อายุทดสอบ 28 วัน พบว่าคอนกรีตบล็อก 3RHA และ 4RHA มีค่าความต้านทานแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการประเมินต้นทุนการผลิต พบว่าคอนกรีตบล็อกมีต้นทุนวัสดุลดลงร้อยละ 8-19 เมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อก CT

**คำสำคัญ:** การดูดกลืนน้ำ, กำลังอัด, คอนกรีตบล็อก, เถ้าแกลบ

# Properties of Concrete Block Incorporating Rice Husk Ash as Partial Replacement for Fine Aggregate

Prachoom Khamput<sup>1</sup> and Tawich Klathae<sup>2\*</sup>  
prachoom.k@en.rmutt.ac.th<sup>1</sup>, Tawich.k@rmuts.ac.th<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

<sup>2\*</sup> Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 24-May-2022 |
| Revised  | : 7-Jun-2022  |
| Accepted | : 10-Jun-2022 |

## Abstract

This research aims to study the feasibility of using rice husk ash (RHA) partial fine aggregates replacement at ratio of ordinary Portland cement Type 1 (OPC) to RHA 1:3 (3RHA), 1:4 (4RHA) and 1:5 (5RHA) to produce concrete blocks. The properties of concretes such as compressive strength at 7, 14, 21 and 28 days, water absorption capacity drying shrinkage unit weight and thermal conductivity of concrete block at 28 days were investigated. The result showed that the compressive strength of concrete block decreased with an increasing rate of RHA replacement while water absorption of concrete block increased led to unit weight of concrete block was decreased. When the values were compared with the Thai Industrial Standards Institute TISI.58-2533 non-load bearing concrete blocks, which met the minimum specification of concrete block (than 2.5 MPa) at 28 days. The results indicated that the compressive strength of concrete block 3RHA and 4RHA were met the minimum specification. In terms of the production cost, RHA to partial fine aggregates replacement at ratio 1:3 (3RHA) and 1:4 (4RHA) reduction in the material cost by 8–19% compared with CT concrete block.

**Keywords:** Compressive Strength, Concrete Block, Rice husk ash, Water Absorption

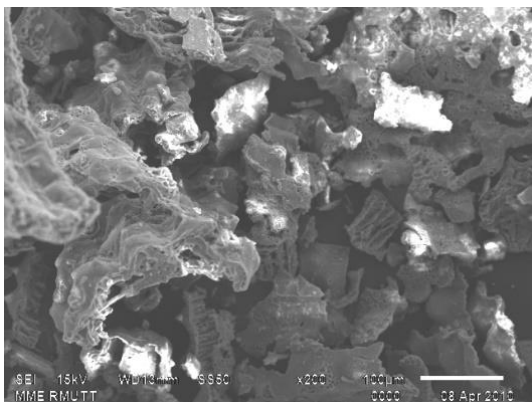
## 1. บทนำ

ไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวอันดับ 3 ของโลก รองจากอินเดียและเวียดนาม โดยปี 2020/2021 ไทยมีผลผลิตข้าวคิดเป็น 3.7% ของผลผลิตข้าวทั่วโลก (รองจากจีน อินเดีย อินโดนีเซีย บังคลาเทศ และเวียดนาม) ครอบคลุมพื้นที่เพาะปลูก คิดเป็น 46.1% ของพื้นที่เกษตรทั้งหมดของประเทศ หรือประมาณ 68.86 ล้านไร่ ส่วนใหญ่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือตอนล่าง และภาคกลาง จากสถิติในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาพบว่าไทยมีผลผลิตข้าวเปลือกเฉลี่ยปีละ 31-33 ล้านตัน [1] ซึ่งข้าวเปลือกในแต่ละตัน จะมีแกลบอยู่ประมาณ 200 กิโลกรัม หลังจากการนำแกลบไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงานความร้อนในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จะคงเหลือแกลบ (Rice husk ash, RHA) ที่เป็นผลพลอยได้ประมาณ 40 กิโลกรัม [2] หรือจะมีวัสดุเหลือทิ้งในรูปของแกลบ ประมาณ 1.2 ล้านตันต่อปี ซึ่งแกลบมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ซึ่งปัจจุบันแกลบที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม สูญเสียพื้นที่ในการกองเก็บ และขั้นตอนการกำจัดที่ยุ่งยาก [3, 4] จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แกลบจะมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 1.9 - 2.3 ขึ้นอยู่กับวิธีการเผามีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 5 - 20 ไมครอน ขนาดและรูปร่างไม่แน่นอน มีความพรุนสูง มีผิวขรุขระและมีรูพรองอยู่ภายในมาก ดังแสดงในรูปที่ 1 ในขณะ ที่องค์ประกอบทางเคมีของแกลบประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  ประมาณร้อยละ 90 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โปรแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส และซิลเฟอร์ และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 2-5 [2, 5-7] ดังแสดงในตารางที่ 1

ในอดีตมีการนำแกลบมาใช้เป็นวัสดุพอลิโซลานในการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) บางส่วนเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ และนำวัสดุเหลือทิ้งมาทำให้เกิดประโยชน์อย่างแพร่หลาย อาทิเช่น

ในปี 2001 Chatveera and Visantanon (2001) [8] ศึกษาคอนกรีตบล็อกผสมแกลบไม่บด เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตบล็อก ผลการทดสอบพบว่าแกลบไม่บดที่อัตราส่วนร้อยละ 20 สามารถพัฒนากำลังของคอนกรีตบล็อกสูงกว่าคอนกรีตบล็อกควบคุม นอกจากนี้อุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่ของแกลบเพิ่มขึ้น ต่อมาในปี 2003 Sukantapree et al. [9] ได้ทำการศึกษาแกลบ-เปลือกไม้ โดยนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีตบล็อก ผลการทดสอบพบว่ากำลังของคอนกรีตบล็อกลดลง เมื่อทำการแทนที่แกลบ-เปลือกไม้เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความละเอียดของแกลบ-เปลือกไม้ ในขณะที่ sata et al. [10] ได้ศึกษาแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่า ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตพัฒนากำลังอัดได้ถึง 80 MPa นอกจากนี้ Dumrongkil et al. [11] ศึกษา กำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง และความร้อนของมอร์ตาร์ผสมแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ผสมแกลบร้อยละ 20 และร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีแนวโน้มพัฒนากำลังอัดสูงกว่าและใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุ 60 วัน ต่อมาในปี 2014 Sua-iam and Makul (2014) [12] ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากแกลบเพื่อทดแทนมวลรวม และการใช้แกลบลอยทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 พบว่าปริมาณแกลบลอยและแกลบที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความต้องการน้ำของส่วนผสม และกำลังรับแรงอัดลดลง การทดแทนซีเมนต์ด้วยแกลบร้อยละ 25 สามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ Onprom (2017) [13] ทำการศึกษาแกลบจากโรงงานไฟฟ้า ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำเบอร์ 100 แทนที่ทรายบางส่วนในผลิตภัณฑ์

คอนกรีตมวลเบา ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตร ผลการทดสอบพบว่า การใช้เถ้าแกบลจากโรงงานเป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายบางส่วนส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาไม่กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นลดลง ในขณะที่การดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการแทนที่เถ้าแกบลในปริมาณที่มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hasnain (2021) [14] ซึ่งทำการศึกษาเถ้าแกบล (RHA) ร่วมกับเถ้าขานอ้อย (BA) ทดแทนทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ในคอนกรีตไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าแกบลร่วมกับเถ้าขานอ้อย ส่งผลโดยตรงต่อหน่วยน้ำหนัก และการดูดซึมน้ำของคอนกรีต SCC เนื่องจาก RHA และ BA มี ถ.พ. ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับทราย นอกจากนี้คุณสมบัติของ RHA และ BA มีความพรุน และช่องว่างในอนุภาคสูงกว่า ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีต SCC มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อการแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น



รูปที่ 1 ภาพขยายเถ้าแกบลโดยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) กำลังขยาย 200 เท่า

การศึกษาวิจัยในอดีตมีการใช้เถ้าแกบลบดละเอียดทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต ซึ่งให้ผลการศึกษาเป็นที่น่าพอใจในด้านกำลังอัด และความทนทานของคอนกรีต ในขณะที่งานวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าแกบลไม่บดมาทดแทนมวลรวม ในงานวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ๆ ยังมีข้อมูลอยู่น้อยมาก ดังนั้น

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการใช้เถ้าแกบลไม่บด ที่ได้รับมาจากโรงงานชีวมวลโดยตรง ทดแทนมวลรวมละเอียดในวัสดุก่อสร้างประเภทคอนกรีตบล็อก เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อก โดยเปรียบเทียบกับ มอก. 58-2533 คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก [15] ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อก ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้ง และช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมในขณะเดียวกัน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกบล [2]

| สารประกอบ            | เถ้าแกบล    |
|----------------------|-------------|
| Silicon dioxide      | 86.9 - 97.3 |
| Potassium oxide      | 0.6 - 2.5   |
| Sodium oxide         | 0 - 1.5     |
| Calcium oxide        | 0.2 - 1.5   |
| Magnesium oxide      | 0.12 - 1.96 |
| Ferric oxide         | 0 - 0.6     |
| Phosphorus pentoxide | 0.2 - 2.9   |
| Sulfur trioxide      | 0.1 - 1.1   |
| Black Iron Oxide     | 0 - 0.4     |
| Aluminum oxide       | N/A         |
| Loss on ignition     | N/A         |

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1) เถ้าแกบลจากโรงไฟฟ้าชีวมวลนำมาอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ  $100 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เพื่อแยกแกบลที่เผาไหม้ไม่หมดออกไป มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.1

2) ทรายละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 อย่างละครั้ง มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.8

3) หินฝุ่นผึ่งแดดให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นำไปอบที่อุณหภูมิ  $100 \pm 5$  องศาเซลเซียส ใช้เวลา 24 ชั่วโมง มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.7

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [16] มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.1

- 4) น้ำประปา
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 6) แบบหล่อคอนกรีตบล็อกกลวงขนาด 7 x 19 x 39 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 2
- 7) เครื่องผสมคอนกรีตบล็อกแบบอัตโนมัติ
- 8) เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)
- 9) เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
- 10) เครื่องอัดไฮดรอลิก (แบบเดียวกับที่ใช้ผลิตคอนกรีตบล็อกทั่วไป)



รูปที่ 2 แบบหล่อคอนกรีตบล็อกกลวง

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกแก้วกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับการทดสอบ (เทียบจากน้ำหนักปูนซีเมนต์)

| อัตราส่วน | ปูนซีเมนต์ | ทราย | หินปูน | แก้วกลบ | น้ำ |
|-----------|------------|------|--------|---------|-----|
| CT        | 1          | -    | 7      | -       | 2   |
| 3RHA      | 1          | 1.5  | 1.5    | 3       | 2   |
| 4RHA      | 1          | 1.5  | 1.5    | 4       | 2   |
| 5RHA      | 1          | 1.5  | 1.5    | 5       | 2   |

## 2.2. การกำหนดอัตราส่วนผสม

นำแก้วกลบไม่บด ซึ่งได้มาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยตรง เพื่อทดแทนมวลรวมละเอียดในการผลิตคอนกรีตบล็อกจำนวน 4 อัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 2 โดยใช้แบบหล่อคอนกรีตบล็อกกลวงขนาด 7 x 19 x 39 ลูกบาศก์เซนติเมตร

## 2.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตบล็อก

สำหรับการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกแก้วกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวล จะเน้นการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการที่ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตคอนกรีตบล็อกโดยทั่วไป ดังนี้

1) ตวงส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกแก้วกลบเสริมแก้วกลบตามอัตราส่วนผสมที่กำหนดไว้ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 : ทราย : หินปูน : แก้วกลบ : น้ำ โดยน้ำหนัก

2) เริ่มนำวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ และแก้วกลบ) มาคลุกเคล้าให้เข้ากันทั้งหมด

3) แบ่งน้ำที่จะผสมออกเป็น 3 ส่วน โดย 1 ใน 3 ส่วนใช้สำหรับผสมในช่วงต้นเพื่อทำการเคลือบไม้ ที่เหลือ 2 ส่วน นำไปผสมระหว่างการผสมคอนกรีตบล็อก

4) เตรียมเครื่องผสมคอนกรีตบล็อกหรือไม้ผสมและอุปกรณ์ต่างๆที่จะสัมผัสกับคอนกรีตบล็อกสดให้อยู่ในสภาพชื้นเพื่อป้องกันการดูดความชื้นจากส่วนผสม

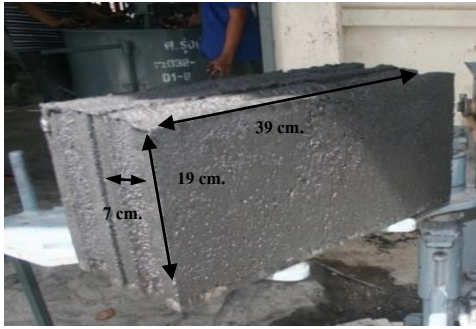
5) แบ่งวัสดุประสานที่ผสมออกเป็น 3 ส่วน แล้วจึงนำวัสดุประสานส่วนที่ 1 และน้ำ ใส่ลงในไม้ตามลำดับ เพื่อทำการเคลือบไม้

6) เติมทราย (ผ่านตะแกรงเบอร์ 50) ประมาณครึ่งหนึ่งของที่ตวงไว้ลงไป แล้วทำการผสมให้เข้ากัน

7) จากนั้นเติมทราย (ผ่านตะแกรงเบอร์ 100) ส่วนที่เหลือทั้งหมดลงไปพร้อมกับวัสดุประสานส่วนที่ 2

8) ขณะที่ผสมส่วนผสมให้เข้ากัน ให้ทยอยเติมวัสดุประสานส่วนที่เหลือทั้งหมดลงไป

9) ทำการผสมโดยให้ใช้เวลาไม่เกิน 10 นาที และขณะที่ทำการผสมควรมีการหยุดเครื่องเพื่อแช่คอนกรีตบล็อกที่ติดอยู่ข้างโม้ออก แล้วจึงทำการเดินเครื่องผสมต่อ



รูปที่ 3 คอนกรีตบล็อกเก้าแกลบที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก

10) ขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกเก้าแกลบโดยใช้เครื่องอัดไฮโดรลิก เพื่อให้การบดอัดเข้าแบบมีค่าเท่ากัน

11) จากนั้นทิ้งไว้ 1 วัน จึงถอดแบบและยกตัวอย่างคอนกรีตบล็อกเก้าแกลบที่ขึ้นรูปไปบ่มในอากาศและร่ม เป็นเวลา 7 วัน ในระหว่างนี้ห้ามเคลื่อนย้ายบล็อกทดสอบเป็นเวลา 2 วัน นับตั้งแต่วันที่เข้าแบบ

## 2.4 วิธีการทดสอบสมบัติของคอนกรีตบล็อก

### 2.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทดสอบคอนกรีตบล็อกตัวอย่างคอนกรีตบล็อกกลางขนาด  $7 \times 19 \times 39$  ลูกบาศก์เซนติเมตรตามมาตรฐาน มอก. 58-2533 คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก [15] ทำการทดสอบหาความต้านทานแรงอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยค่าเฉลี่ยของกำลังอัดได้จากการทดสอบ 5 ก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน มอก. 109-2517 [17]

### 2.4.2 การดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อก

ได้จากการทดสอบ 5 ก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน มอก. 109-2517 [17] ที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตบล็อกตัวอย่างคอนกรีตบล็อกกลางขนาด  $7 \times 19 \times 39$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

### 2.4.3 การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

ทำการทดสอบโดยวัดขนาด ความกว้าง ความยาว ความหนา ของคอนกรีตบล็อกตัวอย่างคอนกรีตบล็อกกลางขนาด  $7 \times 19 \times 39$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้ตัวอย่างทดสอบ

ไม่น้อยกว่า 5 ก้อนตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก. 58-2533 [15]

## 2.4.4 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

โดยการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกให้มีขนาดประมาณ  $1.5 \times 30 \times 30$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามที่มาตรฐาน ASTM C177-10 [18] กำหนด จำนวนอัตราส่วนละ 3 ตัวอย่าง

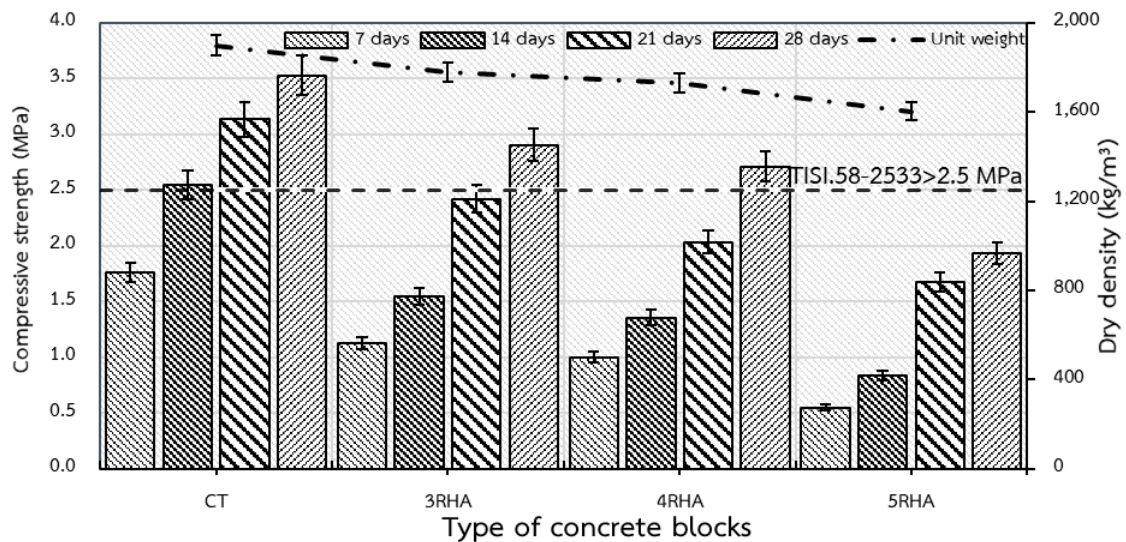
## 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อก

รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังอัด ที่อายุ 7, 14, และ 21 วัน ของคอนกรีตบล็อกซึ่งทำการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเก้าแกลบ (OPC : RHA) ที่อัตราส่วน 1:3, 1:4 และ 1:5 ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเก้าแกลบ ร้อยละ 0 (CT) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1.8, 2.6 และ 3.1 MPa ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตบล็อก 3RHA, 4RHA และ 5RHA มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 1.1, 1.0 และ 0.6 MPa ตามลำดับ ต่อมาที่อายุ 14 วัน คอนกรีตบล็อก 3RHA, 4RHA และ 5RHA มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1.5, 1.4 และ 0.8 MPa ตามลำดับ ในขณะที่อายุ 21 วัน คอนกรีตบล็อก 3RHA, 4RHA และ 5RHA สามารถพัฒนากำลังอัดเท่ากับ 2.4, 2.0 และ 1.7 MPa ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัด และค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน พบว่า คอนกรีตบล็อก CT, 3RHA, 4RHA และ 5RHA มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 3.5, 2.9, 2.7 และ 1.9 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกเท่ากับ  $1,900, 1,780, 1,733$  และ  $1,604 \text{ kg/m}^3$  ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตบล็อกมีค่ากำลังอัดลดลง เมื่อทำการเพิ่มการแทนที่ของเก้าแกลบ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของเก้าแกลบ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลง เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเก้าแกลบมีค่าเท่ากับ 2.1 ในขณะที่ทรายและหินฝุ่น มีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.8 และ 2.7 ตามลำดับ นอกจากนี้ขนาดอนุภาคของเก้าแกลบที่ได้รับโดยตรงจากโรงงานชีวมวลไม่ผ่านการบดมี

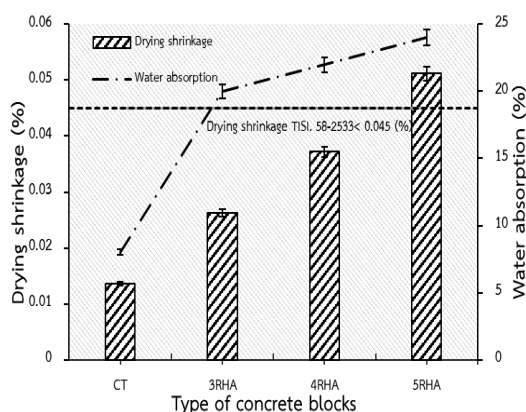
ขนาดของอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ เล็ก ใหญ่ปะปนกันจึงทำให้ลักษณะการก่อตัวของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะเป็นโพรง และเกิดช่องว่างภายใน ทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังลดลง [6-9, 19-20] อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับ

มาตรฐานอุตสาหกรรม 58-2533 คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก [15] พบว่าคอนกรีตบล็อก 3RHA และ 4RHA มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 5 ก่อนที่อายุ 28 วัน มีค่าผ่านเกณฑ์ มอก. 58-2533 ซึ่งมีการกำหนดค่าเฉลี่ยการรับกำลังไม่น้อยกว่า 2.5 MPa



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยกับร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน

### 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อก กับร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบที่อายุ 28 วัน

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อก ที่อายุ 28 วัน ซึ่งทำการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเถ้าแกลบ (OPC : RHA) ที่อัตราส่วน 1:3, 1:4 และ 1:5 ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตบล็อก CT มีค่าการหดตัวแบบแห้ง และดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0.011 และ 8 ตามลำดับ ในขณะที่ คอนกรีตบล็อก 3RHA, 4RHA และ 5RHA มีการหดตัวแบบแห้งเท่ากับร้อยละ 0.026, 0.037 และ 0.051 และค่าการดูดกลืนน้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 20, 22 และ 24 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การหดตัวแบบแห้ง และการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่ของเถ้าแกลบ เนื่องจากเถ้าแกลบที่ไม่ผ่านการบดส่วนใหญ่มีความละเอียดต่ำ มีขนาดใหญ่และดูดน้ำมาก เนื่องจากมีความพรุนสูง ทำให้เกิดการดูดกลืนน้ำได้ง่าย จึงส่งผลให้เกิดการหดตัวแห้งสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบ [4-7, 19-20]

ทั้งนี้ตาม มอก. 58-2533 มีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยต้องไม่เกิน ร้อยละ 25 เมื่อคอนกรีตบล็อกมีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าร้อยละ 0.045 พบว่าคอนกรีตบล็อก 3RHA และ 4RHA มีค่าผ่านเกณฑ์ มอก. 58-2533 [15]

### 3.3 การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิตและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อก

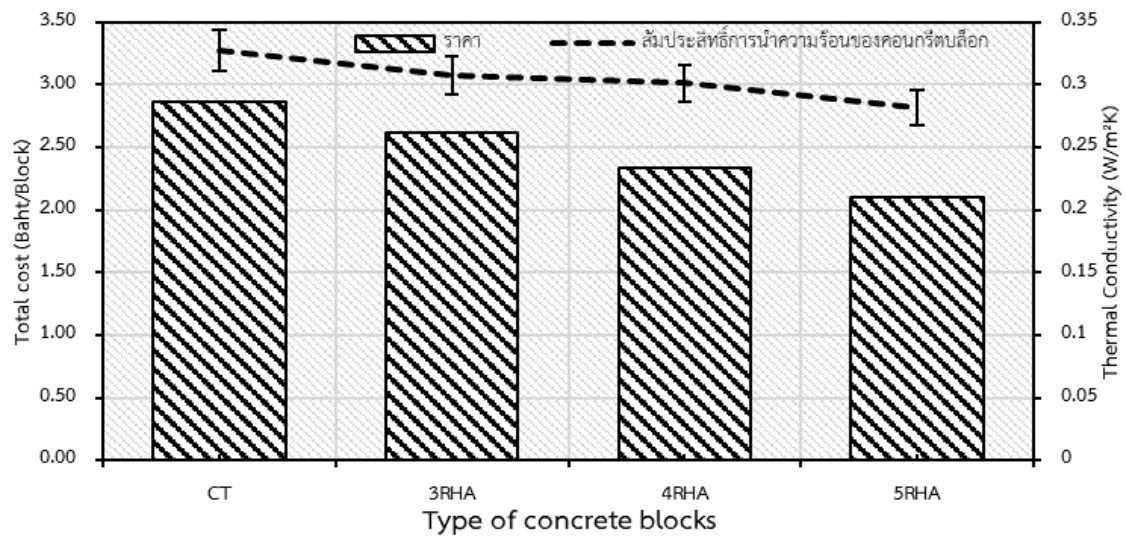
จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าแกลบมาทดแทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีตบล็อก (OPC : RHA) ที่อัตราส่วน 1:3, 1:4 และ 1:5 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อก ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ปูนซีเมนต์ ทราย และหินปูนซึ่งมีราคาประมาณ 2.63, 0.10 และ 0.15 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ [21] ในขณะที่เถ้าแกลบ (RHA) ซึ่งมีราคาประมาณ 0.05 บาทต่อกิโลกรัม เนื่องจากเถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจึงไม่มีค่าใช้จ่าย และไม่มีค่าพลังงานในการบด เนื่องจากรับมาจากโรงงานชีวมวลโดยตรง แต่อาจจะมีส่วนของค่าขนย้าย

ตารางที่ 3 แสดงราคาคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน พบว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมละเอียด มีราคาโดยประมาณที่ 2.86 บาท/ก้อน [21] ในขณะที่สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกเท่ากับ

0.327 W/m<sup>2</sup>K เมื่อพิจารณาคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าแกลบทดแทนมวลรวมละเอียด (OPC : RHA) ที่อัตราส่วน 1:3, 1:4 และ 1:5 หรือคอนกรีตบล็อก 3RHA, 4RHA และ 5RHA มีราคาเท่ากับ 2.62, 2.33 และ 2.10 บาท/ก้อน หรือคิดเป็นร้อยละ 92, 81 และ 73 ของราคาคอนกรีตบล็อกที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการผลิต ในขณะที่สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกเท่ากับ 0.307, 0.301 และ 0.281 W/m<sup>2</sup>K ดังแสดงในรูปที่ 6 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลง เมื่อทำการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบ เนื่องจากเถ้าแกลบที่ได้รับโดยตรงจากโรงงานชีวมวล เป็นวัสดุที่มีความพรุนเนื่องจากไม่ผ่านการบดละเอียด ส่งผลให้เกิดช่องว่างจำนวนมากในคอนกรีตบล็อก ทำให้คอนกรีตบล็อกมีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนได้ดีมากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาตาม มอก. 58-2533 คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก [15] พบว่าคอนกรีตบล็อก 3RHA และ 4RHA สามารถลดค่าใช้จ่ายได้มากถึงร้อยละ 8-19 ในขณะที่กำลังรับแรงอัด รวมถึงคุณสมบัติอื่นๆ ยังคงผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานกำหนด [15]

ตารางที่ 3 ต้นทุนต่อหน่วยของคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบ

| Concrete<br>Symbols | Mixture proportions/Blocks, [kg. (Baht/kg)] |             |             |             | Baht/Block |
|---------------------|---------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|                     | OPC                                         | sand        | Stone Dust  | RHA         |            |
| CT                  | 0.70 (2.63)                                 | -           | 5.00 (0.15) | -           | 2.86       |
| 3RHA                | 0.80 (2.63)                                 | 1.20 (0.10) | 1.20 (0.15) | 2.40 (0.05) | 2.62       |
| 4RHA                | 0.70 (2.63)                                 | 1.10 (0.10) | 1.10 (0.15) | 2.80 (0.05) | 2.33       |
| 5RHA                | 0.60 (2.63)                                 | 0.95 (0.10) | 0.95 (0.15) | 3.20 (0.05) | 2.10       |



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาวัสดุของการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ก้อน และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อก กับร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบ

#### 4. สรุปผล

คอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าแกลบเพื่อทดแทนมวลรวมละเอียด มีค่าการหดตัวแบบแห้งและค่าการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่ของเถ้าแกลบ

คอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าแกลบเพื่อทดแทนมวลรวมละเอียด มีค่ากำลังอัดและความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยลดลง เมื่อการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่มากขึ้น

อัตราส่วนคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุมวลรวมละเอียด (OPC : RHA) ที่อัตราส่วน 1:3 และ 1:4 มีค่าความต้านทานแรงอัดผ่านเกณฑ์ มอก. 58-2533 ที่อายุ 28 วัน

คอนกรีตบล็อก 3RHA และ 4RHA สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ร้อยละ 8 และ 19 ในขณะที่กำลังรับแรงอัด รวมถึงคุณสมบัติอื่นๆ ยังคงผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานกำหนด

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกมีค่าลดลง เมื่อการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่มากขึ้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และเอื้อเฟื้อสถานที่ และนักศึกษาทุกคนที่มีส่วนร่วมในการทำวิจัยครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Krungsri Research. Thailand industry outlook 2022-24: Rice Industry. [Internet]. 2022 [cited 2022 APR 15]. Availability from: [https://www.krungsri.com/getmedia/fd159784-6582-4f22-91e354549d3269ab/IO\\_Rice\\_220203\\_EN\\_EX.pdf.aspx](https://www.krungsri.com/getmedia/fd159784-6582-4f22-91e354549d3269ab/IO_Rice_220203_EN_EX.pdf.aspx)
- [2] Jaturapitakkul C, Tangchirapat W. Utilization of waste ashes and waste materials from industries as concrete materials. 2nd ed. Bangkok: Thailand; 2012.

- [3] Chalee W, Sasakul T, Suwanmaneechoand P, Jaturapitakkul C. Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment. *Cement and Concrete Composites*. 2013;37:47-53.
- [4] Sata V, Tangpagasit J, Jaturapitakkul C, Chindaprasit P. Effect of W/ B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites*. 2012;34:94 -100.
- [5] Zain M.F.M., Islam M.N., Mahmud F, Jamil M. Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*. 2011;25:798-805.
- [6] Intaboot N, Sreefung P, Nampunya S. Properties of concrete flow with rice husk ash mixing. 23rd National Convention on Civil Engineering; 2017; NakhonNayok, Thailand. p. MAT324. (in Thai)
- [7] Intaboot N. Guidelines and possibilities for the application of biomass materials for concrete block production. *Journal of Thailand Concrete Association*. 2017;5(2):1-10. (in Thai)
- [8] Chatveera B, Visantanon C. Potential to use concrete mixed with rice husk ash, not crushed. 7th National Convention on Civil Engineering; 2001; Bangkok, Thailand. 2001, p.63 -68. (in Thai)
- [9] Sukantapree S, Tangpagasit J, Jaturapitakkul C. A study of rice husk-bark ash as concrete block ingredients. *Engineering Journal of Research and Development*. 2003;14(3):1-7. (in Thai)
- [10] Sata V, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K. Influence of pozzolan from various by product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2007;21:1589–98.
- [11] Dumrongsil S, Thepwong R. Compressive strength drying shrinkage and heat of mortar containing rice husk ash. 15th National Convention on Civil Engineering, Thailand, 2010, p.207 (in Thai)
- [12] Sua-iam G, Makul N. Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2014;78:184-94.
- [13] Onprom P, use of rice husk ash as partial sand replacement in lightweight concrete. *Vocational Education Innovation and Research Journal*. 2017;1(1): 1-15. (in Thai)
- [14] Hasnain M.H, Javed U, Ali A, Zafar M.S. Eco-friendly utilization of rice husk ash and bagasse ash blend as partial sand replacement in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;273:121753.
- [15] Thai Industrial Standards Institute. Standard for hollow non-load-bearing concrete masonry unit (TIS.58-2533). Ministry of industry. 1990. (in Thai)
- [16] American Society for Testing and Materials. ASTM C150 Standard Specification for 364 Portland Cement. ASTM International. West Conshohocken, Philadelphia, United States. 2018.
- [17] Thai Industrial Standards Institute. Standard for sampling and testing concrete masonry units (TIS.109-2517). Ministry of industry. 1974. (in Thai)

- [18] American Society for Testing and Materials. ASTM C177 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties. ASTM International. West Conshohocken, Philadelphia, United States. 2010.
- [19] Prak L, Sumranwanich T. Chloride binding capacity and water absorption of mortar containing fly ash, limestone powder, and expansive additive. Journal of Engineering, RMUTT. 2020;18(2):133-44. (in Thai)
- [20] Boontositrakul K, Suweero K, Weeranukul P. Using cassava pit waste as light weight aggregate for hollow load bearing concrete masonry mixed with rice husk ash product. Journal of Engineering, RMUTT. 2020;18(1):13-22. (in Thai)
- [21] Klathae T, Jitpat P. Compressive strength and water absorption properties of concrete block containing crushed oyster shell not process burning. RMUTP Research Journal. 2019; 11(2): 25-38. (in Thai)



# ผลกระทบของปริมาณก๊าซเรือนกระจกและแนวทางแก้ไขของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภท วัสดุเปลือกอาคาร

ประชุม คำพุ่ม<sup>1</sup> สมพิศ ตันตวรนาท<sup>1</sup> และ เกียรติสุตา สมนา<sup>2\*</sup>

prachoom\_k@rmutt.ac.th<sup>1</sup>, sompit\_t@rmutt.ac.th<sup>1</sup> kiatsuda.so@rmuti.ac.th<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 23-May-2022 |
| Revised  | : 11-Jun-2022 |
| Accepted | : 14-Jun-2022 |

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาปริมาณก๊าซเรือนกระจกและแนวทางแก้ไขของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทวัสดุเปลือกอาคาร ซึ่งก๊าซเรือนกระจกเกิดจากสลายตัวของธาตุเรเดียและยูเรเนียม เป็นก๊าซที่ไม่มีกลิ่น พบมากในธรรมชาติ ได้แก่ ดิน หิน ทราาย ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทำให้วัตถุดิบและผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างมีโอกาสปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาได้ โดยเฉพาะในอาคารและห้องที่ไม่มีการระบายอากาศที่ดีและเลือกใช้ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างที่ไม่เหมาะสม การศึกษาในงานวิจัย ศึกษาการปลดปล่อยของเรือนกระจกจากวัตถุดิบวัสดุก่อสร้าง 4 ชนิด ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทเปลือกอาคาร ได้แก่ ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทผนัง, พื้น และวัสดุก่อสร้างประเภทอื่นๆ หลังจาก นั้น คัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดมาจำลองเป็นห้องเพื่อศึกษาค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการคำนวณปริมาณรังสีของผู้อยู่อาศัยมีโอกาสได้รับ เพื่อทดลองวิธีและแนวทางในการแก้ไขปัญหาจากการศึกษาพบว่า ทราายเป็นวัตถุดิบที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด บล็อกมวลเบาจากภาคเหนือเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด เมื่อทำการสร้างห้องจำลอง พบว่า การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่มีการแนะนำไว้ เช่นเดียวกับการคำนวณปริมาณรังสีของผู้อยู่อาศัยรายปี โดยงานวิจัยแนะนำ การฉาบปูนและทาสีพลาสติกชนิดทากายในสำหรับเป็นการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง เพื่อลดมลพิษทางอากาศและเป็นการรักษาสุขภาพของผู้อยู่อาศัยในอาคารอีกด้วย

**คำสำคัญ:** เรือนกระจก การปลดปล่อยก๊าซ ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง

# The Effect of Radon Gas Volume and Solutions of Construction Material Products as Building Envelopes

Prachoom Khamput<sup>1</sup> Sompit Tantavoranart<sup>1</sup> and Kiatsuda Somna<sup>2\*</sup>  
prachoom\_k@rmutt.ac.th<sup>1</sup>, sompit\_t@rmutt.ac.th, kiatsuda.so@rmuti.ac.th<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 23-May-2022 |
| Revised  | : 11-Jun-2022 |
| Accepted | : 14-Jun-2022 |

## Abstract

This research aimed to investigate the effect of radon gas volume and solutions of construction material products as building envelopes. Radon gas is an odorless gas naturally found in soil, rock and sand and is produced by the decay of the elements radium and uranium. This is the main raw material in the construction industry which causes the raw materials and building materials to release radon gas. Especially in buildings and rooms with poor ventilation and improper building materials. This research investigated radon emissions from 4 types of raw building materials and building envelope material products such as wall building materials, floor and other building materials. After that, the product with the highest radon emissions was selected and modelled into a room to study the radon emission value and calculate the annual effective radiation dose that residents were likely to experience. Moreover, this was to try develop methods and solving problems guideline. From the study, it was found that sand had the most radon gas emissions of all raw materials. Aerated blocks from North area were the most radon-emitting building material products. When a mock room was built, radon emission values did not exceed the recommended values similar to calculating the radiation volume of annual resident. From the research, plastering and interior plastic painting reduced radon emissions from building materials in turn reducing air pollution and maintaining the health of the residents of the building as well.

**Keywords:** radon, emissions, building materials products

## 1. บทนำ

ก๊าซเรดอนเป็นก๊าซกัมมันตรังสี เกิดจากการสลายตัวของแร่เรเดียม ( $^{225}\text{Ra}$ ) และยูเรเนียม ( $^{238}\text{U}$ ) เกิดขึ้นจากธรรมชาติ เป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรส ทำให้มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ด้วยสัมผัสใดๆ ก๊าซเรดอนที่สะสมในบ้านเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งปอดที่ส่งผลอันตรายถึงชีวิต ด้วยกลไกของการหายใจนำฝุ่นละอองและก๊าซเรดอนเข้าไปและฝังตัวอยู่ในระบบทางเดินหายใจ จากนั้นรังสีอัลฟาพลังงานสูงที่ปลดปล่อยออกมา จะทะลุทะลวงทำลายเซลล์ที่อยู่โดยรอบและอาจทำลายชั้น Epithelium ของหลอดลมปอด ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการเกิดมะเร็งได้ [1] โดยแหล่งกำเนิดของก๊าซเรดอนแบ่งได้เป็น 4 แหล่งใหญ่ ๆ ได้แก่ ยูเรเนียมในดิน น้ำบาดาล วัสดุก่อสร้าง และก๊าซธรรมชาติ [2] สำหรับในประเทศไทย พบก๊าซในเขตกรุงเทพมหานครในปริมาณน้อยมาก แต่พบมากในทางภาคเหนือและอีสาน จากงานวิจัยก๊าซเรดอนในจังหวัดมหาสารคาม [3] พบว่าภาคอีสานมีลักษณะภูมิประเทศแบบราบลุ่มแม่น้ำ เป็นพื้นที่รองรับด้วยหินแข็งอายุตั้งแต่ยุคครีเทเชียส พบหินตะกอนครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ รวมถึงกลุ่มหินโคราชที่มีตะกอนสีแดง และมีหินทราย หินทรายแป้งและหินดินดาน มีทรายโมนาไซต์ปะปนอยู่ ซึ่งจะมีธาตุยูเรเนียมและทอเรียมเป็นส่วนประกอบที่สลายตัวให้ก๊าซเรดอนได้ หากสำรวจข้อมูลภายในและภายนอกอาคาร พบว่าภายในอาคารมีการสะสมของก๊าซเรดอนมากกว่าภายนอกอาคาร การสะสมเกิดจากการซึมออกมาจากพื้นดินด้านล่าง ทางพื้นบ้านและรอยแตกร้าวขององค์อาคารภายในบ้าน และเมื่ออากาศภายในไม่เกิดการถ่ายเท จึงทำให้มีการสะสมของก๊าซเรดอนภายในบ้านในปริมาณมาก [4]

จากการที่ก๊าซเรดอนสามารถพบได้ในดินและหินทั่วไปบนพื้นโลกนั้น [5] ในงานก่อสร้าง มนุษย์นำหิน ดิน ทราย มาใช้เป็นวัสดุประสานและมวลรวมในงานก่อสร้างอาคารต่าง ๆ วัสดุเหล่านั้นมีการปล่อยก๊าซเรดอนออกมาตามปริมาณของธาตุเรเดียมที่ปะปนอยู่ ซึ่งหากระบบของอาคารไม่มีการระบายอากาศที่ดี จะทำให้เกิดมลพิษภายในอาคารที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ

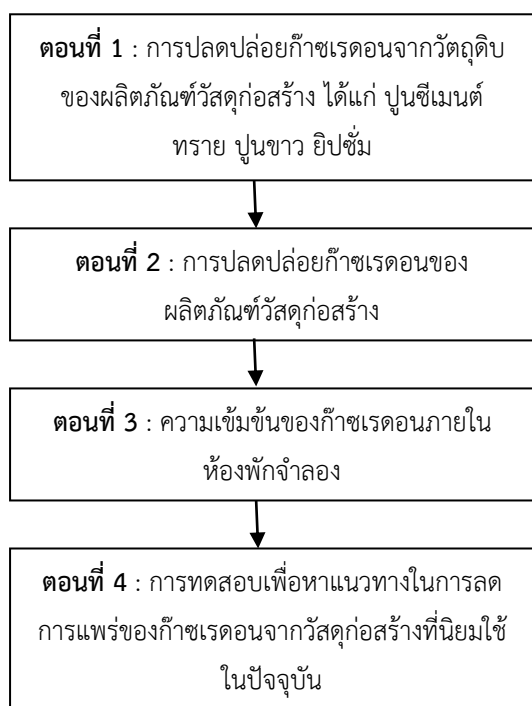
ของผู้ใช้งานในอาคารโดยตรง ซึ่งปัจจุบันการใช้งานในอาคารเฉลี่ยของมนุษย์ประมาณ 2 ใน 3 ของช่วงชีวิตเมื่อได้รับมลพิษเพียงเล็กน้อยก็สามารถเกิดการสะสมจนเมื่อระยะเวลาผ่านไปก็จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้ [6] อย่างไรก็ตามการอยู่อาศัยไม่สามารถหลีกเลี่ยงก๊าซเรดอนได้ แต่หากมีข้อมูลถึงการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุและผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง ตลอดจนแนวทางการแก้ไข ก็มีส่วนช่วยให้การลดปริมาณก๊าซเรดอนและยังเป็นการดูแลสุขภาพร่างกายของคนเราเพื่อไม่ได้รับผลกระทบจากก๊าซเรดอนอีกด้วย ทั้งนี้การสร้างมาตรฐานสำหรับใช้ควบคุมปริมาณการได้รับก๊าซเรดอนจากสิ่งแวดล้อมทั้งภายในและภายนอกอาคารนั้น ได้กำหนดค่าระดับเรดอนภายในอาคารเฉลี่ยไว้ที่  $148\text{ Bq/m}^3$  ตามคณะกรรมการนานาชาติว่าด้วยการป้องกันอันตรายจากรังสี (International Commission on Radiological Protection: ICRP) ซึ่งได้จากค่าระดับที่ใช้เป็นเกณฑ์เฉลี่ยจากองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ US EPA หากตรวจพบว่าอาคารใดมีค่าเกินจากนี้จะต้องรีบหาวิธีการลดปริมาณก๊าซเรดอนลงให้ต่ำกว่าค่าดังกล่าวโดยเร็ว อย่างไรก็ตามระดับอ้างอิงเป็นเพียงข้อเสนอแนะ (Recommendation) ที่ในแต่ละประเทศกำหนดขึ้นไม่ได้มีผลบังคับทางกฎหมาย [7]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาปริมาณก๊าซเรดอนและแนวทางแก้ไขของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทวัสดุป้องกันอาคาร ซึ่งในประเทศไทยยังพบการศึกษาข้อมูลของการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างค่อนข้างน้อย โดยในงานวิจัยได้ทำการศึกษาปริมาณก๊าซเรดอนที่ปลดปล่อยจากวัสดุดิบของวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย ยิปซัม และผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างจากแหล่งต่าง ๆ เช่น คอนกรีตบล็อก คอนกรีตมวลเบา อิฐมอญ กระเบื้องปูพื้น ยิปซัมเพดาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังจำลองการสร้างห้องที่มีการใช้ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง และศึกษาการปล่อยก๊าซเรดอน และการคำนวณปริมาณก๊าซเรดอนเมื่อพักอาศัยในห้องจำลองเป็นระยะเวลาหนึ่งปี อีกทั้งยังมีการเสนอแนะแนวทางแก้ไขเพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรดอนในตัวอาคาร เพื่อเป็นข้อมูล

ให้กับงานก่อสร้างทำไปใช้ในการดูแลและลดปัญหาการเกิดมลพิษทางอากาศจากก๊าซเรดอนสำหรับอาคารต่อไป

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยวัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน วิธีการเก็บตัวอย่าง วิธีการวิเคราะห์และทดสอบ ซึ่งมีแผนภาพการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1 และมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการทำงานวิจัย

### 2.1 วัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ศึกษาวัสดุก่อสร้างประเภทวัสดุเปลือกอาคาร ได้แก่ คอนกรีตมวลเบา คอนกรีตบล็อก อิฐมอญ หินแกรนิตและหินอ่อน วัสดุปูพื้นแกรนิตโต้ วัสดุผนัง วัสดุปูพื้น กระเบื้องเคลือบ แผ่นฝ้าฉาบเรียบ และแผ่นฝ้าทีบาร์

### 2.2 ถึงทดสอบเพื่อศึกษาการปลดปล่อยก๊าซเรดอน

ลักษณะของถังเป็นถังสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร สูง 43 เซนติเมตร ที่มี

การปิดฝาให้สนิท ป้องกันอากาศภายนอกเข้าสู่ภายในถังตัวอย่าง ที่ได้มีการติดตั้งวาล์วข้อต่อสำหรับต่อท่อเข้ากับมาตรวัดแบบไอออนเซชัน ATMOS 12 DPX เพื่อวัดปริมาณก๊าซเรดอน แสดงถึงทดสอบ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ถังบรรจุตัวอย่างทดสอบ

### 2.3 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรดอน ATMOS 12 DPX (gammadata)

เครื่องวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรดอน ATMOS 12 DPX (gammadata) เป็นแบบพกพา model THE ATMOS 12 DPX (gammadata) ที่ได้รับการพัฒนามาจากเครื่อง Ionization chamber แสดงผลผ่านหน้า LCD โดยความเข้มข้นของก๊าซเรดอนถูกเก็บและบันทึกไว้ในหน่วยความจำของไมโครคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรดอน ATMOS 12 DPX (gammadata) ผลิตจากประเทศสวีเดน

## 2.4 วิธีการวัดการปลดปล่อยของก๊าซเรดอน

นำตัวอย่างวัสดุก่อสร้างที่ละชิ้นวางลงในถังทดสอบ ทาฝ้าถังด้วยสารหล่อลื่นซิลิโคนชนิดหนืด (High Vacuum Grease) วาง โอริง (O-Ring) และปิดฝาถัง โดยยึดฝากับตัวถังด้วยปากกาจับเหล็กซีแคลมป์ (C Clamp) เพื่อไม่ให้อากาศเข้า-ออก หลังจากนั้นใช้ปั๊มสุญญากาศสูบล้างอากาศออกจากวาล์วข้อต่อที่ต่อเชื่อมจากฝาถังทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที เพื่อสังเกตค่าความดันที่เกจวัดว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงว่าฝาถังปิดสนิทไม่มีอากาศเข้าและออก หลังจากนั้นต่อกระบอกถ่านกัมมันต์เข้ากับวาล์วข้อต่อเพื่อเป็นการเติมอากาศสะอาดที่ปราศจากก๊าซเรดอนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ถังบรรจุตัวอย่าง เพื่อให้ภายในถังมีแรงดันเท่ากับสภาวะปกติ วัดปริมาณก๊าซเรดอนโดยใช้เครื่อง ATMOS 12 DPX (gamdata) ซึ่งรูปที่ 4 แสดงการต่อสายวัดระหว่างเครื่องวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรดอน ATMOS 12 DPX และถังบรรจุตัวอย่าง โดยจอแสดงผลของเครื่องวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรดอน และแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟ และค่าเฉลี่ยของปริมาณก๊าซเรดอนที่ประมวลผลแล้วแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4 การต่อสายวัดระหว่างเครื่องวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรดอน ATMOS 12 DPX และถังบรรจุตัวอย่าง

## 2.5 การศึกษาพฤติกรรมของการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง (โดยการคำนวณ) กรณีนำมาสร้างเป็นห้องพักอาศัย

ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างที่นำมาศึกษาการปลดปล่อยก๊าซเรดอน ได้นำมาจำลองเป็นห้องพักอาศัยขนาด 4x3x2.8 เมตร ประกอบด้วยหน้าต่างขนาด 2.4x1.1 เมตร และประตูขนาด 1x2 เมตร โดยกำหนดให้ห้องพักนี้มีอัตราการระบายอากาศที่ 0.35 ต่อชั่วโมง (Board of Standard Mechanical Systems in the Building, 2002) และนำค่าอัตราการปล่อยก๊าซเรดอนที่คำนวณได้จากวัสดุก่อสร้างแต่ละชนิดมาคำนวณปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในห้องพัก

การคำนวณปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรดอน หากมีการพักอาศัยในห้องพักนี้ตลอดระยะเวลา 1 ปี คำนวณตามวิธีการที่เสนอโดย UNSCEAR (2000) ดังสมการที่ 1 ซึ่งผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 1

ปริมาณรังสียังผลรายปีที่ผู้อาศัยมีโอกาสได้รับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 1 (UNSCEAR, 2000)

$$H = C \times F \times T \times D \quad (1)$$

เมื่อ

$C$  คือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในห้องพักอาศัย ( $\text{Bq m}^{-3}$ )

$F$  คือ ตัวคูณปรับค่าปริมาณรังสีสมดุล (Equilibrium factor = 0.4 สำหรับภายในอาคาร)

$T$  คือ ระยะเวลาการอยู่อาศัย (Exposure period; 7,000 ชั่วโมงต่อปี)

$D$  คือ ตัวคูณค่าปริมาณรังสียังผล (Dose Conversion Factor;  $\text{DCF} = 9 \times 10^{-9} \text{ Sv (Bq h m}^{-3})^{-1}$ )

$H$  คือ ปริมาณรังสียังผลรายปีที่ผู้อาศัยมีโอกาสได้รับ ( $\text{Sv y}^{-1}$ ) ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานสากลแล้วไม่ควรเกิน  $1 \text{ mSv y}^{-1}$  (ICRP, 1990)

## 2.6 วิธีการทดสอบเพื่อหาแนวทางในการ ผลการแพร่ของก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้ ในปัจจุบัน

เตรียมวัสดุก่อสร้างชนิดที่มีการปลดปล่อย  
ก๊าซเรดอนในปริมาณสูงที่สุด มาตัดให้มีขนาดกว้าง×  
ยาว เท่ากับ 20×20 เซนติเมตร โดยจะทำการทดสอบ  
ต่างกัน 5 รูปแบบ คือ

- 1) วัสดุก่อสร้างธรรมดาไม่มีการฉาบปูนและ  
ทาสี
- 2) วัสดุก่อสร้าง + ฉาบปูน
- 3) วัสดุก่อสร้าง + ฉาบปูน + ทาสีพลาสติก  
ชนิดทากายใน
- 4) วัสดุก่อสร้าง + ฉาบปูน + ทาสีพลาสติก  
ชนิดทากายนอก
- 5) วัสดุก่อสร้าง + ฉาบปูน + ทาสีพลาสติก  
ชนิดเซ็ดล้างทำความสะอาดได้

นำตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการทดสอบวางลงใน  
ถังทดสอบวัดปริมาณก๊าซเรดอนด้วยเครื่องวิเคราะห์  
ปริมาณก๊าซเรดอน ATMOS 12 DPX

## 3. ผลการทดลอง

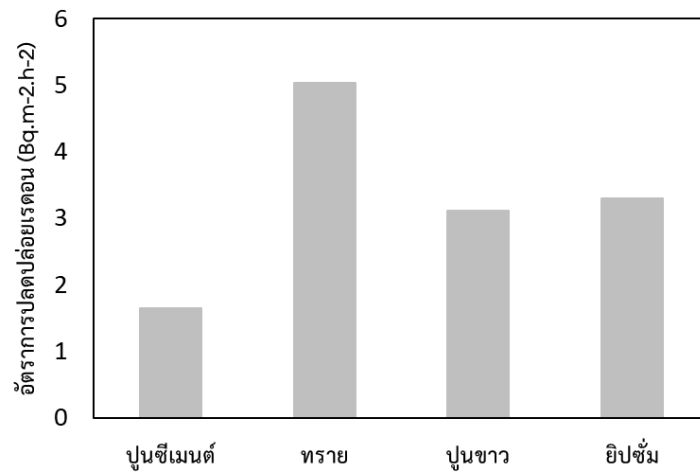
### 3.1 ผลการปลดปล่อยก๊าซเรดอนจาก วัตถุดิบของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง

รูปที่ 5 แสดงค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอน  
จากวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างพบว่า ทรายมีค่า  
การปลดปล่อยก๊าซเรดอนมากที่สุด คือ มีค่า  $5.0317 \text{ Bq.kg}^{-1}$  ซึ่งทรายเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตผลิตภัณฑ์  
วัสดุก่อสร้าง หากต้องการลดการปลดปล่อยก๊าซเรดอน  
จากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตโดยการเปลี่ยนแปลงอัตรา  
ส่วนผสมสามารถทำได้โดยการใช้ทรายในอัตราส่วนที่  
น้อยลง หรือใช้วัสดุอื่นทดแทนบางส่วน ทั้งนี้ต้องไม่มี  
ผลกระทบต่อคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์วัสดุ  
ก่อสร้าง สำหรับปูนซีเมนต์มีค่าการปลดปล่อยก๊าซ  
เรดอนน้อยที่สุด คือ มีค่า  $1.6453 \text{ Bq.kg}^{-1}$

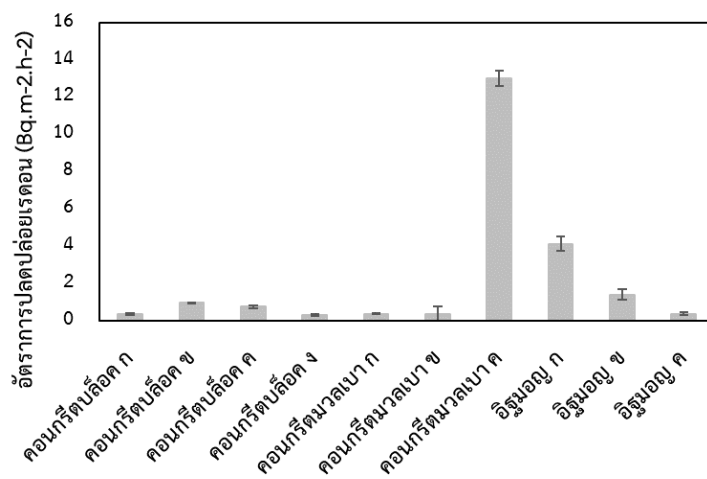
### 3.2 ผลการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของ ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง

รูปที่ 6 แสดงการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของ  
ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทผนัง โดยผนังจากแหล่ง  
ก ได้จากภาคกลาง แหล่ง ข ได้จากภาคอีสานและ  
แหล่ง ค ได้จากภาคเหนือ พบว่า ผนังคอนกรีตมวลเบา  
จากโรงงาน ค มีการปลดปล่อยก๊าซเรดอนมากที่สุด มี  
ค่า  $13.014 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ซึ่งแตกต่างจากคอนกรีตมวล  
เบาอีกสองแหล่งอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแหล่งของโรงงาน  
ค ได้จาก ภาคเหนือ ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพเรดอนสูง  
จึงอาจทำให้มีวัตถุดิบบางอย่างที่เป็นแหล่งปลดปล่อย  
ก๊าซเรดอนได้ อีกทั้งส่วนประกอบหลักของคอนกรีต  
มวลเบา ได้แก่ ปูนซีเมนต์และ ทราย นอกจากนี้  
ตัวอย่างอิฐมอญส่วนใหญ่ก็มีค่าปริมาณการปลดปล่อย  
ก๊าซเรดอนค่อนข้างสูงเช่นกัน โดยอิฐมอญจากภาค  
อีสานมีค่าการปลดปล่อยเรดอนสูงกว่าจากภาคกลาง  
และภาคเหนือ ซึ่งเป็นไปได้ว่าปริมาณก๊าซเรดอนจะ  
ปลดปล่อยออกมาจากดินเหนียวที่ใช้ในการผลิตอิฐ  
มอญ ซึ่งอาจมีปริมาณของแร่ยูเรเนียมอยู่ในดินนั้น ๆ  
ในขณะที่อิฐบล็อกเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างที่มีค่าการ  
ปลดปล่อยก๊าซเรดอนของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง  
ประเภทผนังต่ำที่สุด โดยมีค่าในช่วง  $0.36 - 0.97 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$

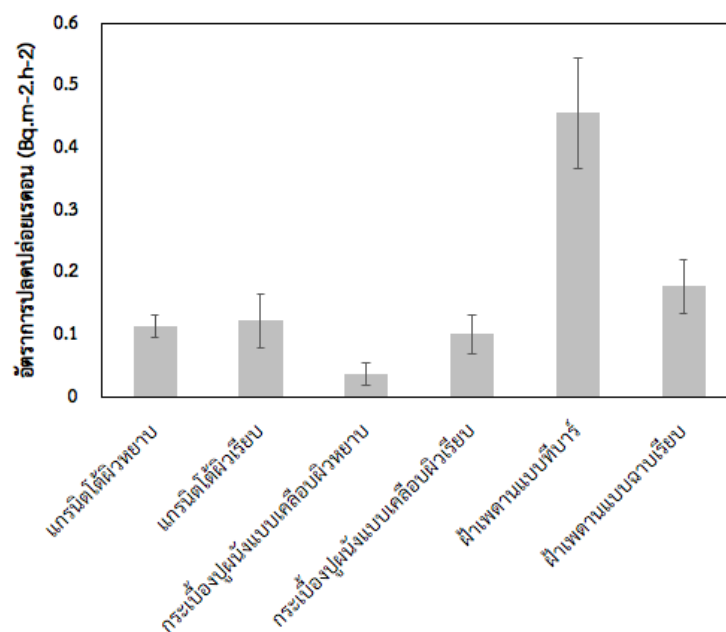
รูปที่ 7 แสดงการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของ  
ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทพื้น พบว่า หินอ่อนเทา  
ขาวมีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงที่สุด เท่ากับ  $0.31 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  รองลงมา ได้แก่ แกรนิตเขาโทน แกรนิตดำ  
ไทย กระเบื้องปูพื้นแบบเคลือบผิวหยาบ และ กระเบื้อง  
ปูพื้นแบบเคลือบผิวเรียบ มีค่าการปลดปล่อยก๊าซ  
เรดอน  $0.29, 0.12, 0.09$  และ  $0.04 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$   
ตามลำดับ เห็นได้ว่า วัสดุปูพื้นชนิดที่เป็นหินธรรมชาติ  
จะมีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงกว่าวัสดุปูพื้นที่ผลิต  
ขึ้นใหม่ เนื่องจากก๊าซเรดอนเกิดจากการสลายตัวของ  
แร่เรเดียมและยูเรเนียม ซึ่งมีอยู่ในดินและหินทั่วไปบน  
พื้นโลก ดังนั้นจึงทำให้วัสดุปูพื้นที่เป็นหินธรรมชาติมีค่า  
การปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูง



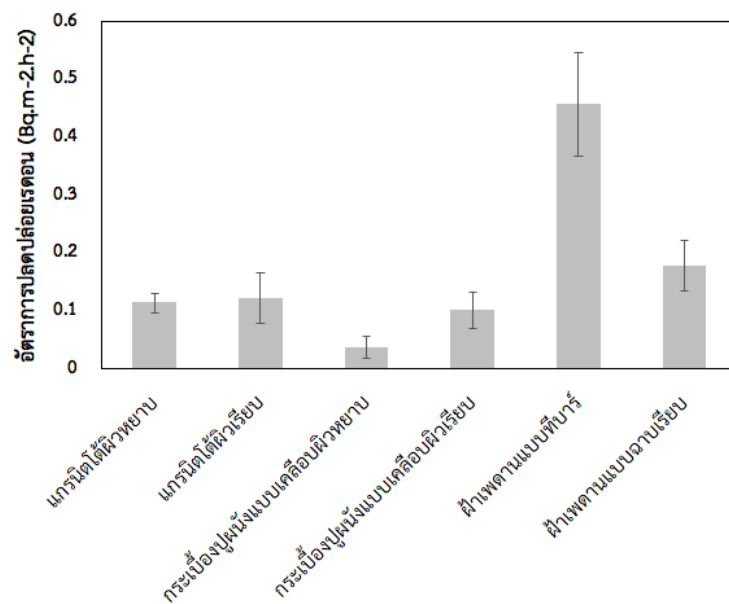
รูปที่ 5 การปลดปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง



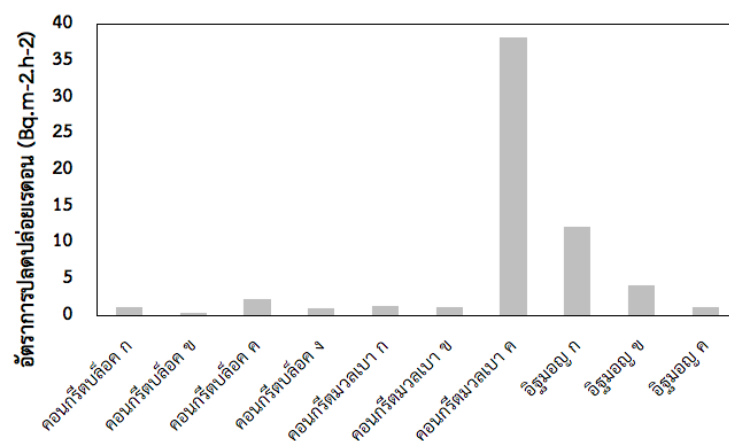
รูปที่ 6 การปลดปล่อยก๊าซเรดอนของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทผนัง



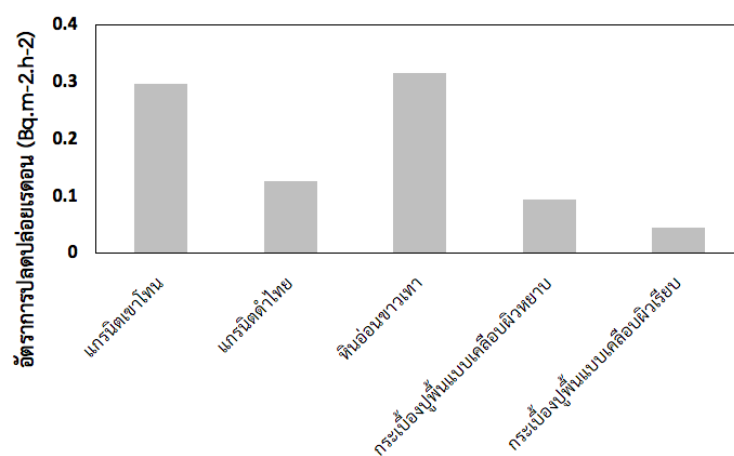
รูปที่ 7 การปลดปล่อยก๊าซเรดอนของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทพื้น



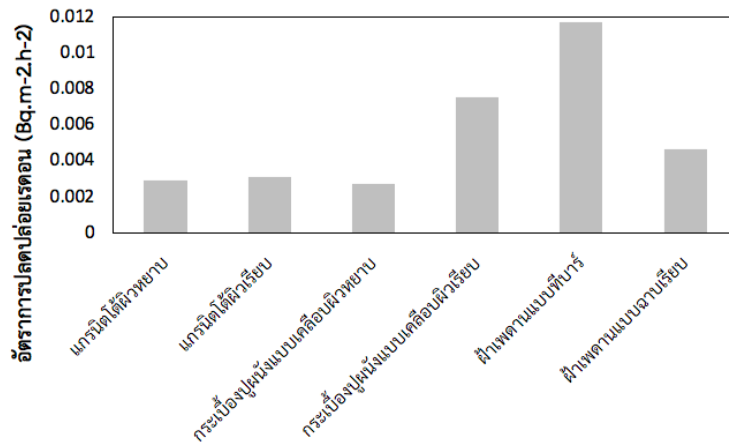
รูปที่ 8 การปลดปล่อยก๊าซเรดอนของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างวัสดุอื่น ๆ



รูปที่ 9 ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจากผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทผนังภายในห้องพักจำลอง



รูปที่ 10 ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจากผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทพื้นภายในห้องพักจำลอง



รูปที่ 11 ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจากผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทวัสดุอื่น ๆ ภายในห้องพักจำลอง

รูปที่ 8 แสดงการปลดปล่อยก๊าซเรดอนของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างวัสดุอื่น ๆ พบว่า ฝ้าเพดานแบบทีบาร์มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.456 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และกระเบื้องปูผนังแบบเคลือบผิวฮาปที่ค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.037 \text{ Bq.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของแผ่นฝ้าทั้ง 2 ชนิดต่างกัน โดยแผ่นฝ้าฉาบเรียบมีวัสดุปิดผิวอยู่ที่พื้นผิวของแผ่นฝ้าทั้งสองด้าน ทำให้ก๊าซเรดอนสามารถแพร่ออกมาสู่อากาศได้ยากกว่าแผ่นฝ้าทีบาร์ซึ่งไม่มีวัสดุปิดพื้นผิว แต่เป็นเพียงการอัดตายเพื่อให้เกิดลวดลายต่าง ๆ จึงทำให้ก๊าซเรดอนสามารถเกิดการแพร่ได้ง่ายกว่า

### 3.3 ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในห้องพักจำลอง

รูปที่ 9, 10 และ 11 ความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจากผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทผนัง พื้น และวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ ภายในห้องพักจำลอง

การสร้างมาตรฐานสำหรับใช้ควบคุมปริมาณการได้รับก๊าซเรดอนจากสิ่งแวดล้อม ทั้งภายในและภายนอกอาคาร กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางทั้งในและต่างประเทศ แต่ด้วยคุณสมบัติของก๊าซเรดอนทำให้เป็นการยากที่จะกำหนด “ระดับปฏิบัติ (Action level)” ขึ้นมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการปฏิบัติในแต่ละประเทศแต่ควรมีระดับค่าปริมาณควบคุมก๊าซเรดอนที่ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมที่ชัดเจนหรือทำได้ [8] นอกจากนี้ในบางประเทศยังใช้วิธีการกำหนด “ระดับอ้างอิง (Reference level)” ขึ้นมา ซึ่งเป็นการอ้างอิงจากค่าระดับที่ใช้เป็น

เกณฑ์เฉลี่ยจากองค์กรที่เกี่ยวข้อง เช่น องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : US EPA) ที่ได้มีการกำหนดระดับเรดอนภายในอาคารโดยเฉลี่ยไว้ที่  $148 \text{ Bq m}^{-3}$

เมื่อพิจารณาเลือกวัสดุก่อสร้างชนิดที่มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงที่สุดมาจำลองเป็นห้องพักอาศัย โดยใช้คอนกรีตมวลเบา หินอ่อน และแผ่นฝ้าทีบาร์ เป็นวัสดุก่อผนัง วัสดุปูพื้น และวัสดุฝ้าเพดาน ตามลำดับ พบว่าอย่างไรก็ตามองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (US EPA) ก็ยังเชื่อว่า ไม่มีระดับเรดอนที่ปลอดภัยจริง ไม่ว่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนจะอยู่ในระดับใดก็ตาม (US EPA, 2001) สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดค่ามาตรฐานความเข้มข้นของเรดอนขึ้นใช้ ซึ่งระดับที่เหมาะสมกับประเทศไทยอาจจะสูงกว่าหรือต่ำกว่ามาตรฐานของประเทศอื่น ๆ ก็เป็นไปได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของเรดอนเฉลี่ยทั่วประเทศ [6]

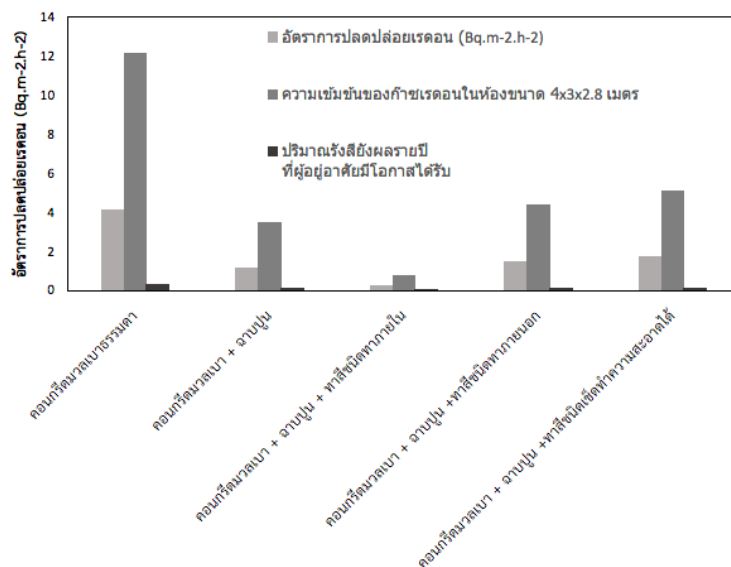
เคลือบผิวเรียบมีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนมากกว่ากระเบื้องปูผนังแบบเคลือบผิวฮาป และวัสดุฝ้าเพดาน พบว่าฝ้าเพดานแบบทีบาร์มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนมากกว่าฝ้าเพดานแบบฉาบเรียบ ดังนั้นภายในห้องพักอาศัยจะมีปริมาณรังสียังผลรายปีที่ผู้อยู่อาศัยมีโอกาสได้รับ ประมาณ 0.983 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยตามเกณฑ์มาตรฐานสากลแล้วไม่ควรเกิน 1 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี [8]

ตารางที่ 1 ปริมาณรังสียังผลรายปีที่ผู้อยู่อาศัยมีโอกาสได้รับ

| วัสดุก่อสร้าง                    | ปริมาณรังสียังผลรายปีที่ผู้อยู่อาศัยมีโอกาสได้รับ (mSv y <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| ประเภทวัสดุก่อผนัง               |                                                                          |
| คอนกรีตบล็อก ก                   | 0.0267                                                                   |
| คอนกรีตมวลเบา ก                  | 0.0292                                                                   |
| อิฐมวลเบา ก                      | 0.3066                                                                   |
| คอนกรีตบล็อก ข                   | 0.0072                                                                   |
| คอนกรีตมวลเบา ข                  | 0.0274                                                                   |
| อิฐมวลเบา ข                      | 0.1045                                                                   |
| คอนกรีตบล็อก ค                   | 0.0558                                                                   |
| คอนกรีตมวลเบา ค                  | 0.9638                                                                   |
| อิฐมวลเบา ค                      | 0.0288                                                                   |
| คอนกรีตบล็อกที่ผลิตเอง           | 0.0218                                                                   |
| ประเภทวัสดุปูพื้น                |                                                                          |
| แกรนิตเขาไทน์                    | 0.0075                                                                   |
| แกรนิตดำไทย                      | 0.0032                                                                   |
| หินอ่อนขาวเทา                    | 0.0080                                                                   |
| กระเบื้องปูพื้นแบบเคลือบผิวหยาบ  | 0.0024                                                                   |
| กระเบื้องปูพื้นแบบเคลือบผิวเรียบ | 0.0011                                                                   |
| แกรนิตโต้ผิวหยาบ                 | 0.0029                                                                   |
| แกรนิตโต้ผิวเรียบ                | 0.0031                                                                   |
| ประเภทวัสดุปูผนัง                |                                                                          |
| กระเบื้องปูผนังแบบเคลือบผิวหยาบ  | 0.0027                                                                   |
| กระเบื้องปูผนังแบบเคลือบผิวเรียบ | 0.0075                                                                   |
| ประเภทวัสดุฝ้าเพดาน              |                                                                          |
| ฝ้าเพดานแบบทึบบาร์               | 0.0117                                                                   |
| ฝ้าเพดานแบบฉาบเรียบ              | 0.0046                                                                   |

### 3.4 ผลการทดสอบเพื่อหาแนวทางในการลดการแพร่ของก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

รูปที่ 12 แสดงการทดสอบเพื่อหาแนวทางในการลดการแพร่ของก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้ในปัจจุบัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาเมื่อมีการฉาบปูนและทาสีพลาสติกชนิดทาภายในจะทำให้สามารถลดค่าการแพร่ของก๊าซเรดอนออกสู่อากาศได้มากที่สุด โดยเมื่อนำมาสร้างเป็นห้องห้องพักอาศัยขนาด 4x3x2.8 เมตร ประกอบด้วยหน้าต่างขนาด 2.4x1.1 เมตร และประตูขนาด 1x2 เมตร และกำหนดให้ห้องพักนี้มีอัตราการระบายอากาศที่ 0.35 ต่อชั่วโมง จะทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนภายในห้องลดลงเหลือ 0.788 เบคเคอเรลต่อลูกบาศก์เมตร และทำให้ปริมาณรังสียังผลรายปีที่ผู้อยู่อาศัยมีโอกาสได้รับมีค่าลดลงเหลือเพียง 0.020 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี นอกจากนี้ผลการทดสอบยังพบว่าคอนกรีตมวลเบาเมื่อมีการฉาบปูนและทาสีชนิดทาภายนอกและทาสีชนิดเซ็ดล้างทำความสะอาดได้ จะทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซเรดอนที่แพร่ออกมามีค่าสูงกว่าการที่คอนกรีตมวลเบาไม่มีการฉาบปูนเพียงอย่างเดียว แสดงว่าสีทั้ง 2 ชนิดนี้มีการปลดปล่อยก๊าซเรดอนออกมาด้วย ข้อมูลวิจัยที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ รัชพงศ์ ศรีสุวรรณ และคณะ [6] พบว่าการนำวัสดุปิดผิวมาเคลือบหรือทาที่ผิวหน้าสามารถช่วยลดปริมาณก๊าซเรดอนที่ถูกปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศได้ โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือการฉาบปูนที่ผิวหน้าแล้วทาด้วยสีพลาสติก และสอดคล้องกับบทความของภาวนา ปรีญาทกุล [4] ที่แนะนำการทาสีเคลือบผิวหน้าของพื้นหรือผนัง การบุทึบฝ้าผนังด้วยแผ่นอลูมิเนียมในบริเวณบ้านที่ก่อสร้างสามารถลดปริมาณของรังสีได้



รูปที่ 12 การทดสอบเพื่อหาแนวทางในการลดการแพร่ของก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการศึกษาปริมาณก๊าซเรดอนและแนวทางแก้ไขของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างประเภทวัสดุเปลือกอาคาร สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) ทรายมีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนมากที่สุดในกลุ่มวัสดุของการผลิตวัสดุก่อสร้าง

2) บล็อกมวลเบาแหล่ง ค มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนมากที่สุดในกลุ่มผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง

3) เมื่อทดลองจำลองผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างเป็นห้องจำลอง พบว่าการเลือกวัสดุก่อสร้างชนิดที่มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนสูงที่สุดมาจำลองเป็นห้องพักอาศัย โดยใช้คอนกรีตมวลเบา หินอ่อน และแผ่นฝ้าที่บาร์ เป็นวัสดุก่อผนัง วัสดุปูพื้น และวัสดุฝ้าเพดาน มีค่าการปลดปล่อยก๊าซเรดอนไม่เกินกว่าค่าที่แนะนำจาก US EPA

4) การคำนวณการปลดปล่อยก๊าซเรดอนภายในห้องพักอาศัยรายปีที่ผู้อยู่อาศัยมีโอกาสได้รับ มีค่าประมาณ 0.983 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยตามเกณฑ์มาตรฐานสากลแล้วไม่ควรมีค่าเกิน 1 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี

5) แนวทางในการลดการแพร่ก๊าซเรดอนจากคอนกรีตมวลเบาซึ่งเป็นวัสดุที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรดอนมากที่สุด คือการฉาบปูนและทาสีพลาสติกชนิดทากายในจะทำให้สามารถลดค่าการแพร่ของก๊าซเรดอนออกสู่อากาศได้มากที่สุด

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2555

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR, New York, 2008.
- [2] Kumnuantip C, Radon gas in buildings and construction materials. Journal of Engineering RMUTT. 2009;7(1):1-11. (in Thai)

[3] Panpiboon P, Atyotha V, Choawanklarng V, Sola P, Measuring the concentration of radon in the air at Amphur Meaung, mahasarakham Province. Research report. Rajabhat Maha Sarakham University; 2016. (in Thai)

[4] Pariyawatkul P, Radon. Working Conditions Safety Group, Office of Safety Technology; 2014 [sited 2022 May 1]. Available from: <http://php.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2014/03/8Radon.pdf>

[5] Otoo F, Darko E. O, Emi-Reynolds G, Andam A.B, Adukpo O.K, Radiological impact of soil as a source of Building material, Radiat. Prot. Environ, 2012;35:22-8.

[6] Srisuwan T, Wanabonges P, Tantasavasdi C, The influence of finishing materials on radon exhalation from concrete with phosphogypsum additives, Journal of Architectural/ Planning Research and Studies (JARS). 2012;9(2):105–12. (in Thai)

[7] National Cancer Institute. Indoor air pollution, Aggressive cancer news, Cancer Institute National Medical Department, Ministry of Public Health; [sited 2022 May 1]. Available from : <https://www.nci.go.th/en/Knowledge/download/4.pdf>.

[8] International Commission on Radiological Protection, Age-dependent doses to members of the public from Intake of Radionuclides- Part 1. ICRP Publication 56. 1990;20(2)

# ผลของการเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวสัมผัสของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวชนิดสัมผัสด้านนอก

สุริยา สุกรินทร์<sup>1</sup> มนุศักดิ์ จานทอง<sup>2</sup> และ สถาพร ทองวิก<sup>3\*</sup>

suriya\_su@mail.rmutt.ac.th<sup>1</sup>, manusak.j@en.rmutt.ac.th<sup>2</sup>, sathaporn.th@en.rmutt.ac.th<sup>3\*</sup>

<sup>1-3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 15-May-2021 |
| Revised  | : 9-Apr-2022  |
| Accepted | : 18-Apr-2022 |

## บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ทางความร้อนของขดท่อสารทำงาน (helical coil) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวชนิด coil-contract-shell (CCS) ซึ่งใช้งานร่วมกับระบบปั๊มความร้อน (Heat pump) ที่ผ่านขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสด้านข้างของขดท่อสารทำงาน ด้วยกรรมวิธีการรีดจากท่อที่มีหน้าตัดกลม (OC) ให้หน้าตัดของท่อมีลักษณะแบน (FC) ผลของการทดสอบในตัวอย่างขดท่อสารทำงานทั้ง 3 แบบ โดยใช้ น้ำอุณหภูมิ 50 °C เป็นสารทำงาน และควบคุมอัตราการไหลในอยู่ช่วง 0.2-2.5 ลิตรต่อนาทีภายใต้สภาวะอุณหภูมิบริเวณผิวท่อคงที่ พบว่าตัวอย่างขดท่อที่ผ่านกรรมวิธีการรีดแล้วนั้นจะไฮดรอลิกไดมิเตอร์สูงขึ้น จากการทดสอบตัวอย่าง FC ที่มีไฮดรอลิกไดมิเตอร์สูงสุด มีการถ่ายเทความร้อนรวมลดลงเฉลี่ย 21% และความสามารถในการพาความร้อนลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่าง FC ที่มีไฮดรอลิกไดมิเตอร์ต่ำที่สุด โดยมีอัตราการไหลเป็นปัจจัยเสริม ในทางกลับกันตัวอย่าง FC ที่มีไฮดรอลิกไดมิเตอร์สูงที่สุดนั้น มีการถ่ายเทพลังงานความร้อนบริเวณผิวข้างเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 37% ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ เพราะเป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนในด้านที่สัมผัสกับถังเก็บสารตัวนำ เมื่อเทียบกับท่อกกลมหรือ FC ที่มีไฮดรอลิกไดมิเตอร์ต่ำที่มีการถ่ายเทความร้อนรวมที่สูงกว่า แต่กลับเป็นการถ่ายเทความร้อนไปสู่ด้านที่หุ้มฉนวนกันความร้อนเสียเป็นส่วนใหญ่

**คำสำคัญ:** เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว ปั๊มความร้อน การถ่ายเทความร้อน พลังงานทดแทน

# Effect of Increasing the Heat Transfer Area in Helical Coil Contract Shell Heat Exchanger

Suriya Sukarin<sup>1</sup>, Manusak Janthong<sup>2</sup> and Sathaporn Thongwik<sup>3\*</sup>

suriya\_su@mail.rmutt.ac.th<sup>1</sup>, manusak.j@en.rmutt.ac.th<sup>2</sup>, sathaporn.th@en.rmutt.ac.th<sup>3\*</sup>

<sup>1-3</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 15-May-2021 |
| Revised  | : 9-Apr-2022  |
| Accepted | : 18-Apr-2022 |

## Abstract

This paper presents the thermal analysis in the helical coil of coil-contract-shell type heat exchanger (CCS). This in use helical coil is applied through increasing the lateral contact surface area by rolling. This process causes a pipe with a round cross-section (OC) to be converted to a pipe that is flat. (FC) and make it hydraulic diameter increase. Three FC samples were tested using water at 50 °C as the working medium and the flow rate was controlled between 0.2-2.5 l/min under constant tube surface temperature conditions. The FC with the highest hydraulic diameter had an average 21% reduction in total heat transfer and reduced convection capacity compared to the FC sample with the lowest hydraulic diameter, with flow rate is an auxiliary factor. This test showed an average increase in heat energy transfer over the flanks. 37% in the example FC with the maximum hydraulic diameter. This result is beneficial for the CCS heat exchanger because it transfers the heat energy on the side in contact with the conductor storage tank. Compared to FC with similar OC hydraulic diameter has a high total heat transfer, but most of the heat is transferred to the insulated side.

**Keywords:** helical heat exchanger, heat pump, heat transfer, Renewable energy

## 1. บทนำ

ระบบปั๊มความร้อน (Heat pump) เป็นระบบผลิตความร้อนชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการดึงความร้อนจากกระบวนการทางความร้อนต่างๆ มาถ่ายเทให้กับสารทำงาน แล้วนำความร้อนที่ได้นั้นไปใช้การอุปโภคหรือ บริโภค รวมถึงการปรับอากาศในบริเวณที่ต้องการความร้อน[1] [2] ซึ่งในปัจจุบันการพัฒนาเรื่องของประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อนนั้นมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ในทางวิชาการสามารถจำแนกประเภทของระบบปั๊มความร้อนตามการศึกษา Giti Nouri et al. [3] ได้ดังนี้

1. กลุ่มระบบปั๊มความร้อนที่ใช้งานร่วมกับระบบพลังงานใต้พื้นโลก (Geothermal Energy) ซึ่งกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบย่อย คือ ground source heat pump systems (GSHPs) และ Ground coupled heat pumps (GCHPs)

2. กลุ่ม solar assisted ground source heat pump system (SAGSHPs) เป็นการนำเอาระบบพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยในการทำงานของระบบปั๊มความร้อน ระบบชนิดนี้เป็นที่นิยมเป็นอย่างมากเพราะง่ายต่อการติดตั้งและใช้งาน

นอกจากการแบ่งประเภทของระบบปั๊มความร้อน ตามลักษณะของการใช้งานแล้ว Zhiyao Yang et al. [4] ได้นำเสนอลักษณะของปั๊มความร้อนตามการดูดซับพลังงาน โดยแบ่งออกเป็นการดูดจากสารที่สถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซ

เมื่อพิจารณาถึงอุปกรณ์พื้นฐานของระบบปั๊มความร้อน นั้นจะ ประกอบด้วย Compressor, Evaporator ,Condenser ,Pipe line [5] ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่พบในระบบทำความเย็นปกติเช่นกัน แต่ในกรณีของระบบปั๊มความร้อนแบบดูดซับนั้นจะมี Absorber และ Generator เพิ่มมาในระบบ [6] ในกรณีที่ระบบปั๊มความร้อนนั้นมีการนำเอาระบบพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยในการทำงาน [7] จะมีการเพิ่มชุดแผงรับความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar collector) หรือ แผงผลิตความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar air collector) หรือ

ชุดแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic/thermal) เพิ่มเข้าไปในระบบ ซึ่งปัจจุบันมีการศึกษาทดสอบ และเปรียบเทียบการทำงานของระบบกันอย่างกว้างขวาง เช่น Bellos et al. [8] ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยการทำงานของ Heat pump ถึง 4 แบบประกอบด้วย

1. การผลิตอากาศร้อนด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV modules)

2. การผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับแผงผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (flat plate collectors)

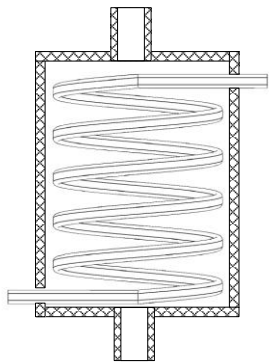
3. การผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (PV/T)

4. การผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV modules) และแผงผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (flat plate collectors)

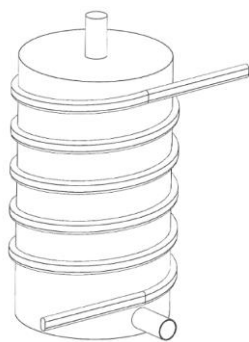
เช่นเดียวกับการทดลองของ Rithy Kong et al. [9] ที่นำระบบ Photovoltaic/thermal (PV/T) มาใช้งานร่วมกับระบบปั๊มความร้อน นอกจากนั้นยังมีการนำ Ground heat exchanger มาใช้งานร่วมกับระบบปั๊มความร้อน ซึ่งระบบนี้เรียกว่า Ground-coupled heat pump (GCHP) ซึ่งเป็นการนำพลังงานความร้อนใต้พิภพมาช่วยในการทำงานของระบบปั๊มความร้อน และยังมีการนำระบบดังกล่าวมาใช้งานร่วมกับระบบผลิตความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเรียกระบบเช่นนี้ว่า Hybrid ground-coupled heat pump (HGCHP) [10]

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นคือลักษณะของระบบปั๊มความร้อนที่มีการศึกษาและมีการตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการต่างๆ หากพิจารณาระบบทุกแบบที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นนั้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ถือเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญมากในกระบวนการถ่ายเทพลังงานความร้อนของระบบปั๊มความร้อน เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อนที่สูงขึ้น ย่อมเกิดมาจากการเลือกใช้งาน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งบทความฉบับนี้จะกล่าวถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วน of liquid vapor heat exchanger ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำงานและสารตัวนำซึ่งในที่นี้คือน้ำ โดยน้ำที่ได้รับพลังงานมานั้นจะถูกนำไปใช้งานภายในที่พักอาศัย ( Domestic hot water ) ซึ่งจุดดังกล่าวนี้ถือเป็นจุดหนึ่งที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบปั๊มความร้อน (COP) [11] ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้งาน ณ จุดนี้มีให้เลือกใช้งานหลายประเภท โดยผู้เขียนจะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว (helical heat exchanger) เท่านั้น



รูปที่ 1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวชนิด coil-in-shell (CNS)



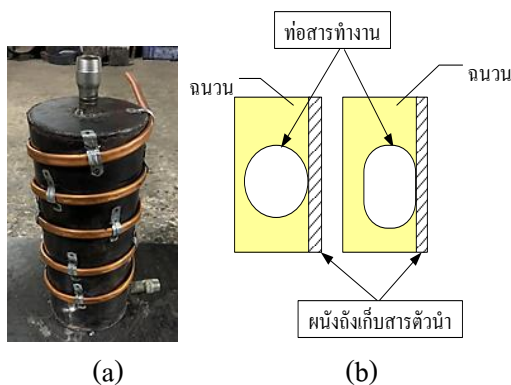
รูปที่ 2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวชนิด coil-contract-shell (CCN)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะเป็นท่อขดเกลียวโดยมีสารทำงานไหลภายในท่อ ดังแสดงในรูปที่

1 และรูปที่ 2 จากการศึกษาของ Chingulpitak et al. [12] พบว่าการไหลภายในท่อขดเกลียวซึ่งมีลักษณะเดียวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวนั้นมีแรงดันตกคร่อม (Pressure drop) เกิดขึ้นสูงกว่าท่อที่มีลักษณะตรง (straight tube) ถึง 20 % นอกจากนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของขดท่อ (Coil diameter) และอัตราส่วนการขด (Curvature ratio) นั้นมีผลต่อความต้านทานการไหล (Friction factor) ของสารทำงานซึ่งไหลอยู่ในท่อ ในการไหลเช่นนี้การแลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดที่บริเวณผิวของท่อ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Blanco et al. [13] ที่ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียว ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทองแดงขดเกลียวซึ่งมีผนังด้านหนึ่งของท่อสัมผัสกัน โดยพลังงานความร้อนจะเกิดการถ่ายเทในบริเวณที่พื้นผิวของท่อสัมผัสกัน

ปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวที่นิยมใช้งาน มีลักษณะติดตั้งคู่กับเก็บน้ำร้อน โดยที่ขดท่อสารทำงาน (Helical coil) จะถูกติดตั้งภายใน ในลักษณะแช่อยู่ในน้ำ ลักษณะนี้เรียกว่า coil-in-shell (CNS) ซึ่งในบทความทางวิชาการหลายฉบับได้มีการศึกษา Heat exchanger ชนิดนี้กันอย่างแพร่หลาย Jamshidi et al. [14] ได้นำเสนอผลการทดลองที่กล่าวถึงระยะพิชต์ coil diameter ของ helical มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบ การทดลองของ N. Ghorbani et al. [15] แสดงให้เห็นว่าผลของ Nusselt number นั้นไม่มีความสัมพันธ์กับ Reynolds number อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อ (Tube diameter) แต่พื้นผิวทั้งหมดของขดท่อต่างหากที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน แต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของ CNS จะเห็นว่าขดท่อสารทำงาน (Coil) ซึ่งโดยปกติจะใช้สารทำความเย็นเป็นสารทำงานนั้นถูกติดตั้งในถัง (Shell) จากการศึกษาของ Askar et al. [16] พบว่าการระเหิดของสารทำความเย็น (R32) ในระบบปิดมีความรุนแรงกว่าการระเหิดของสารในกลุ่ม methane หรือ propane ถึงแม้ R32 นั้นมีความเร็วในการเผาไหม้ที่ต่ำกว่า ซึ่ง Colbourne et al. [17] ได้เสนอวิธีการลดอันตรายที่เกิดจากการรั่วไหลของสารทำงาน

อย่างมีนัยสำคัญ โดยการทำให้เกิดการถ่ายเทของอากาศรอบๆ บริเวณที่เกิดการรั่วไหลเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ต่ำกว่าขีดจำกัดที่จะทำให้เกิดการติดไฟจากปัญหาดังกล่าว จึงมีการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวในลักษณะ coil-contract-shell (CCS) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งมีความปลอดภัยมากกว่าแบบ CNS ดังแสดงในภาพที่ 3 (a) ซึ่งเป็นชิ้นงานจริงของ CNS ที่ประกอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดเกลียวเข้ากับถังเก็บสารตัวนำเรียบร้อยแล้ว และพร้อมที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการหุ้มฉนวนกันความร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขดท่อสารทำงานนั้นไม่ได้ถูกติดตั้งในพื้นที่ปิด แต่ CCS นั้นกลับมีข้อเสียในเรื่องของพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยกว่า CNS ด้วยปัญหาดังกล่าวหากทำการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในบริเวณด้านข้างของท่อสารทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 3 (a) ซึ่งบริเวณดังกล่าวนี้จะต้องไปสัมผัสโดยตรงกับถังเก็บสารตัวนำ จึงถือเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ CCS ได้ ซึ่งในประเด็นนี้จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการทำวิจัยของผู้เขียนในครั้งนี้



รูปที่ 3 เปรียบเทียบผิวสัมผัสของการถ่ายเทความร้อนของ CCN

## 2.การทดสอบระบบ

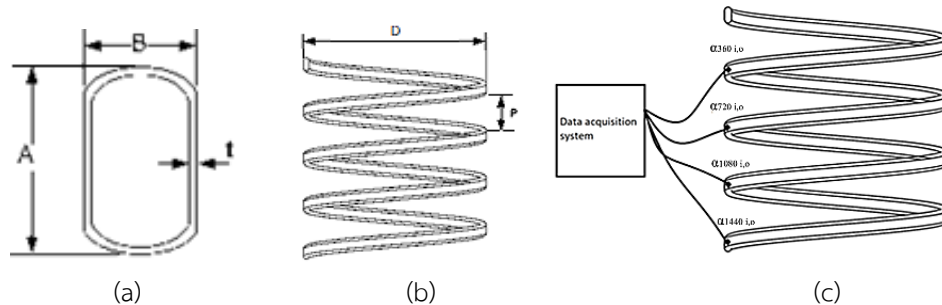
เมื่อพิจารณากระบวนการถ่ายเทความร้อนของ CNS จะต้องกล่าวถึงการนำความร้อนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง FC และผนังของถังเก็บสารตัวนำเป็นหลัก เนื่องจากสารทำงานเมื่อไหลภายในขดท่อเกลียวจะมีการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังของท่อ (Coil Shell :

CS) จากนั้นจึงถ่ายเทความร้อนไปสู่ผนังของถังบรรจุสารตัวนำ ในกระบวนการนี้ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบคือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผนังของท่อสารทำงาน (Coil Shell Contact Area : CA) และผนังของถังสารทำงาน ดังรูปที่ 3 (b) ในกรณีของท่อหน้าตัดกลม (OC) ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยมากเมื่อเทียบกับท่อที่มีลักษณะแบน (FC) ดังนั้นหากทำการเพิ่มพื้นที่ผิวข้างของท่อสารทำงาน ด้วยกรรมวิธีการรีดให้ท่อสารทำงานเป็นแบบ FC ย่อมส่งผลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนของ CCS อย่างมีนัยสำคัญ ผู้เขียนจึงทำการสร้างขดท่อสารทำงานจากท่อทองแดงซึ่งมีหน้าตัดวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) 10 mm หนา (t) 1mm แล้วนำมารีดให้มีลักษณะเป็น FC ตามภาพที่ 4 โดยมีความสูง (A) และความกว้าง (B) ของหน้าตัดท่อแตกต่างกัน 3 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดตัวอย่างทั้ง 3 นั้นมีขดเกลียวจำนวน 4 รอบ (C) มีระยะพิตช์ (P) 50 mm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของขดท่อ (D) คือ 180 mm เท่ากัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้ FC ทั้ง 3 มีความแตกต่างของขนาดพื้นที่ผิวข้างด้านที่สัมผัสถังเก็บสารตัวนำและไฮดรอลิกไดมิเตอร์ แต่มีอัตราส่วนการขด (Curvature ratio) ที่เท่ากัน

จากนั้นนำตัวอย่างของ FC แต่ละชุดมาติดตั้ง Thermocouple type K สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิของผนังท่อ ( $T_s$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ FC อ้างอิงตามสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยติดตั้งที่บริเวณผนังของขดท่อทั้งด้านในและด้านนอก นับจากจุดทางเข้าของสารทำงานในตำแหน่ง  $360^\circ$   $720^\circ$   $1080^\circ$  และ  $1440^\circ$  ตามแนวการบิดของ FC ดังแสดงในรูปที่ 4(c) ซึ่งในบทความฉบับนี้ผู้เขียนจะนำเสนอเฉพาะการเปรียบเทียบ สภาวะการไหลภายในและการถ่ายเทความร้อนของ FC แต่ละตัวอย่างเท่านั้น จึงมิได้ประกอบ FC เข้ากับถังเก็บสารตัวนำ แต่นำตัวอย่างของ FC แต่ละแบบไปแช่ในอ่างน้ำซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิคงที่ เพื่อให้ FC ที่ทำการทดสอบอยู่ในสภาวะ Constant Surface temperature [18] การทดสอบนี้ผู้เขียนควบคุมอัตราการไหล( $m$ ) ตลอดการทดสอบ

อยู่ในช่วง 0.2 ถึง 2.5 L/min โดยสารทำงานที่ไหลเข้าสู่ FC ตัวอย่างเป็นน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 50°C ด้วยเครื่องทำความร้อนขนาดขนาด 4000 W โดยติดตั้ง

Thermocouple type K ในบริเวณทางเข้า ( $T_{ic}$ ) และออกของขดท่อ ( $T_{oc}$ ) เพื่อบันทึกข้อมูลสำหรับนำไปใช้วิเคราะห์ตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

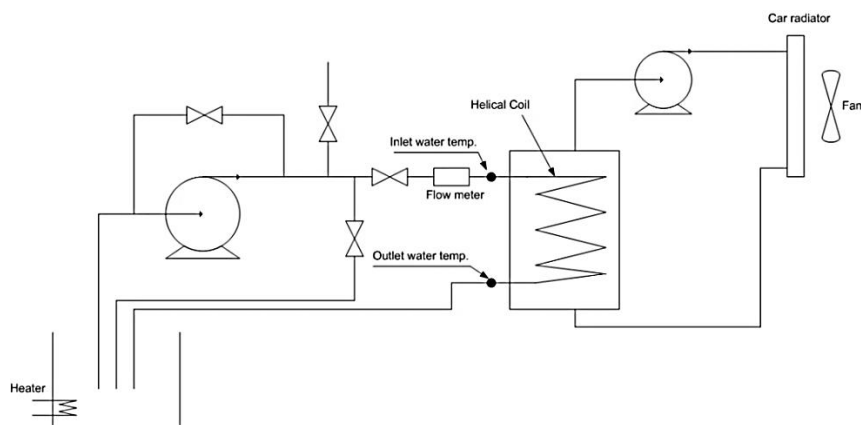


รูปที่ 4 ลักษณะของ Helical Coil ที่ใช้ในการทดสอบและการติดตั้งเครื่องมือวัด

ตารางที่ 1 ขนาดของขดท่อตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

| ตัวอย่าง | A<br>(mm) | B<br>(mm) | $A_{all}$<br>(m <sup>2</sup> ) | $A_{wall}$<br>(m <sup>2</sup> ) | $D_h$<br>(mm) |
|----------|-----------|-----------|--------------------------------|---------------------------------|---------------|
| FC-1     | 16.00     | 8.00      | 0.096                          | 0.0183                          | 11.11         |
| FC-2     | 14.00     | 10.00     | 0.079                          | 0.0092                          | 12.03         |
| FC-2     | 15.00     | 9.00      | 0.094                          | 0.0137                          | 11.68         |

$t = 1 \text{ mm.}$  ,  $P=50\text{mm.}$  ,  $D=180 \text{ mm.}$  ,  $C = 4$



รูปที่ 5 แผนภาพชุดทดสอบ

### 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

กระบวนการวิเคราะห์ทางความร้อนตามที่มีผู้เขียนได้จัดอุปกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งมีรายละเอียดตามที่ได้อธิบายไปแล้วนั้น พลังความร้อนที่เกิดขึ้นจากการไหลภายในขดท่อ FC จะถูกถ่ายเทไปสู่ น้ำในอ่างทั้งหมด ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะแบ่งออกเป็น 2

ส่วน คือการวิเคราะห์ความร้อนรวม ( $\dot{Q}_{all}$ ) อ้างอิงตามสมการที่ 1 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์จากพื้นที่ผิวของ FC ทั้งหมด ( $A_{all}$ ) และวิเคราะห์ความร้อนบริเวณพื้นผิวสัมผัสกับผนังของถังเก็บสารตัวนำ ( $\dot{Q}_{wall}$ ) ซึ่งพิจารณาเฉพาะพื้นผิวของข้างด้านในของ FC ( $A_{wall}$ ) เท่านั้น โดยอ้างอิงตามสมการที่ 5

$$\dot{Q}_{all} = \dot{m}c_p(T_{oc} - T_{ic}) \quad (1)$$

$$\Delta T_{LM,all} = T_s - \frac{T_i + T_e}{2} \quad (2)$$

$$h = -\frac{\dot{Q}_{all}}{A_{all} \Delta T_{LM,all}} \quad (3)$$

$$\dot{q}_{all} = \frac{\dot{Q}_{all}}{A_{all}} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{wall} = \dot{q}_{all} A_{wall} \quad (5)$$

เมื่อ  $T_{oc}$  คือ อุณหภูมิน้ำออก FC (°C)

$T_{ic}$  คือ อุณหภูมิน้ำเข้า FC (°C)

$T_s$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิว FC (°C)

$T_i$  คือ อุณหภูมิสารทำงานเข้า FC (°C)

$T_e$  คือ อุณหภูมิสารทำงานออก FC (°C)

$\dot{q}_{all}$  คือ ฟลักซ์ความร้อนรวม (W/m<sup>2</sup>)

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m<sup>2</sup> · °C)

การวิเคราะห์การไหลภายในท่อของ FC  
คำนวณเซลล์นัมเบอร์ ( $Nu$ ) และ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( $Re$ ) ดังสมการที่ 6 และ 7

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (6)$$

$$Re = \frac{\rho D_h u}{\mu} \quad (7)$$

$$D_h = 4 \left[ \frac{\frac{\pi B^2}{4} + B(A-B)}{\pi B + 2(A-B)} \right] \quad (9)$$

เมื่อ  $D_h$  คือ ไฮดรอลิกไดมิเตอร์ [19] โดยตัวแปร A และ B อ้างอิงตามภาพที่ 4 (a)

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อนั้น จากงานวิจัยของ E. Pavan Kumar et.al. [20] ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากการหาผลต่างของความดันภายในขดท่อ ( $\Delta P$ ) อ้างอิงตามสมการ 10

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{\rho u^2 L} \quad (10)$$

เนื่องจากการทดสอบในบทความฉบับนี้มีช่วงอัตราการไหลที่ต่ำประกอบกับขนาดของไฮดรอลิกไดมิเตอร์ต่อความยาวของขดท่อนั้นมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ด้วยการหาผลต่างของความดันภายในขดท่อ ( $\Delta P$ ) ผู้เขียนจึงใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Schmidt [21] [22] ซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลภายในขดท่อ ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับและมีการอ้างอิงในวารสารทางวิชาการอย่างแพร่หลาย ซึ่งขดท่อนั้นจะมี  $\frac{D_h}{D}$  อยู่ในช่วง 4.91-81.1 โดยอ้างอิงตามสมการที่ 11-13

กรณี  $100 < Re < Re_{cr}$

$$f = \left[ 1 + 0.14 \left( \frac{D_h}{D} \right)^{0.97} Re^k \right] \frac{16}{Re} \quad (11)$$

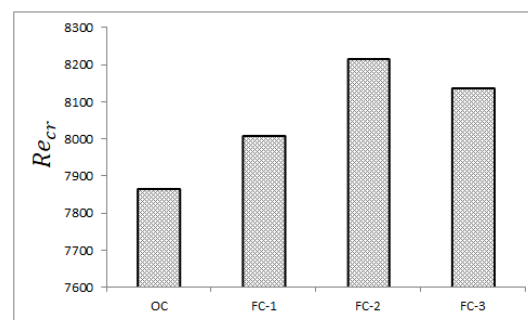
$$k = 1 - 0.644 \left( \frac{D_h}{D} \right)^{0.312}$$

กรณี  $Re_{cr} < Re < 22000$

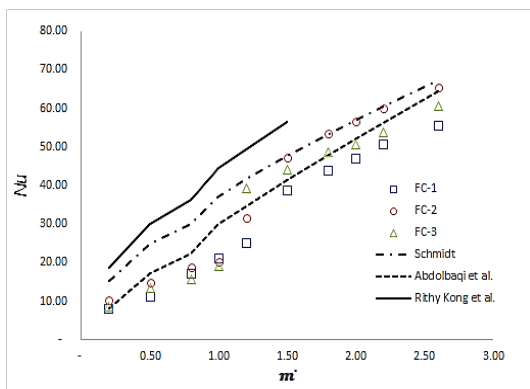
$$f = \left[ 1 + \frac{28800}{Re} \left( \frac{D_h}{D} \right)^{0.62} \right] \frac{0.079}{Re^{0.25}} \quad (12)$$

กรณี  $22000 < Re < 150000$

$$f = \left[ 1 + 0.0823 \left( 1 + \frac{D_h}{D} \right) \left( \frac{D_h}{D} \right)^{0.53} Re^{0.25} \right] \frac{0.079}{Re^{0.25}} \quad (13)$$



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤตของขดท่อตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล( $\dot{m}$ ) และค่าสเกลล้นัมเบอร์ ( $Nu$ )

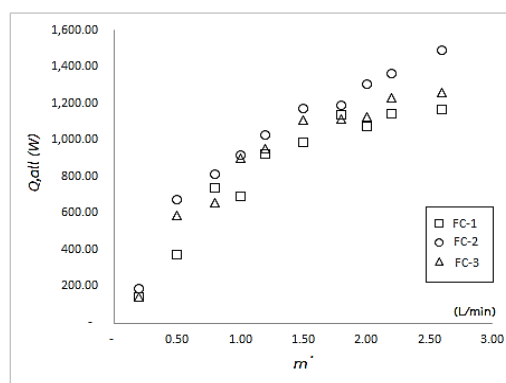
การทดสอบในบทความฉบับนี้กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤต ( $Re_{cr}$ ) ซึ่งเป็นจุดแบ่งสภาวะการไหลราบเรียบ (laminar flow) และปั่นป่วน (Turbulent flow) อ้างอิงการตามสมการที่ 14 [21] [22] ดังนี้

$$Re_{cr} = 2300 \left\{ 1 + 8.6 \left[ \frac{d}{D} \right]^{0.45} \right\} \quad (14)$$

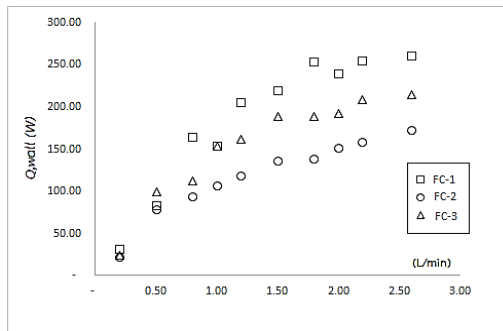
เมื่อพิจารณาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤต ( $Re_{cr}$ ) ตามผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 6 ผลของการนำท่อสารทำงานไปรีดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไฮดรอลิกไดมิเตอร์ ( $D_h$ ) การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลโดยตรงต่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤต กล่าวคือใน OC จะมีการเข้าสู่สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำกว่า FC ถึง 4.27% เมื่อเทียบกับ FC-2 ที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤตสูงที่สุดในชุดท่อตัวอย่าง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง FC ทั้ง 3 พบว่า FC-1 นั้นมีการเข้าสู่สภาวะการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำสุด ต่ำกว่า FC-2 และ FC-3 คิดเป็น 2.53% และ 1.6% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าสเกลล้นัมเบอร์ที่อัตราการไหลใดๆ กับผลการทดสอบของ Schmidt [21] [22] และ Rithy Kong et al. [23] ซึ่งลักษณะเป็น OC และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ FC ก่อนเข้าสู่กรรมวิธีการรีดคือ 10 mm และเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Abdolbaqi et al. [24] ซึ่งมีหน้าตัดท่อแบบเดียวกับ

FC แต่ท่อนั้นท่อมีลักษณะเหยียดตรง (Straight flat tubes :SFT) พบว่าในช่วงอัตราการไหลที่ต่ำกว่า 1.5 L/min ค่าสเกลล้นัมเบอร์ของ FC ทั้ง 3 ตัวอย่างนั้นมีค่าต่ำกว่า OC และ SFT แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลผลลัพธ์ของค่าสเกลล้นัมเบอร์ใน FC ทั้ง 3 นั้นลู่เข้าหาผลการทดลองของ OC โดยที่ FC-2 มีแนวโน้มลู่เข้าหาผลลัพธ์ของ OC มากที่สุดรองลงมาคือ FC-3 และ FC-1 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าสเกลล้นัมเบอร์ระหว่าง FC ทั้ง 3 ตัวอย่างนั้นพบว่าในช่วงอัตราการไหลต่ำกว่า 1.5 L/min ไม่เกิดความแตกต่างของค่าสเกลล้นัมเบอร์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะเริ่มเกิดความแตกต่างของค่าสเกลล้นัมเบอร์อย่างเห็นได้ชัด โดย FC-2 ซึ่งมีไฮดรอลิกไดมิเตอร์สูงที่สุดจะมีค่าสเกลล้นัมเบอร์สูงกว่า FC-3 และ FC-1 ที่มีไฮดรอลิกไดมิเตอร์รองลงมา นั้นหมายความว่า การเพิ่มพื้นที่ผิวข้างของชุดท่อด้วยกรรมวิธีการรีดนั้นมีผลต่อการพาความร้อนของชุดท่อตัวอย่าง โดยที่มีช่วงอัตราการไหลของสารทำงานภายในชุดท่อเป็นปัจจัยที่ช่วยเสริมทำให้เกิดความแตกต่างที่ชัดเจน นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงลักษณะหน้าตัดชุดท่อใน FC ตัวอย่างอันจากการเพิ่มพื้นที่ด้วยกรรมวิธีการรีดนั้น เป็นผลทำให้การพาความร้อนของ FC นั้นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ OC และเมื่อมีการเพิ่มพื้นที่ผิวข้างมากขึ้นจะยังเป็นปัจจัยเสริมทำให้ความสามารถในการพาความร้อนของ FC นั้นมีแนวโน้มต่ำลงไปอีก ดังแสดงในรูปที่ 7

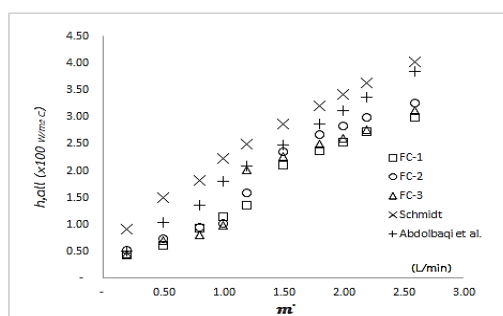


รูปที่ 8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล( $\dot{m}$ ) และ ความร้อนรวม ( $\dot{Q}_{all}$ )



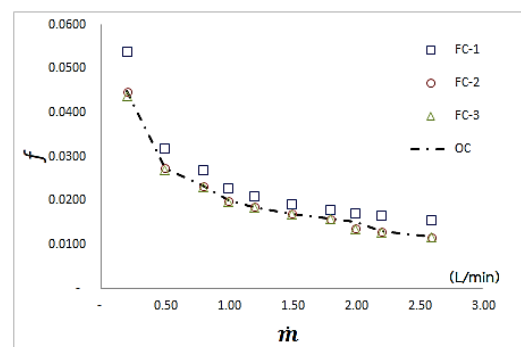
รูปที่ 9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล( $m$ ) และความร้อนบริเวณพื้นผิวสัมผัส ( $Q_{wall}$ )

เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนรวมของชุดท่อตัวอย่าง ( $\dot{Q}_{all}$ ) ซึ่งเป็นการพิจารณาจากพื้นที่รวมทั้งหมดของชุดท่อพบว่า ความร้อนรวมใน FC-2 นั้นมีพลังงานความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับ FC-1 ถึง 21% และสูงกว่า FC-3 ถึง 11.7% ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งแนวโน้มของความแตกต่างของอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมระหว่าง FC-1 และ FC-2 นั้นจะเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหล นั้นหมายความว่า การเพิ่มพื้นที่ผิวข้างของชุดท่อนั้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ FC มีแนวโน้มของอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมลด แต่ในกรณีค่าความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผนังของ FC ในด้านที่จะต้องสัมผัสกับผนังของถังเก็บสารตัวนำนั้น ในตัวอย่าง FC-1 กลับมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าตัวอย่าง FC-2 ถึง 37% และสูงกว่า FC-3 ถึง 17.2% ดังแสดงในรูปที่ 9 ผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ทราบว่า ถึงแม้ปริมาณอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของ FC-2 นั้นจะสูงที่สุด แต่กลับเป็นการถ่ายเทไปสู่ด้านที่จะต้องมีการหมุนวนซึ่งเป็นด้านที่ไม่สามารถนำความร้อนไปใช้งานได้ ดังแสดงในรูปที่ 3(b)



รูปที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล( $m$ ) และ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $h$ )

พิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $h$ ) ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากความพลังงานความร้อนรวม ( $\dot{Q}_{all}$ ) อ้างอิงตามสมการที่ 3 พบว่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันทุกตัวอย่างโดย FC-2 นั้นมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดในกลุ่มตัวอย่าง แต่ยังต่ำกว่าผลการทดลองของ Scmidt ซึ่งมีลักษณะแบบ OC และ Abdolbaqi et al. ซึ่งมีลักษณะแบบ SFT เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะตัวอย่าง FC ทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่าในช่วงอัตราการไหล 0.2-1.0 L/min นั้นเกิดความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นเพียงเล็กน้อย แต่ในช่วงการไหลตั้งแต่ 1.00 L/min เป็นต้นไปกลับเกิดความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอย่างชัดเจน โดยความแตกต่างนี้เป็นไปในลักษณะที่ FC-2 มีปริมาณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและรองลงมาคือ FC-3 และ FC-1 ตามลำดับ นั้นหมายความว่า การลดลงของไฮดรอลิกไดมิเตอร์ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของชุดท่อลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้เกิดจากไฮดรอลิกไดมิเตอร์เพียงอย่างเดียว แต่จะต้องมีช่วงของอัตราการไหลที่เหมาะสมเป็นองค์ประกอบด้วยจึงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน



รูปที่ 11 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องมาจากการไหล ( $f$ ) ที่อัตราการไหลต่างๆ

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่อัตราการไหลตลอดช่วงการทดสอบ ซึ่งแนวโน้มของ FC ทั้ง 3 ตัวอย่างนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ OC และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างของ FC ทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่า FC-1 นั้นมีสัมประสิทธิ์

แรงเสียดทานสูงสุด โดยสูงกว่า FC-2 เฉลี่ย 15.42% และสูงกว่า FC-3 เฉลี่ย 16.63% ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวข้างด้วยกรรมวิธีการรีดนั้นทำให้ FC-1 มีไฮดรอลิกไดมิเตอร์ต่ำที่สุด ส่วนใน FC-2 และ FC-3 ซึ่งมีรูปร่างของหน้าตัดท่อใกล้เคียงกับ OC จึงทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นใกล้เคียงกับ OC

#### 4. สรุป

เมื่อนำข้อต่อสารทำงานของ CCS ไปเข้าสู่กระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิวข้างด้วยกรรมวิธีการรีด การกระทำนี้ทำให้หน้าตัดของท่อ OC เปลี่ยนไปเป็น FC ผลที่ตามมาคือการเพิ่มขึ้นของไฮดรอลิกไดมิเตอร์ ซึ่งถือเป็นตัวแปรต้นของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลภายในท่อและการถ่ายเทความร้อนของขดท่อสารทำงาน จากการทดสอบตัวอย่าง FC ทั้ง 3 แบบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเพิ่มพื้นที่ผิวข้างด้วยกรรมวิธีการรีดมิได้เป็นปัจจัยเดียวที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของ FC แต่จะต้องมีอัตราการไหลของสารทำงานภายในที่เหมาะสมด้วยจึงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

2. การเพิ่มพื้นที่ผิวข้างด้วยกรรมวิธีการรีดทำให้ความสามารถในการพาความร้อน FC ลดลงเมื่อเทียบกับ OC และ SFT

3. การเพิ่มพื้นที่ผิวข้างด้วยกรรมวิธีการรีดนั้นทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของ FC นั้นลดแต่กลับเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในด้านที่สัมผัสกับผนังของถังเก็บสารตัวนำ ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อ CCS เมื่อเปรียบเทียบกับ FC ที่มีไฮดรอลิกไดมิเตอร์ต่ำใกล้เคียงกับ OC ที่ความร้อนส่วนมากนั้นถ่ายเทไปในด้านที่มีการหุ้มฉนวน

จากข้อสรุปที่ได้จากการทดสอบนี้ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการไหลของสารทำงานภายใน FC ซึ่งผลดังกล่าวช่วยให้ผู้ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด CCS และสามารถทราบถึงผลของการเพิ่มพื้นที่ผิวข้างของ FC เพื่อให้ CCS นั้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ต่อพ่วงเพื่อใช้งาน

ร่วมกับ CCS ที่ทำการออกแบบนี้ได้อย่างถูกต้องและส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบปั๊มความร้อน (COP) ที่สูงขึ้นต่อไป

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang L, Yuan H, Peng J-W, Zhang C-L. Performance modeling of air cycle heat pump water heater in cold climate. *Renewable Energy*. 2016;87:1067-75.
- [2] Ramaraj S, Braun JE, Groll EA, Horton WT. Performance analysis of liquid flooded compression with regeneration for cold climate heat pumps. *International Journal of Refrigeration*. 2016;68:50-8.
- [3] Nouri G, Noorollahi Y, Yousefi H. Solar assisted ground source heat pump systems – A review. *Applied Thermal Engineering*. 2019;163.
- [4] Yang Z, Qu M, Gluesenkamp KR. Ammonia-based chemisorption heat pumps for cold-climate heating applications: A comprehensive review. *Applied Thermal Engineering*. 2020;179.
- [5] Arpagaus C, Bless F, Schiffmann J, Bertsch SS. Multi-temperature heat pumps: A literature review. *International Journal of Refrigeration*. 2016;69:437-65.
- [6] Gao P, Chang M-M, Zhang C-L, Shao L-L. System principles and applications of hybrid sorption-compression heat pump – A review. *International Journal of Refrigeration*. 2019;108:14-25.
- [7] Lazzarin R. Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future. *International Journal of Refrigeration*. 2020;116:146-60.
- [8] Bellos E, Tzivanidis C, Moschos K, Antonopoulos KA. Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems. *Energy Conversion and Management*. 2016;120:306-19.

- [9] Kong R, Deethayat T, Asanakham A, Kiatsiriroat T. Performance and economic evaluation of a photovoltaic/thermal (PV/T)-cascade heat pump for combined cooling, heat and power in tropical climate area. *Journal of Energy Storage*. 2020;30.
- [10] Yang H, Cui P, Fang Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Applied Energy*. 2010; 87(1):16-27.
- [11] Ortega I, Sieres J, Cerdeira F, Álvarez E, Rodríguez J. Performance analysis of a R407C liquid-to-water heat pump: Effect of a liquid-vapor heat exchanger and domestic hot water production. *International Journal of Refrigeration*. 2019;101:125-35.
- [12] Chingulpitak S, Wongwises S. A comparison of flow characteristics of refrigerants flowing through adiabatic straight and helical capillary tubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2011;38(3):398-404.
- [13] Blanco DL, Nagano K, Morimoto M. Experimental study on a monovalent inverter-driven water-to-water heat pump with a desuperheater for low energy houses. *Applied Thermal Engineering*. 2013;50(1):826-36.
- [14] Jamshidi N, Farhadi M, Ganji DD, Sedighi K. Experimental analysis of heat transfer enhancement in shell and helical tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2013;51(1-2):644-52.
- [15] Ghorbani N, Taherian H, Gorji M, Mirgolbabaei H. An experimental study of thermal performance of shell-and-coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010;37(7):775-81.
- [16] Askar E, Schröder V, Schmid T, Schwarze M. Explosion characteristics of mildly flammable refrigerants ignited with high-energy ignition sources in closed systems. *International Journal of Refrigeration*. 2018;90:249-56.
- [17] Colbourne D, Suen KO. Comparative evaluation of risk of a split air conditioner and refrigerator using hydrocarbon refrigerants. *International Journal of Refrigeration*. 2015;59:295-303.
- [18] Yunus AC. Heat and mass transfer: fundamentals and applications: McGraw-Hill Education; 2019.
- [19] Hussein AM, Dawood HK, Bakara RA, Kadrigamaa K. Numerical study on turbulent forced convective heat transfer using nanofluids TiO<sub>2</sub> in an automotive cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2017;9:72-8.
- [20] Pavan Kumar E, Kumar Solanki A, Mohan Jagadeesh Kumar M. Numerical investigation of heat transfer and pressure drop characteristics in the micro-fin helically coiled tubes. *Applied Thermal Engineering*. 2021;182.
- [21] Schmidt EFJCIT. Wärmeübergang und druckverlust in rohrschlangen. 1967;39(13):781-9.
- [22] Hardik BK, Baburajan PK, Prabhu SV. Local heat transfer coefficient in helical coils with single phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015;89:522-38.
- [23] Kong R, Deethayat T, Asanakham A, Kiatsiriroat T. Heat transfer phenomena on waste heat recovery of combustion stack gas with deionized water in helical coiled heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018;12:213-22.

[24] Abdolbaqi MK, Azmi WH, Mamat R, Mohamed NMZN, Najafi G. Experimental investigation of turbulent heat transfer by counter and co-swirling flow in a flat tube fitted with twin twisted tapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016;75:295-302.

# เฮมพ์กรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับยิปซัมพลาสติกเป็นสารเชื่อมประสาน

ประชุม คำพุ่ม<sup>1\*</sup>

prachoom\_k@rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 26-May-2022 |
| Revised  | : 9-Jun-2022  |
| Accepted | : 14-Jun-2022 |

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกมวลเบา (เฮมพ์กรีต) โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนยิปซัมพลาสติกเป็นตัวเชื่อมประสาน กำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อปูนยิปซัมพลาสติกต่อทรายละเอียดต่อน้ำประปา เท่ากับ 1: 1: 1: 1 โดยน้ำหนัก ผสมแกนต้นกัญชงบดย่อยผ่านตะแกรงขนาด 6 มม. ในปริมาณร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8, และ 10 ของส่วนผสมทั้งหมดตามลำดับ ทำการผสมและขึ้นรูปก้อนตัวอย่างเฮมพ์กรีตขนาด 15 x 15 x 15 ซม. บ่มในสภาพอากาศปกติเป็นระยะเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน นำมาทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงอัดตามมาตรฐาน BS 1881 : Part 108 ผลการทดสอบพบว่าเมื่อผสมแกนกัญชงในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ส่วนการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณแกนกัญชงที่เหมาะสมสำหรับใช้ผสมเฮมพ์กรีตขนาด 10 x 20 x 60 ซม. ตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 คือ ปริมาณแกนกัญชงร้อยละ 6 มีค่าความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 37.45 กก./ตร.ซม. การดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 22.45 และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,137.19 กก./ลบ.ม. จัดเป็นคอนกรีตบล็อกมวลเบาประเภท C12 โดยผลิตภัณฑ์เฮมพ์กรีตที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้ก่อผนังและฉาบด้วยปูนฉาบคอนกรีตบล็อกปกติได้

**คำสำคัญ:** แกนกัญชง มวลเบา เฮมพ์กรีต ฉนวนความร้อน

# Hempcrete using Cement and Gypsum Plaster as a Binder

Prachoom Khamput<sup>1\*</sup>

prachoom\_k@rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

|          |               |
|----------|---------------|
| Received | : 26-May-2022 |
| Revised  | : 9-Jun-2022  |
| Accepted | : 14-Jun-2022 |

## Abstract

This research aims to develop a lightweight concrete block product (hempcrete) using Portland cement and plaster gypsum plaster as a binder. The ratio of cement to gypsum plaster to fine sand to tap water equal 1: 1: 1: 1 by weight was kept in this experiment. The crushed hemp hurd was mixed through a 6 mm sieve at 0, 2, 4, 6, 8, and 10% of the total ingredients. The 15 x 15 x 15 cm hempcrete samples were mixed and formed, and the samples were cured for 7, 14, 21 and 28 days. Density, water absorption and compressive strength were investigated according to BS 1881: Part 108. The results showed that the hemp hurd was mixed in larger quantities, the density and compressive strength tended to decrease while the water absorption tended to increase accordingly. The amount of 6% by weight of hemp hurd is suitable for mixing with hempcrete size 10 x 20 x 60 cm according to TIS 2601-2556, which has a compressive strength of 37.45 kg/cm<sup>2</sup>, water absorption was 22.45% , and density was 1,137.19 kg/m<sup>3</sup>. It was classified as lightweight concrete block type C12. The hempcrete products obtained from this research can be used as lightweight blocks for building walls and can be plastered with normal plaster.

**Keywords:** hemp hurd, lightweight, hempcrete, heat insulation

## 1. บทนำ

การผลิตเฮมพ์กรีตปัจจุบันของต่างประเทศใช้แกนกัญชง (แกนเฮมพ์) มาบดลดขนาดให้เหมาะสมเป็นมวลรวมนำมาผสมกับไฮดรตล์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานทำการเทหรือตักลงในแบบหล่อขึ้นรูปเป็นก้อนอิฐมวลเบาหรือเป็นผนังมวลเบา [1] สำหรับใช้ในการก่อสร้างอาคารประหยัดพลังงาน ทั้งนี้เมื่อประเทศไทยได้มีการปลูกกัญชงเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน จึงได้มีการศึกษาวิจัยการผลิตวัสดุก่อสร้างจากแกนกัญชงที่เหลือจากการลอกเปลือกออกภายในแปลงปลูกในลักษณะตามแนวทางของเศรษฐกิจหมุนเวียน [2] ทั้งนี้ได้มีการนำแกนกัญชงมาผลิตเป็นแผ่นปาร์ติเกิ้ลบอร์ดซึ่งสามารถใช้งานได้ดี และการนำแกนกัญชงมาเป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้างประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เช่น กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น อิฐบล็อกประสาน [3] คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก [4] หรือคอนกรีตทั่วไป [5] ซึ่งผลการวิจัยพบว่าไม่สามารถผสมแกนกัญชงในปริมาณที่มากได้เนื่องจากทำให้ความต้านทานแรงอัดลดลงจนไม่สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. ของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท จึงได้มีการวิจัยเพื่อปรับปรุงเส้นใยกัญชงและวัสดุเชื่อมประสานเพื่อให้สามารถรับกำลังได้มากขึ้น [6] แต่ก็มีขั้นตอนและต้นทุนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ผู้ประกอบการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ยาก ต่อมาจึงมีการเปลี่ยนวัสดุเชื่อมประสานเป็นยิปซัมพลาสติกซึ่งมีข้อดีที่แห้งตัวเร็วมากแต่มีข้อด้อยคือรับกำลังได้ไม่มากและมีการดูดซึมน้ำสูงมากไม่เหมาะกับการนำมาใช้ก่อเป็นผนังภายนอกอาคาร [7] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการปรับปรุงวัสดุเชื่อมประสานใหม่เพื่อให้เฮมพ์กรีตมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง และแห้งตัวได้รวดเร็วโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร่วมกับปูนยิปซัมพลาสติก และใช้ทรายบดละเอียดเป็นวัสดุเสริมแรง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปเป็นก้อนตัวอย่างขนาด 15 x 15 x 15 ซม. และทำการทดสอบความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 เรื่อง คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ [8] สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาเฮมพ์กรีตของประเทศไทยต่อไป

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย (1) แกนกัญชงสายพันธุ์ RPF1 และ/หรือ RPF3 (ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ได้รับอนุญาตให้ปลูกภายในประเทศไทย) จากแปลงปลูกของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปพืชเกษตรพบพระ อำเภอพบพระ จังหวัดตาก นำไปตากแดดหรืออบไล่ความชื้นให้เหลือความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 ตามมาตรฐาน มอก.3185 เรื่องแกนกัญชง [9] นำมาทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดลดขนาดให้ผ่านตะแกรงขนาด 6 มม. ดังรูปที่ 1 (2) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากร้านจำหน่ายวัสดุก่อสร้างทั่วไป มาตรฐาน มอก.15 เรื่องปูนซีเมนต์เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ [10] ดังรูปที่ 2 (3) ใช้ปูนยิปซัมพลาสติก จากโรงงานของ The Gypsun Co., Ltd. จังหวัดกรุงเทพฯ ตามมาตรฐาน มอก.2488 เรื่องปูนพลาสติกสำหรับทำแบบในอุตสาหกรรมเซรามิค [11] ดังรูปที่ 3 (4) ทรายก่อสร้างล้างทำความสะอาดแล้ว นำมาบดละเอียดให้ได้ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 นำไปตากแดดหรืออบไล่ความชื้นให้เหลือความชื้นไม่เกินร้อยละ 15 ดังรูปที่ 4 และ (5) น้ำสะอาด



รูปที่ 1 แกนกัญชงที่บดย่อยผ่านตะแกรงขนาด 6 มม.



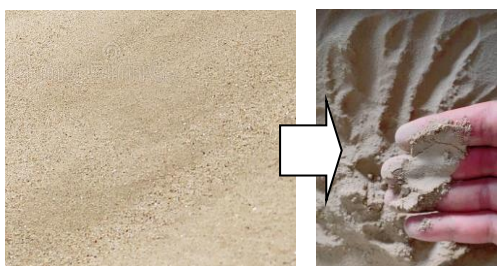
รูปที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 3 ปูนยิปซัมปลาสเตอร์



รูปที่ 6 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 15 x 15 x 15 ซม.



รูปที่ 4 ทราวยบดละเอียดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน ประกอบด้วย (1) เครื่องบดวัสดุสำหรับใช้บดย่อยแกน กัญชงพร้อมตะแกรงขนาดต่าง ๆ ดังรูปที่ 5 (2) เครื่อง ผสมคอนกรีต (3) แบบหล่อพลาสติกขนาด 15 x 15 x 15 ซม. ดังรูปที่ 6 (4) เครื่องชั่งน้ำหนัก (5) ปีมล (6) เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (7) อุปกรณ์ สำหรับทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (8) ถังสี ขนาด 20 ลิตร (9) ถังหัวปูน ขนาด 5 ลิตร และ (10) อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ถุงมือผ้า แวนตา ผ้าปิดจมูก เป็นต้น



รูปที่ 5 เครื่องบดย่อยวัสดุพร้อมตะแกรงขนาด 6 มม.

## 2.2 การกำหนดส่วนผสม

ทำการกำหนดส่วนผสมโดยน้ำหนัก โดยใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จำนวน 1 ส่วน ผสมกับปูนปลาสเตอร์ จำนวน 1 ส่วน และทราย บดละเอียดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จำนวน 1 ส่วน ใช้ น้ำสะอาด 1 ส่วน และผสมปริมาณแกนกัญชง บดย่อยขนาดผ่านตะแกรง 6 มม. เท่ากับร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8, และ 10 โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด ตามลำดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของก้อนตัวอย่าง (โดยน้ำหนัก)

| แกนกัญชง (ร้อยละ) | ปูน ซีเมนต์ | ปูนยิปซัม ปลาสเตอร์ | ทราย บดละเอียด | น้ำ |
|-------------------|-------------|---------------------|----------------|-----|
| 0                 | 1           | 1                   | 1              | 1   |
| 2                 | 1           | 1                   | 1              | 1   |
| 4                 | 1           | 1                   | 1              | 1   |
| 6                 | 1           | 1                   | 1              | 1   |
| 8                 | 1           | 1                   | 1              | 1   |
| 10                | 1           | 1                   | 1              | 1   |

## 2.3 การขึ้นรูปตัวอย่างและทดสอบ

เริ่มจากการบดย่อยแกนกัญชงด้วยเครื่องบด ย่อยผ่านตะแกรงขนาด 6 มม. ตามส่วนผสมที่กำหนด จากนั้นนำแกนกัญชงที่ทำการบดย่อยมาตากหรืออบให้ แห้ง ควบคุมความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 ดังรูปที่ 1 ทำ การเตรียมวัสดุผสมต่าง ๆ ด้วยการชั่งน้ำหนักตาม อัตราส่วนในตารางที่ 1 โดยแต่ละตัวอย่างจะมีปริมาณ

ร้อยละของแกนกลูซิง เท่ากับร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8, และ 10 ของส่วนผสมทั้งหมดตามลำดับ ผสมวัตถุดิบทั้งหมดให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมคอนกรีต แล้วทำการเทลงส่วนผสมลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด  $15 \times 15 \times 15$  ซม. ทิ้งไว้ให้แห้ง 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 7 แล้วนำก้อนตัวอย่างออกจากแบบไปป้อนในสภาพอากาศปกติตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อรอทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังรูปที่ 8 เมื่อครบระยะเวลาดำเนินการที่กำหนดแล้วทำการทดสอบสมบัติของก้อนตัวอย่าง ประกอบด้วย ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ดังรูปที่ 9 และความต้านทานแรงอัด ตามมาตรฐาน BS 1881 : Part 108 [12] ดังรูปที่ 10-11



รูปที่ 9 การทดสอบการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 7 การหล่อก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 10 การทดสอบความต้านทานแรงอัด



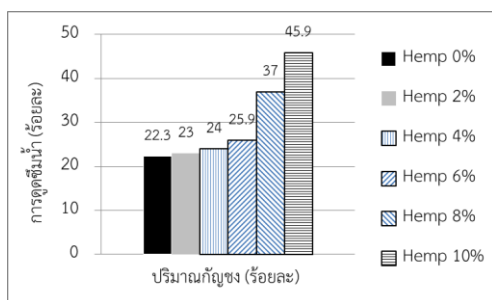
รูปที่ 8 การบ่มก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 11 ลักษณะการแตกหักของก้อนตัวอย่าง

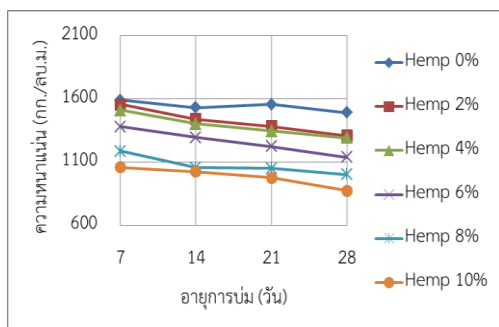
### 3. ผลการทดลอง

ผลการทดสอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ประกอบด้วย ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงอัด แสดงดังรูปที่ 12-14



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและปริมาณแกนกัญชง

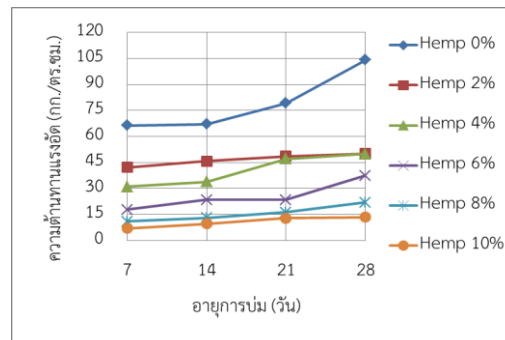
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและปริมาณแกนกัญชงที่อายุการบ่มเฮมพ์กรีต 28 วัน พบว่าเมื่อผสมเฮมพ์กรีตในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้เฮมพ์กรีตมีแนวโน้มการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากลำต้นแกนกัญชงมีลักษณะกลมกลวง น้ำหนักเบา เมื่อนำไปผสมในเฮมพ์กรีตจึงทำให้ก้อนตัวอย่างมีช่องว่างในเนื้อเฮมพ์กรีตมากขึ้นการดูดซึมน้ำจึงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการนำแกนกัญชงไปผสมในคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักและอิฐบล็อกประสานที่ทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน [3-4] โดยค่าการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้นนี้ก็ไปในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าความหนาแน่นที่ลดลงตามรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอายุการบ่มเฮมพ์กรีตที่ปริมาณแกนกัญชงต่าง ๆ

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอายุการบ่มเฮมพ์กรีตที่ปริมาณแกนกัญชงร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ พบว่าเมื่อผสมแกนกัญชงในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความ

หนาแน่นลดลงเนื่องจากแกนกัญชงมีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นน้อยกว่ามวลรวมปกติ เมื่อนำไปผสมในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นของเฮมพ์กรีตมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย [13] ส่วนด้านผลของอายุการบ่มก้อนตัวอย่างเฮมพ์กรีตที่มีต่อความหนาแน่นพบว่าเมื่อเฮมพ์กรีตมีอายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ก้อนตัวอย่างเฮมพ์กรีตมีแนวโน้มความหนาแน่นลดลงตามลำดับเนื่องจากการใช้ยิปซัมพลาสติกเป็นส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์นั้น ในช่วงแรกยิปซัมพลาสติกถึงแม้ว่าจะมีคุณสมบัติในการแข็งตัวได้รวดเร็วมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนและจะค่อย ๆ ทำปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ ตามระยะเวลา จนกระทั่งน้ำที่อยู่ในเนื้อเฮมพ์กรีตหมดไป [7] ส่วนปูนซีเมนต์กับน้ำก็จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งจะทำปฏิกิริยาได้เต็มที่เมื่ออายุ 28 วัน [14] ซึ่งปฏิกิริยาคายความร้อนของยิปซัมพลาสติกดังกล่าวส่งผลให้น้ำหนักของเฮมพ์กรีตลดลงตามระยะเวลาที่มากขึ้นและจะคงที่เมื่ออายุ 28 วัน ดังนั้นการที่ผสมแกนกัญชงบดอยู่ในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้เฮมพ์กรีตมีความหนาแน่นลดลงซึ่งเป็นคุณสมบัติข้อที่สำคัญของคอนกรีตมวลเบา ซึ่งต้องนำมาพิจารณาร่วมกันกับค่าความต้านทานแรงอัดว่ามีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานหรือไม่ ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดและอายุการบ่มเฮมพ์กรีตที่ปริมาณแกนกัญชงต่าง ๆ

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดและอายุการบ่มเฮมพ์กรีตที่ปริมาณแกนกัญชงร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ พบว่าเมื่ออายุการบ่มเฮมพ์กรีตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความ

ด้านทานแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับเนื่องจากผลของการใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อปูนยิปซัมพลาสติก 1 ส่วนนั้น ยิปซัมพลาสติกกับน้ำจะทำปฏิกิริยาคายความร้อนเป็นผลึกแข็ง ส่วนปูนซีเมนต์กับน้ำจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นสารเชื่อมประสานที่มีความแข็งแรงโดยมีทรายละเอียดเป็นวัสดุเพิ่มกำลังอีก 1 ส่วน ทำให้สามารถรับกำลังได้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงอายุ 28 วัน [15] ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนที่ไม่ผสมแกนกัญชามีค่าความต้านทานแรงอัดสูงที่สุดเมื่ออายุ 28 วัน เท่ากับ 104.04 กก./ตร.ซม. และมีค่าต่ำลงประมาณร้อยละ 50 เมื่อผสมแกนกัญชาร้อยละ 2 ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงที่สุดเมื่ออายุ 28 วัน เท่ากับ 50.04 กก./ตร.ซม. และความต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อผสมแกนกัญชงในปริมาณที่มากขึ้นตามลำดับ จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 13.38 กก./ตร.ซม. เมื่อผสมแกนกัญชงร้อยละ 10 ที่ความต้านทานแรงอัดมีค่าต่ำลงเมื่อผสมแกนกัญชงในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องมาจากการที่แกนกัญชงมีความหนาแน่นต่ำกว่ามวลรวมปกติทั่วไป จึงทำให้เฮมพ์กรีตมีความหนาแน่นลดลง มีช่องว่างในเนื้อก้อนตัวอย่างมากขึ้น มีการดูดซึมน้ำมากขึ้น จึงส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดลดลงดังที่กล่าวมาแล้ว และงานวิจัยนี้ยังสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าความต้านทานแรงอัดลดลงเมื่อผสมปริมาณแกนกัญชงมากขึ้น [3-7] ทั้งนี้หากนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.2601-2556 พบว่าการผสมแกนกัญชงร้อยละ 6 เป็นปริมาณที่มากที่สุดซึ่งทำให้ความต้านทานแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้คือต้องไม่น้อยกว่า 25.5 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 37.45 กก./ตร.ซม.

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ทั้งด้านการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัดพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นเฮมพ์กรีตเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อปูนยิปซัมพลาสติกต่อทรายละเอียดต่อน้ำสะอาด เท่ากับ 1: 1: 1: 1 โดยน้ำหนักผสมแกนต้นกัญชงบดย่อยผ่านตะแกรงขนาด 6 มม. ในปริมาณร้อยละ 6 ของส่วนผสมทั้งหมดโดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงคุณสมบัติต่าง ๆ เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.

2601-2556 จัดเป็นคอนกรีตมวลเบาประเภท C12 คือความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1001-1200 กก./ลบ.ม. ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดสอบสมบัติของเฮมพ์กรีตที่ผสมแกนกัญชงร้อยละ 6

| ค่าตามมาตรฐาน มอก.<br>2601-2556 | สมบัติเฮมพ์กรีตจาก<br>งานวิจัย                      |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1001-1200<br>(กก./ลบ.ม.)        | ความหนาแน่น =<br>1,137.19 กก./ลบ.ม.<br>(ประเภท C12) |
| $\geq 25.5$<br>(กก./ตร.ซม.)     | ความต้านทานแรงอัด<br>= 37.45 กก./ตร.ซม.             |
| < ร้อยละ 23                     | การดูดซึมน้ำ =<br>ร้อยละ 22.45                      |

เมื่อนำอัตราส่วนที่ได้มาทำการเทหล่อเป็นก้อนเฮมพ์กรีตเท่ากับอิฐมวลเบาขนาด 10 x 20 x 60 ซม. ดังรูปที่ 15 แล้วนำไปทดสอบการก่อ-ฉาบกำแพงขนาด 1 x 1 ตร.ม. พบว่าสามารถใช้ก่อผนังและฉาบด้วยปูนฉาบคอนกรีตบล็อกปกติได้ (รูปที่ 16) โดยไม่ต้องใช้ปูนก่อ-ฉาบเฉพาะแบบอิฐมวลเบาปกติทั่วไป เนื่องจากเฮมพ์กรีตที่ได้จากงานวิจัยมีการดูดน้ำที่ผิวของก้อนบล็อกต่ำกว่าอิฐมวลเบาจึงไม่เกิดปัญหาการแย่งน้ำจากปูนก่อ-ฉาบเหมือนกับอิฐมวลเบา



รูปที่ 15 เฮมพ์กรีตขนาด 10 x 20 x 60 ซม.



รูปที่ 16 การก่อ-ฉาบผนังเฮมพ์กรีตด้วยปูนฉาบปกติ

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เฮมพ์กรีตสายพันธุ์ไทยที่ใช้สารเชื่อมประสาน คือ ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ร่วมกับ ยิปซัมพลาสติก 1 ส่วน ผสมกับน้ำ 1 ส่วน และใช้ทรายบดละเอียด 1 ส่วน เป็นวัสดุเสริมกำลัง ผสมกับ แกนกล้วยขบดย่อยขนาดไม่เกิน 6 มม. ร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าระยะเวลาการบ่มเฮมพ์กรีตที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดมีค่าสูงขึ้นและความหนาแน่นลดลง ส่วนของปริมาณแกนกล้วยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เฮมพ์กรีตมีแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงอัดต่ำลงและความหนาแน่นลดลง ในขณะที่การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.2601-2556 พบว่าที่ปริมาณแกนกล้วยร้อยละ 6 มีความเหมาะสมมากที่สุดและคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยจัดเป็นคอนกรีตมวลเบาประเภท C12 คือ มีความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 37.45 กก./ตร.ซม. ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 22.45 และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,137.19 กก./ลบ.ม. โดยเฮมพ์กรีตที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้ปูนก่อ-ฉาบแบบปกติทั่วไปได้ จึงมีความเป็นไปได้ที่ผู้ประกอบการจะนำไปผลิตและจำหน่ายเป็นวัสดุก่อสร้างแบบใหม่ของประเทศไทย ในเชิงพาณิชย์ โดยมีต้นทุนการผลิตในห้องปฏิบัติการที่ประมาณก้อนละ 40 บาท ซึ่งมีต้นทุนสูงกว่าอิฐมวลเบาปกติเกือบ 3 เท่าตัว แต่เมื่อนำไปเทียบกับเฮมพ์กรีตในต่างประเทศซึ่งมีราคา 154.85 บาทต่อก้อน [16] ถือได้ว่าเฮมพ์กรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับยิปซัมพลาสติก

เป็นสารเชื่อมประสานจากงานวิจัยนี้ มีราคาถูกกว่ามากในผลิตภัณฑ์ประเทศเดียวกัน ดังนั้นการที่ผู้ประกอบการจะดำเนินการผลิตและจำหน่ายเฮมพ์กรีต จึงต้องมุ่งเน้นลูกค้าระดับสูงที่มีกำลังซื้อและต้องการใช้วัสดุก่อสร้างสมัยใหม่ตามกระแสการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สป.อว.) ภายใต้โครงการการพัฒนาศักยภาพผู้ประกอบการ SMEs มุ่งสู่ผู้ประกอบการที่ขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรม (IDE) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 และขอขอบคุณ บริษัท ดีดี เนเจอร์ คราฟท์ จำกัด สำหรับการร่วมสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] William S, Sparrow A. The hempcrete book: designing and building with hemp-lime. Green Books. United Kingdom; 2014.
- [2] Sinsiri T, Thaiying K, Prastsoong P, Tangsatthit S. Sustainability indicators review of hemp shiv as alternative materials for the construction industry in Thailand. The 25<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering; Chonburi, Thailand. 2020;MAT26-1-MAT26-8. (in Thai)
- [3] Khamput P. Interlocking block products from hemp core. 14<sup>th</sup> Annual Concrete Conference; Prachuap Khiri Khan, Thailand. 2019;ENV-008. (in Thai)
- [4] Khamput P. Hollow non-load-bearing concrete block products from hemp core. Thailand Research Expo: Symposium 2019 Proceedings; Bangkok, Thailand. 2019;434-45. (in Thai)

- [5] Pantawee S, Sinsiri T, Somna R, Akkakraisee S, Kuppatarat S. Basic properties of concrete containing hemp shives as coarse aggregate. 12<sup>th</sup> Annual Concrete Conference; Phetchaburi, Thailand. 2017;MAT95-MAT101. (in Thai)
- [6] Pantawee S. Development of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate and calcium hydroxide treatment and impact of fly ash on hemp concrete. Thesis. School of Civil Engineering Institute of Engineering Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima. Thailand. 2017. (in Thai)
- [7] Khamput P. Hempcrete using gypsum plaster as a binder. 21<sup>st</sup> National Environment Conference (NEC21). Pathumwan Princess Hotel Bangkok, Thailand. 2022:273-8. (in Thai)
- [8] Thai Industrial Standards Institute. Standard or cellular lightweight concrete blocks using preformed foam (TIS.2601-2556). Ministry of industry; 2013. (in Thai)
- [9] Thai Industrial Standards Institute. Standard for hemp hurd (TIS.3185-2564). Ministry of industry; 2022. (in Thai)
- [10] Thai Industrial Standards Institute. Standard for Portland cement part 1 specification (TIS.15 part 1-2555). Ministry of industry; 2012. (in Thai)
- [11] Thai Industrial Standards Institute. Standard for gypsum molding plaster for ceramic industry (TIS.2488-2553). Ministry of industry; 2010. (in Thai)
- [12] British Standards. Method for making test cubes from fresh concrete. Testing concrete part 108. (BS 1881 : Part 108). British Standards Institution; 1983.
- [13] Kroehong W, Haruehansapong S. Mechanical Properties, Thermal Conductivity and Microstructure of Hemp Concretes. KMUTT Research & Development Journal. 2020;43(1) :91-102. (in Thai)
- [14] Setthabutr C. Concrete Technology, 5<sup>th</sup> edition. The Concrete Product and Aggregate co.,ltd. Bangkok. 2000:15-16. (in Thai)
- [15] Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C. Cement Pozzolan and concrete. 7<sup>th</sup> edition. Thailand Concrete Association, Bangkok; 2012. (in Thai)
- [16] Roberts T. Building with hempcrete; 2020 [sited 2022 May 27]. Available from: <https://www.buildwithrise.com/stories/building-with-hempcrete>.



# รูปแบบบทความสำหรับ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี

ปรกช สิริสุวณณ<sup>1\*</sup>, สุมณมณลย เนียมหลาง<sup>2</sup> และกุลยา สาริชีวิน<sup>3</sup>

porakoch.s@en.mutt.ac.th<sup>1\*</sup>, sumonman.n@en.mutt.ac.th<sup>2</sup>, kullaya.s@en.mutt.ac.th<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี ผู้ส่งบทความต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้องจะถูกส่งคืนเพื่อทำการแก้ไขก่อนนำส่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ หากไม่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องกองบรรณาธิการจะทำการตัดสิทธิ์การส่งบทความนี้ ทั้งนี้บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และมีความยาวไม่เกิน 300 คำ

**คำสำคัญ:** วิธีการส่งบทความ รูปแบบบทความ ขนาดตัวอักษร รูปแบบตัวอักษร การเว้นบรรทัด

## Manuscript Preparation Guidelines for the Papers Submitted to Journal of Engineering, RMUTT

Porakoch Sirisuwan<sup>1\*</sup>, Sumonman Niamlang<sup>2</sup> and Kullaya Saricheewin<sup>3</sup>  
porakoch.s@en.rmutt.ac.th<sup>1\*</sup>, sumonman.n@en.rmutt.ac.th<sup>2</sup>, kullaya.s@en.rmutt.ac.th<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

<sup>2</sup>Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

### Abstract

This article describes a submission procedure and a format of the manuscript for the Journal of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (JERMUTT). Authors are required to strictly follow the guideline provided here, otherwise, the manuscript will be returned for proper correction before to be reviewed by two referees who are specialists in that fields. If no completed on this step your manuscript will be rejected and cannot be considered again. So that an abstract should have had only one paragraph. Both Thai and English abstracts are required the length of all should not exceed 300 words.

**Keywords:** submission procedure, manuscript format, font size, font style and blank line

## 1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้ คือ

1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title)
2. ชื่อผู้เขียน/อีเมล (Author, E-mail)
3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation)
4. บทคัดย่อ (Abstract)
5. คำสำคัญ (Keywords)
6. บทนำ (Introduction)
7. เนื้อหา (Text)
8. สรุป (Conclusion)
9. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)  
(Acknowledgements)
10. เอกสารอ้างอิง (References)

## 2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

### คำแนะนำทั่วไป

2.1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นและกระชับแต่ครอบคลุมสาระทั้งเรื่อง สื่อความหมายชัดเจนไม่ควรใช้คำย่อ และวางกึ่งกลางหน้ากระดาษ

2.2. ชื่อผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) และผู้เขียนร่วม (Co-Author) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใส่หมายเลขลำดับ (ตัวยก) เรียงตามลำดับความสำคัญ โดยใส่เครื่องหมายดอกจัน (\*) ผู้เขียนหลักถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก)

2.2.1 E-mail ผู้เขียนเรียงตามลำดับชื่อผู้เขียนและ ใส่เครื่องหมาย (\*) ถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก) ของผู้เขียนหลัก

2.3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใดๆ ทั้งสิ้น

2.4. บทย่อดัด (Abstract) เป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญเน้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอจริงๆ ควรเขียนให้สั้น และกระชับ

2.5. คำสำคัญ (Keywords) ให้ระบุไม่เกิน 3-5 คำ

2.6. บทนำ (Introduction) ส่วนนำจะเป็นส่วนที่ผู้เขียนจงใจให้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้นๆ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย และข้อมูลทางวิชาการ

2.7. เนื้อหา (Text) บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็น 2 คอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบบทศันิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 เป็นต้น

### ตารางที่ 1 การตั้งค่าหน้ากระดาษ

| ระยะขอบ         | เซนติเมตร |
|-----------------|-----------|
| บน (Top)        | 3         |
| ล่าง (Bottom)   | 2         |
| ซ้าย (Left)     | 3         |
| ขวา (Right)     | 3         |
| ระยะห่างคอลัมน์ | 1         |

### ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ

พิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษร

รูปแบบ “TH SarabunPSK”

| รายการ                    | ขนาด | ตำแหน่ง      | ลักษณะ   |
|---------------------------|------|--------------|----------|
| ชื่อเรื่อง                | 18   | กึ่งกลาง     | ตัวหนา   |
| ชื่อผู้เขียน อีเมล        | 14   | กึ่งกลาง     | ปกติ     |
| ที่อยู่ผู้เขียน           | 12   | ชิดซ้าย      | ปกติ     |
| บทย่อดัด                  | 14   | ชิดซ้าย      | ปกติ     |
| ชื่อหัวข้อ, หัวข้อย่อย    | 14   | ชิดซ้าย      | ตัวหนา   |
| เนื้อความ                 | 14   | กระจายแบบไทย | ปกติ     |
| สมการต่างๆ                | 14   | กึ่งกลาง     | ตัวเอียง |
| คำบรรยายประกอบรูปและตาราง | 14   | กึ่งกลาง     | ปกติ     |

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและ  
ขวาย่างสวยงาม เยื้องบรรทัดแรกของย่อหน้า ใช้ 1 แท็บ  
หรือ 0.5 นิ้ว

### 2.7.1 การจัดทำรูปภาพ

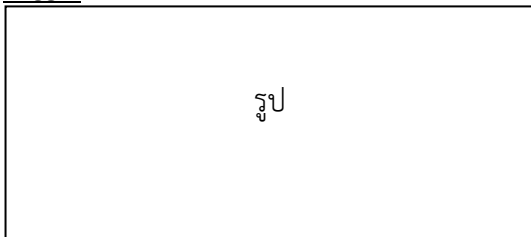
รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 70 มม. เพื่อให้  
ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษา  
รายละเอียดในภาพ อาจยอมมิให้ความกว้างได้เต็ม  
หน้ากระดาษ(กว้าง 150 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่  
สามารถอ่านได้สะดวก

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยาย  
ใต้ภาพ

คำบรรยายใต้ภาพห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่น  
ห้ามเขียนว่า “รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง..” ที่  
ถูกต้องควรเป็น “รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง..”

ตัวอย่าง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง....

รูปถ่ายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่าย  
ควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้ใช้ได้  
รูปถ่ายควรจะมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น  
ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะ  
จอภาพ เป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือ  
รูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด

### 2.7.2 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่  
ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพยัญชนะ  
เอียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของ  
หมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้น  
หนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียน  
สมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

$$a + b = c \quad (1)$$

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

### 2.7.3 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรใน  
เนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลข และคำ  
บรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและคำบรรยายนี้  
รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด คำบรรยาย  
เหนือตารางห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่นเดียวกับกรณีรูปภาพ

เพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือตาราง 1  
บรรทัด และเว้นบรรทัดใต้คำบรรยายรูปภาพ 1 บรรทัด

### 2.7.4 ความยาวของบทความ

เมื่อรวมทุกส่วนแล้ว บทความไม่ควรจะมีความ  
ยาวน้อยกว่า 8 หน้า และยาวไม่เกิน 12 หน้า กระดาษ A4

### 2.7.5 กรณียบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณา  
คำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

### 2.7.6 การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ออนไลน์  
ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี  
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt>



โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิก  
วารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

● Word ● PDF

กรุณาจัดส่ง แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความ  
ทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราช  
ชมงคลธัญบุรี มายัง อีเมล [enjournal@en.rmutt.ac.th](mailto:enjournal@en.rmutt.ac.th) หรือ  
จัดส่งไปรษณีย์มายังกองบรรณาธิการ วารสาร  
วิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง  
อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110” จึงจะถือว่า การส่งวารสารนั้น  
เสร็จสมบูรณ์

หากขั้นตอนการนำส่งวารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางเว็บไซต์ออนไลน์ และการนำส่งแบบฟอร์ม ยืนยันการส่งบทความมายังอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th ไม่ครบถ้วนทั้ง 2 ขั้นตอน บทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถผ่านการพิจารณาได้

### 3. สรุป (Conclusion)

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอ ก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่านมีคุณภาพสูง ผ่านการพิจารณาได้ง่ายขึ้น และหากไม่มีการแก้ไขบทความกลับภายในระยะเวลา 3 เดือน หลังจากได้รับบทความกลับคืน บทความนั้นจะถูกยกเลิกการพิจารณาโดยอัตโนมัติ และไม่รับพิจารณาบทความใดๆ ของผู้เขียนนั้น เป็นระยะเวลา 1 ปี นับตั้งแต่วันครบกำหนดการส่งบทความกลับคืน

### 4. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณข้อมูลจาก TCI และผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

### 5. เอกสารอ้างอิง (References)

การอ้างอิงเอกสารใช้ระบบ (Vancouver Style) เรียงตามลำดับ 1,2,3 ตามการใช้งาน โดยใส่ตัวเลขของเอกสารอ้างอิงไว้ในวงเล็บ เช่น [1] เป็นต้น แล้วรวบรวมไปเขียนอ้างอิง ตามรูปแบบวารสารกำหนด

ในการเขียนเอกสารอ้างอิงผู้เขียนต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ ในกรณีแหล่งข้อมูลที่ใช้อ้างอิงมาจากแหล่งอ้างอิงภาษาไทย เช่น ตำราไทย วารสารไทย เป็นต้น ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษ แล้ววงเล็บด้านท้ายชื่อภาษาต้น เช่น (in Thai) ทั้งนี้ผู้เขียนบทความควรใช้แหล่งอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับกันตามเกณฑ์สากล

### ตัวอย่าง (Example)

[1] Kalsirisilp R, Nadpakdee A, Langkapin J. Performance evaluation of sugarcane grab loader. Journal of Engineering, RMUTT. 2018;16(1):1-12. (in Thai)

### ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

(เครื่องหมายหมายถึง เว้นวรรค 1 ระยะ)

### รูปแบบบทความวารสาร

(Articles in Journals)

[2] Author.\Article Title.\Journal Title.\ Year of Publication;Volume(Issue Number):Pagintion.

### ตัวอย่าง(Example)

[3] Nanthasamroeng N. Application of center of risk gravity in the location analysis for a sitting of emergency medical service vehicles. Journal of Engineering RMUTT. 2011;9(2):21-9. (in Thai)

[4] Halpern SD, Ubel PA, Caplan AL. Solid-organ transplantation in HIV-infected patients. N Engl J Med. 2002;347(4):284-7.

### รูปแบบหนังสือและเอกสารเฉพาะเรื่อง

(Books and Other Monographs)

[5] Author.\Title.\Edition.\ Place of Publication: \Publisher;\Year of Publication.

[6] Author.\Title\[dissertation or master's thesis].\ Place of Publication:\ University; \Year of Publication.

### ตัวอย่าง(Example)

[7] Murray PR, RoawnrhL KS, Kobayashi GS, Pfaller MA. Medical microbiology. 4th ed. St.Louis: Mosby; 2002.

[8] Borkowski MM. Infant sleep and feeding: a telephone survey of Hispanic Americans [dissertation]. Mount Pleasant (MI): Central Michigan University; 2002.

## รูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์

### (Electronic Material)

[9] Author.\ Article Title.\ Journal Title.\[Internet].\ Year of Publication\[cited YY\MM\DD];Volume(Issue Number):page numbers.\ Availability From:\URL

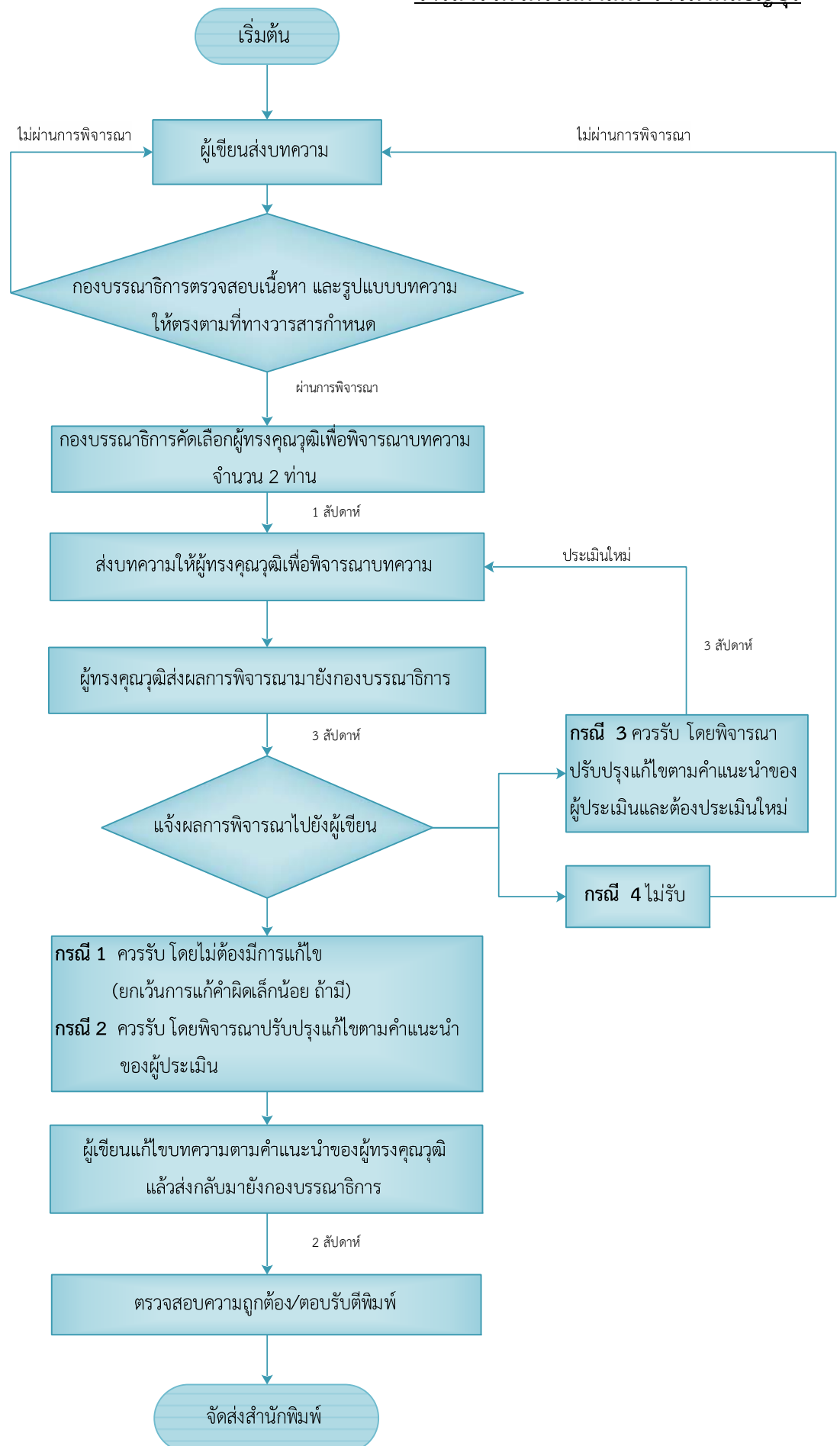
### ตัวอย่าง(Example)

[10] Siriprasert R. Model development for health screening system in prachinburi province. Journal of Health Science [Internet]. 2010 [cited 2011 Feb 25];19(3):409-21. Available from:[http://pubnet.moph.go.th/pubnet2/e\\_doc.php?id=2593](http://pubnet.moph.go.th/pubnet2/e_doc.php?id=2593) (in Thai)

[11] Abood S. Quality improvement initiative in nursing homes: the ANA acts in an advisory role. Am J Nurs [Internet]. 2002 Jun [cited 2002 Aug 12];102(6): [about 1 p.]. Available from : <http://www.nursingworld.org/AJN/2002/june/Wawatch.htm>Article

สามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความ Template ในรูปแบบ Word และคู่มือการอ้างอิงระบบ (Vancouver Style) ได้ที่

<https://drive.google.com/drive/folders/1jPxtFBwmeIUTtRwHH3HEfFuVZXsIOPV>



**ในกรณีที่ 2 และ 3** หลังจากบทความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ผู้เขียนควรพิจารณาการแก้ไขและส่งบทความกลับมาในระยะเวลาที่กำหนดหากล่าช้าเกิน 90 วัน (นับจากวันแจ้งแก้ไข) กองบรรณาธิการขอแจ้งไม่รับพิจารณาบทความโดยอัตโนมัติ และผู้เขียนไม่สามารถส่งบทความเข้าสู่ระบบได้เป็น ระยะเวลา 1 ปี (เนื่องจากมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการประเมินบทความ และขาดความต่อเนื่องในการพิจารณาบทความจากผู้ทรงคุณวุฒิ)

**หมายเหตุ :** รวมระยะเวลาโดยประมาณ 90 วัน หากไม่มีการแก้ไขใดๆเพิ่มเติม





สมาชิกเลขที่

.....

## ใบสมัครสมาชิการสาธการวศการศาสตร ราชมณฑลธัญบุรี

วันที่สมัคร .....

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว ..... สกุล ..... อาชีพ .....  
ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ..... ถนน ..... แขวง/ตำบล .....  
เขต/อำเภอ ..... จังหวัด ..... รหัสไปรษณีย์ .....  
โทรศัพท์ ..... โทรสาร ..... e-mail .....

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

วารสารวิศวกรรมศาสตร ราชมณฑลธัญบุรี ..... ปี

1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท

(สำหรับบุคคลทั่วไป)

80 บาท

(สำหรับนักศึกษา)

ต่ออายุสมาชิก ..... ปี

1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท

(สำหรับบุคคลทั่วไป)

80 บาท

(สำหรับนักศึกษา)

พร้อมกันนี้ ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน ..... บาท

จำนวนเงินตัวอักษร

ชำระเงินโดยวิธี

ธนาคาร ส่งจ่าย

ตั๋วแลกเงินไปรษณีย์ ส่งจ่าย

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ..... ชื่อบัญชี ..... เลขที่บัญชี .....

หมายเหตุ 1. กรุณาส่งสำเนาใบเข้าบัญชี (pay-in-slip) หรือโทรสารมายังสำนักงานคณะวิศวกรรมศาสตร พร้อมเขียน

ชื่อ-นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)

2. นักศึกษาที่สมัครทางไปรษณีย์ กรุณาส่งสำเนารับรองประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

ลงชื่อ ..... ผู้สมัคร

(.....)

วารสารวิศวกรรมศาสตร ราชมณฑลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมณฑลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ 0-2549-3493 โทรสาร 0-2549-3493 www.engineer.rmutt.ac.th/journal e-mail: enjournal@en.rmutt.ac.th



แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ  
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนัคลัธบุรี

ข้าพเจ้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ).....

ชื่อ-สกุล.....

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อาจารย์ ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้).....

โทรศัพท์ที่ทำงาน..... โทรศัพท์มือถือ.....

โทรสาร..... อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

การตรวจสอบ ☐ ทำการลงทะเบียน และ ส่งวารสารต้นฉบับใน

เว็บไซต์ [www.engineer.rmutt.ac.th/journal/](http://www.engineer.rmutt.ac.th/journal/) หรือ <http://journal.engineer.rmutt.ac.th/enjournal/> เรียบร้อยแล้ว

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าระบบออนไลน์ .....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความ  
จริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณา  
ตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

TECHNICAL ARTICLE FORM  
FOR PUBLISHING ON JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT

Title ☐ Mr. ☐ Ms. ☐ Others (Please specify).....

Name-Surnames .....

Academic Positions (Please specify) ☐ Professor ☐ Associate Professor ☐ Assistant

Professor ☐ Lecturer ☐ Others (Please specify).....

Address (for Contact).....

.....

.....

Office Phone Number..... Mobile Phone Number.....

Fax Number..... E-mail.....

Name of Article:.....

.....

.....

Submission Checklist ☐ Already register and submit the manuscripts on

[www.engineer.mutt.ac.th/journal/](http://www.engineer.mutt.ac.th/journal/) or <http://journal.engineer.mutt.ac.th/enjournal/>

The days of Online Submission.....

I promise this article belongs to me and co-authors as the name indicated in the article.

In addition, this article has not been previously published on another journal. Furthermore, I will not submit this article on another journal within 60 days from the day of my submission on the JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT.

Sign .....

(.....)

...../...../.....