



Volume 38 Number 5 September - October 2019

ISSN (Print Edition) : 1686-9664

ISSN (Online Edition) : 2586-9795

Journal of

**SCIENCE and TECHNOLOGY**

**MAHASARAKHAM UNIVERSITY**

[www.journal.msu.ac.th](http://www.journal.msu.ac.th)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่ 38 ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม 2562

Journal of SCIENCE and TECHNOLOGY MAHASARAKHAM UNIVERSITY Volume 38 Number 5 September - October 2019



ปีที่ 38 ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม 2562

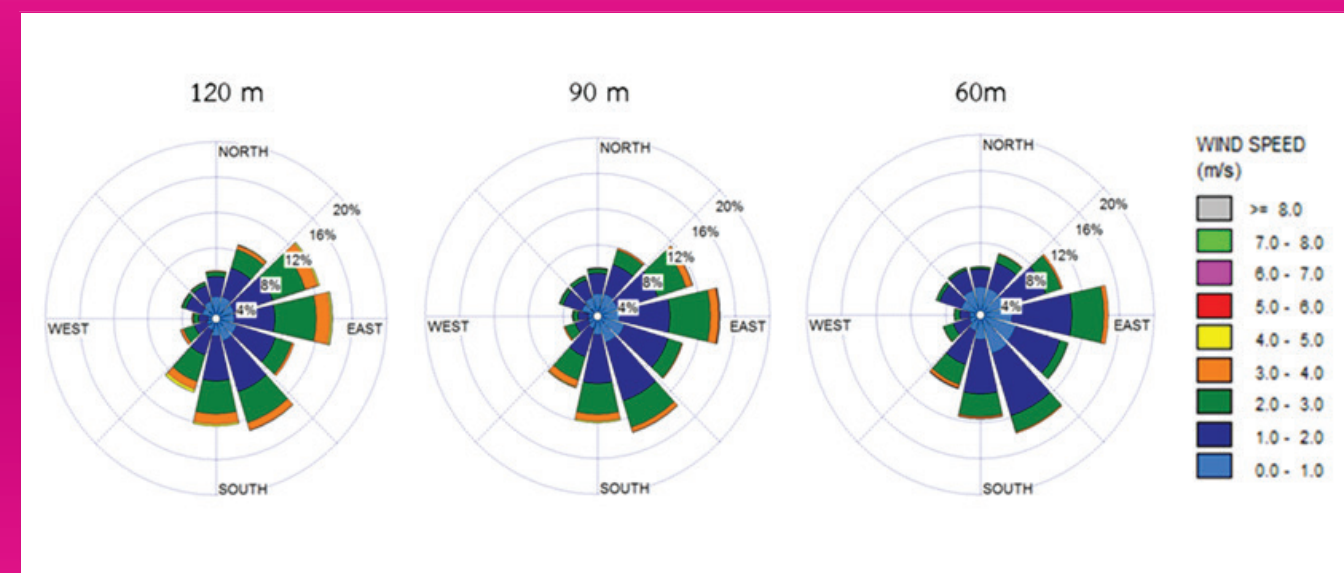
ISSN (Print Edition) : 1686-9664

ISSN (Online Edition) : 2586-9795

วารสาร

**วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**  
**มหาวิทยาลัยมหาสารคาม**

[www.journal.msu.ac.th](http://www.journal.msu.ac.th)



Journal of Science and Technology Mahasarakham University

We are listed in the Thai-Journal Citation Index Centre. (Tier 1)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1

**วัตถุประสงค์**

เพื่อเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการและผลงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีเนื้อหาครอบคลุมงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์สุขภาพและวิศวกรรมศาสตร์ บทความและบทความวิจัยที่จะนำมาตีพิมพ์ในวารสารมหาวิทยาลัยมหาสารคาม จะต้องได้รับการตรวจสอบทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเพื่อให้วารสารมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากล

**เจ้าของ**

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
สำนักงานกองบรรณาธิการ  
กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150  
โทรศัพท์ภายใน 1754 โทรศัพท์/โทรสาร 0-4375-4416

**ที่ปรึกษา**

อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ไข่มไฉน  
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง

**บรรณาธิการ**

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

**ผู้ช่วยบรรณาธิการ**

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมรพรรณ  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์ ดร.วิลยา สุทธิชา  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

**กองบรรณาธิการ**

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ศาสตราจารย์ ดร.ละอองศรี เสนาะเมือง  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
ศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณิณี พรหมเทศ  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อานเป็รื่อง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา บุญยสิทธิ์พรหม  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมณดี  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธีวงษ์  
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์  
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนอมแก้ว  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดศักดิ์ คำเหม็ง  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ยืน ภู่วรวรรณ  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
รองศาสตราจารย์ ดร.บังอร กุมพล  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์  
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
รองศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา  
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิญา วงศ์พิริโยธยา  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.อดิพร รุ่งสิทธิชัย  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
อาจารย์ ดร.รักษ์จินดา วัฒนาลัย  
มหาวิทยาลัยสยาม  
อาจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
Mr.Paul Alexander Dulfer  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
นางฉวีวรรณ อรรถะเศรษฐ์  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

**เลขานุการ**

นางพักตร์วิไล รุ่งวิสัย

**ผู้ช่วยเลขานุการ**

นางจิรรัตน์ ภูสิทธ์

**กำหนดออกและตีพิมพ์เผยแพร่**

ปีละ 6 ฉบับ  
ฉบับที่ 1 มกราคม - กุมภาพันธ์  
ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน  
ฉบับที่ 3 พฤษภาคม - มิถุนายน  
ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม  
ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม  
ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน - ธันวาคม

**Aim and Scope:**

The MSU Journal of Science and Technology is published quarterly and dedicated to the promotion and dissemination of scientific knowledge in the disciplines of Bioscience, Physical Science and Engineering Articles and research papers to be published in the Journal of Science and Technology Maharakham University will be subject to verification of academic luminaries both from within and outside the University to assure journal quality standards.

**Ownership**

Maharakham University  
Editorial Office  
Division of Research Support and Development,  
Khamriang Sub-district, Kantharawichai District,  
Maha Sarakham Province 44150  
Tel & Fax: 0 4375 4238 ext. 1754

**Advisors**

President of Maharakham University  
Professor Dr. Visut Baimai  
Professor Dr. Vichai Boonsaeng

**Editor-in-Chief**

Professor Dr.Preecha Prathepha

**Assistant Editors**

Professor Dr.Pairot Pramul  
Maharakham University  
Associate Professor Dr.Worapol Aengwanich  
Maharakham University  
Associate Professor Dr.Sirithon Siriamornpun  
Maharakham University  
Associate Professor Dr.Vallaya Sutthikhum  
Maharakham University

**Editorial Board**

Professor Dr.Thaweesakdi Boonkerd  
Chulalongkorn University  
Professor Dr.La-orsri Sanoamuang  
Khon Kaen University  
Professor Dr.Supanee Promthet  
Khon Kaen University  
Professor Dr.Pranee Anprung  
Chulalongkorn University  
Professor Dr.Niwat Sonoamuang  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Sunan Saikrasun  
Maharakham University  
Associate Professor Dr.Suwanna Boonyaleepun  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Kwanjai Kanokmedhakul  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Chantana Aromdee  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Boonchong Chawsithiwong  
National Institute of Development Administration

Associate Professor Dr.Porntep Tanonkeo  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Narumon Sangpradub  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Terdsak Khammeng  
Khon Kaen University  
Associate Professor Yuen Poovarawan  
Kasetsart University  
Associate Professor Dr.Bungon Kumphon  
Maharakham University  
Associate Professor Dr.Sirikasem Sirilak  
Naresuan University  
Associate Professor Dr.Anongrit Kangrang  
Maharakham University  
Assistant Professor Dr.Chawalit Boonpok  
Maharakham University  
Assistant Professor Dr.Napparat Buddhakala  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Assistant Professor Dr.Anucha Pranchana  
Ubon Ratchathani Rajabhat University  
Assistant Professor Dr.Seckson Sukhasena  
Naresuan University  
Assistant Professor Dr.Apinya Wongpiriyayothar  
Maharakham University  
Assistant Professor Dr.Alongkorn Lamom  
Maharakham University  
Assistant Professor Dr.Atthaporn Roongsitthichai  
Maharakham University  
Dr.Rakjinda Wattanalai  
Siam University  
Dr.Somnuk Puangpronpitag  
Maharakham University  
Mr.Paul Alexander Dulfer  
Maharakham University  
Chaweewan Akkasesthang  
Maharakham University

**Secretary**

Phakwilai Rungwisai

**Assistant secretary**

Jirarat Puseerit

**Six issues per year**

Number 1 January - February  
Number 2 March - April  
Number 3 May - June  
Number 4 July - August  
Number 5 September - October  
Number 6 November - December

บทความและความคิดเห็นในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นความคิดเห็นของผู้เขียนกองบรรณาธิการ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไปและบทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สงวนสิทธิ์ตามกฎหมายไทยการจะนำไปเผยแพร่ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากกองบรรณาธิการเท่านั้น

## บทบรรณาธิการ

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้ทั้งหมดได้ผ่านการพิจารณาคัดเลือกจากการประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33 ภายใต้หัวข้อ “ยุคสมัยแห่งอัจฉริยภาพ” จำนวน 12 บทความ ซึ่งมีความหลากหลายสาขาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ด้านวิศวกรรมเครื่องกล ที่มีเนื้อหาและการสร้างองค์ความรู้ใหม่ ๆ อันจะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการและเทคโนโลยีล้ำสมัย ประกอบด้วย การศึกษาแบบจำลองทางความร้อนในบรรจุภัณฑ์ไอซีโดยการใช้โปรแกรมแอนซีส การวิเคราะห์การผสมกันของพอลิแอลแล็กไทด์และพอลิดีแล็กไทด์ด้วยวิธีการหล่อฟิล์ม การวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วลมในเขตพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์ การออกแบบระบบติดตามอุณหภูมิเพื่อเหนี่ยวนำการออกดอกของต้นมะยมชิต การออกแบบตามแนวคิดของเครื่องบินพาณิชย์โดยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายเป้าหมาย การศึกษาเชิงตัวเลขผลกระทบของความชื้นต่อจลิตกรรมฝาผนังในโบราณสถานของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา การศึกษาเชิงตัวเลขของการเผาไหม้มีเทนด้วย RNG  $k - \epsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept โปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟuzzy การจับความรู้สึกของคนจากใบหน้าด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ การตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัสดุทางการเกษตรในสกรูลำเลียงโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมความร้อนและการต้านทานการไหลของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใส่ดีฟิวเซอร์ทรงกรวย และการศึกษาผลกระทบของการควบคุมอัตราการไหลของลมในระบบนิวเมติกในเครื่องเทถึงเก็บน้ำมันดิบ กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าองค์ความรู้ใหม่จากทั้ง 12 เรื่องข้างต้นจะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านที่สนใจนำไปอ้างอิงและพัฒนาต่อยอดต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง  
กองบรรณาธิการ

คำอธิบายภาพปก : การวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วลมในเขตพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์

ภาพปก : พนิดา สุขสมพร้อม และคณะ. 2562, 495-502.

## สารบัญ

- การออกแบบตามแนวคิดของเครื่องบินพาณิชย์โดยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายเป้าหมาย : 470  
ศึกษาโดยการเปรียบเทียบ  
**Aircraft Conceptual Design using Multi-Objective Evolutionary Optimization: Comparative study**  
ภาคิน จำปาศักดิ์, สิริภพ อึ้งดำรงกุล, นที พนากานต์, สุจินต์ บุรีรัตน์  
Pakin Champasak, Sirapop Ungdumrongkool, Natee Panagant, Sujin Bureerat
- การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมความร้อนและการต้านทานการไหลของการไหลแบบปั่นป่วน 479  
ผ่านท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใส่ดีฟิวเซอร์ทรงกรวย  
**Experimental studies on thermal and flow resistance behaviors of turbulent flow through a heat exchanger tube with conical-diffuser inserts**  
ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์, ธีรพัฒน์ ชมภูคำ, พงษ์เจต พรหมวงศ์, สมพล สกุลหลง  
Panuwat Hoonpong, Teerapat Chompookham, Pongjet Promvong, Sompol Skullong
- การศึกษาผลกระทบของการควบคุมอัตราการไหลของลมในระบบนิวเมติกในเครื่องเทถังเก็บน้ำนมดิบ 487  
**The study to the effect of air flow rate controlling pneumatic system in a machine pouring raw milk into storage tanks**  
อดิศักดิ์ บุตรวงษ์, วีระพล แก้วกำ, กวีพงษ์ หงษ์ทอง, ธวัชชัย สีลาโส, อภิชาติ ศรีชาติ  
Adisak Bootwong, Weeraphon Kaewka, Kaweepong Hongtong, Tawatchai Seelaso, Aphichat Srichat
- การวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วลมในเขตพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์ 495  
**Wind Speed Data Analysis in Kalasin Province, Thailand**  
พนิดา สุขสมพร้อม, เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต, สุภชัย พลน้ำเที่ยง  
Panida Suksomprom, Kiatfa Tangchaichit, Supachai Polnumtiang
- การศึกษาเชิงตัวเลขผลกระทบของความชื้นต่อจิตรกรรมฝาผนังในโบราณสถานของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา 503  
**Numerical Simulation on the Effect of Moisture Distribution on Ancient Mural Painting in Archaeological Temple of Phra Nakhon Si Ayutthaya Province**  
มงคล แก้วบำรุง  
Mongkol Kaewbumrung

## สารบัญ

- การศึกษาเชิงตัวเลขของการเผาไหม้มีเทนด้วย RNG  $k-\varepsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept 512  
**Numerical Simulation of Methane Combustion Using RNG  $k-\varepsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept**  
มงคล แก้วบำรุง  
Mongkol Kaewbumrung
- การออกแบบระบบติดตามอุณหภูมิเพื่อเหนี่ยวนำการออกดอกของต้นมะยงชิด 520  
**Design of Monitoring System for Induced Flowering of Plum Mango**  
พีรศุภมภ์ ไชยศรีมณีพรรณ, ชินวัฒน์ ยั้ววัฒนพันธ์, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์  
Peerasutth Chaisrimaneepan, Chinawat Yapwattanaphun, Taweedej Siritanapipat
- โปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟัซซี่ 526  
**Machine Health Condition using Multi data based on Neuro-Fuzzy system**  
วรกันต์ สัมฤทธิ์เดชขจร, หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ  
Worakan Sumriddetkhajorn, Hataitep Wongsuwarn
- การวิเคราะห์การผสมกันของพอลิแลคติกไทด์และพอลิดิแลคติกไทด์ด้วยวิธีการหล่อฟิล์ม 534  
**Characterization of Poly(L-lactide) and Poly(D-lactide) blends by solution casting process**  
ทิพย์ธิดา อัครประสา, ยศฐา ศรีเทพ  
Thiptida Akkaprasa, Yottha Srithep
- การตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัสดุทางการเกษตรในสกรูลำเลียงโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง 539  
**Investigation of agriculture seed flow in screw conveyors using discrete element method**  
สถาพร วังฉาย, สุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี, พรชัย จงจิตร์ไพศาล  
Sathaphon Wangchai, Supachai Tragoonsubtavee, Pornchai Chongchitpaisan
- การศึกษาแบบจำลองทางความร้อนในบรรจุภัณฑ์ไอซีโดยการใช้โปรแกรมแอนซิส 547  
**Thermal Modeling of IC Packages by Using ANSYS Simulation**  
แสงดาว เชื้อยงฉิน, ยศกร ประทุมวัลย์, แคทลียา ปัทมพรหม  
Saengdaow Seangchin, Yotsakorn Pratumwal, Cattaleeya Pattamaprom

การจับความรู้สึกของคนจากใบหน้าด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์

555

**Classification of human facial expression using artificial intelligence techniques**

ศศิชา บุญเก่า, วิหิต ฉัตรรัตน์กุลชัย

Sasicha Boonkao, Withit Chatlatanagulchai

## การออกแบบตามแนวคิดของเครื่องบินพาณิชย์โดยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายเป้าหมาย : ศึกษาโดยการเปรียบเทียบ

### Aircraft Conceptual Design using Multi-Objective Evolutionary Optimization: Comparative study

ภาคิน จำปาศักดิ์<sup>1</sup>, สิริภาพ อึ้งดำรงกุล<sup>1</sup>, นที พนาภานต์<sup>1</sup>, สุจินต์ บุรีรัตน์<sup>1</sup>

Pakin Champasak<sup>1</sup>, Sirapop Ungdumrongkool<sup>1</sup>, Natee Panagant<sup>1</sup>, Sujin Bureerat<sup>1</sup>

Received: 7 July 2019; Revised: 2 August 2019; Accepted: 10 September 2019

#### บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงให้เห็นถึงการออกแบบของเครื่องบินพาณิชย์ในขั้นตอนการออกแบบตามแนวคิดโดยพิจารณา 2 เป้าหมายคือ ค่าน้อยที่สุดของน้ำหนักเครื่องบิน และค่ามากที่สุดของสัมประสิทธิ์แรงยกต่อแรงต้านโดยใช้ Multi-Objective Evolutionary Optimization (MOEAs) เสถียรภาพเชิงกลถูกนำมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขบังคับ เมื่อตัวแปรออกแบบของรูปทรงเครื่องบินประกอบด้วย ปีก, หาง และลำตัว ค่าสัมประสิทธิ์ทางด้านอากาศพลศาสตร์ถูกคำนวณโดยซอฟต์แวร์ SUAVE (Aerospace Conceptual Design Environment) ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกลสามารถทำได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ Athena vortex lattice (AVL) แถบหน้าพาเรโตจากหลากหลาย MOEAs ประกอบด้วย MOEA/D, Two-Arch2, RPBILDE, PICEA-g, KnEA/A-ENS และ KnEA จะถูกนำมาเปรียบเทียบค่า Hypervolume ผลเฉลยที่ได้รับจากการออกแบบสามารถนำไปใช้สำหรับการออกแบบเพิ่มเติมในขั้นตอนการออกแบบขั้นกลางและขั้นละเอียด

**คำสำคัญ:** การออกแบบเครื่องบินเบื้องต้น การหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย เครื่องบินพาณิชย์

#### Abstract

This paper demonstrates design of a commercial aircraft at the conceptual design stage by considering 2 objective functions i.e. minimization of aircraft maximum takeoff weight and maximization of lift-to-drag ratio multi-objective evolutionary algorithms (MOEAs). Dynamic stability is taken as a design constraint while design variables include geometrical properties of the plane, consisting of the wing, empennage and fuselage. The aerodynamic coefficients of flight were calculated by using SUAVE (Aerospace Conceptual Design Environment) whereas dynamic stability analysis was achieved through using Athena vortex lattice (AVL) software. Pareto front obtained from various MOEAs are compared by Hypervolume. MOEAs are contained as MOEA / D, Two-Arch2, RPBILDE, PICEA-g, KnEA/A-ENS and KnEA. The obtained solutions for aircraft can be used for further design in the preliminary design stage.

**Keywords:** Aircraft conceptual design, Multi-objective optimization, Commercial aircraft

<sup>1</sup> ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ประเทศไทย  
โทร 043-202845 โทรสาร 043-202849 E-mail sujbur@kku.ac.th



## บทนำ

ในปัจจุบันกระแสการท่องเที่ยวในประเทศไทยเป็นที่สนใจของนักท่องเที่ยวทั้งในประเทศและต่างประเทศเป็นอย่างมาก สังเกตได้จากตัวเลขนักท่องเที่ยวที่สูงขึ้นในแต่ละจังหวัด<sup>1</sup> ดังนั้นความต้องการใช้เครื่องบินพาณิชย์ของสนามบินแต่ละจังหวัดจึงสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้ามการจราจรทางอากาศที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การออกแบบเครื่องบินพาณิชย์ให้มีประสิทธิภาพสูงจึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการศึกษาและสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาอุตสาหกรรมไทย 4.0 ของกระทรวงอุตสาหกรรมอุตสาหกรรมการบิน จัดว่าเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมสำหรับอนาคต (New S-Curve) ที่จำเป็นสำหรับประเทศ การวิจัยและพัฒนาทางด้านเครื่องบินรูปแบบต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นเพื่อตอบสนองนโยบายและแนวคิดนั้น<sup>2</sup> กระบวนการออกแบบเครื่องบินซึ่งประกอบด้วย การออกแบบตามแนวคิด การออกแบบขั้นต้นและการออกแบบละเอียด จากการวิจัยพบว่า การออกแบบตามแนวคิดมีอิทธิพลต่อการออกแบบทั้งหมดถึง 70-90% ดังนั้น การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องบินพาณิชย์ในขั้นตอนการออกแบบตามแนวคิดจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการออกแบบ<sup>3</sup> จากการศึกษาการออกแบบตามแนวของเครื่องบินพาณิชย์ในอดีต ได้ออกแบบที่ละขั้นตอน สามารถทำให้เสร็จได้ภายในรอบเดียว ซึ่งผลที่ได้คือเครื่องบินที่สามารถบินทดสอบได้ แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ เครื่องบินที่ได้ยังคงมีรูปร่างที่ใหญ่มากกว่าเครื่องบินปกติในปัจจุบัน ทำให้มีน้ำหนักมาก ประสิทธิภาพในการบินไม่ดีเท่าที่ควร และค่าใช้จ่ายที่ต้องจ่ายสูงขึ้น ดังนั้น โจทย์การออกแบบตามแนวคิดของเครื่องบินควรที่จะเริ่มต้นด้วยการกำหนดภารกิจการบินและรูปแบบของเครื่องบิน จากนั้นการประเมินสมรรถนะ ประมาณค่าน้ำหนัก การวิเคราะห์ความเสถียรภาพ เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของเครื่องบิน<sup>4,5</sup> เพื่อให้การออกแบบมีประสิทธิภาพมากที่สุด จึงมีการประยุกต์ใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ในการออกแบบตามแนวคิดของเครื่องบิน จากการค้นคว้างานวิจัยในอดีต นักวิจัยได้ออกแบบเครื่องบินพาณิชย์โดยใช้วิธี Genetic algorithm optimization เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดของน้ำหนักเครื่องบินในขณะ Take-off โดยกำหนดลักษณะของปีก ลำตัว และแพนหางเป็นตัวแปรออกแบบภายใต้เงื่อนไขบังคับ เช่น take-off distance, wing loading, thrust loading และอื่น ๆ ถูกนำมาประกอบในกระบวนการนี้ด้วย แต่การเลือกน้ำหนักเป็นฟังก์ชันเป้าหมายเดียวนั้นไม่เพียงพอต่อการออกแบบ<sup>6</sup> นักวิจัยได้ออกแบบเครื่องบินเพื่อค้นหาแบบที่มีความซับซ้อนในการออกแบบเนื่องจากในระหว่างการบิน ยาน้ำแม่ลง

และน้ำมันเชื้อเพลิงจะลดลงในขณะที่บิน ทำให้จุด CG. ของเครื่องบินเปลี่ยนไปทำให้การวิเคราะห์ Aerodynamic force มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ผู้ออกแบบได้ใช้ Simulated Annealing optimization algorithm ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายที่ละคู่ เช่น Minimize takeoff gross weight และ Minimize equivalent flat plate area, Minimize take-off distance และ Maximize endurance การที่มีหลายเป้าหมายนั้นจะทำให้ผู้ออกแบบสามารถมีตัวเลือกได้หลากหลายและครอบคลุมฟังก์ชันเป้าหมาย ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้มีบทบาทสำคัญในคำนวณ นักวิจัยทางด้านเครื่องบินจึงได้มีการพัฒนาโปรแกรมคำนวณเกี่ยวกับเครื่องบินออกมา<sup>7</sup> ในปี 2018 ผู้จัดทำได้ออกแบบเครื่องบินไร้คนขับเพื่อใช้ในการตรวจลาดตระเวนบริเวณ Pacific ring of fire การออกแบบนั้นมีความซับซ้อนเนื่องจากบริเวณนั้นมีความร้อนและซี้ถ้ำลอยขึ้นมาบนอากาศ ดังนั้น เพื่อความแม่นยำของการออกแบบ ผู้ออกแบบจึงได้วิเคราะห์ทั้งหมด 3 วิธีร่วมกับการ Optimisation ซึ่งทั้งสามวิธีนี้มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป 1. แบบ Analytical ใช้ software XFLR5 ในการวิเคราะห์ Aerodynamic force จะได้ผลที่มีความแม่นยำในขณะที่บินความเร็ว sub-sonic และที่มุมปะทะน้อยกว่ามุมวิกฤต ข้อดีของวิธีนี้คือใช้เวลาน้อย เหมาะกับการออกแบบในขั้นตอนออกแบบตามแนวคิด 2. Numerical จะเป็นการใช้ Software CFD ในการวิเคราะห์ จะได้ผลที่มีความแม่นยำสูงแต่ใช้เวลามาก ไม่เหมาะกับวิธีออกแบบตามแนวคิด 3. Experimental คือการทดสอบในอุโมงค์ลม ผลที่ได้จะเป็นผลจริง (8)real-time data aids for evaluating and communicating reports about volcanic hazards. For this reason, the present research aims the aerodynamic design of a low-cost unmanned aerial vehicle (UAV)

ภายในบทความนี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะของการหาค่าตอบของแต่ละ Optimizer ทั้งหมด 6 algorithms โดยใช้วิธีวัด Hypervolume จากนั้นวัดลำดับทางสถิติโดยใช้ Fried man test บทนำที่กล่าวมาในเบื้องต้นจะอยู่ในส่วนที่ 1 ในส่วนที่ 2 จะอธิบายเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องบินพาณิชย์ในขั้นตอนออกแบบตามแนวคิด จากนั้นกระบวนการ Optimization จะแสดงให้เห็นในส่วนที่ 3 ในส่วนที่ 4 และ 5 จะแสดงผลลัพธ์จากการออกแบบและสรุปผลตามลำดับ

## การออกแบบตามแนวคิดของเครื่องบินพาณิชย์

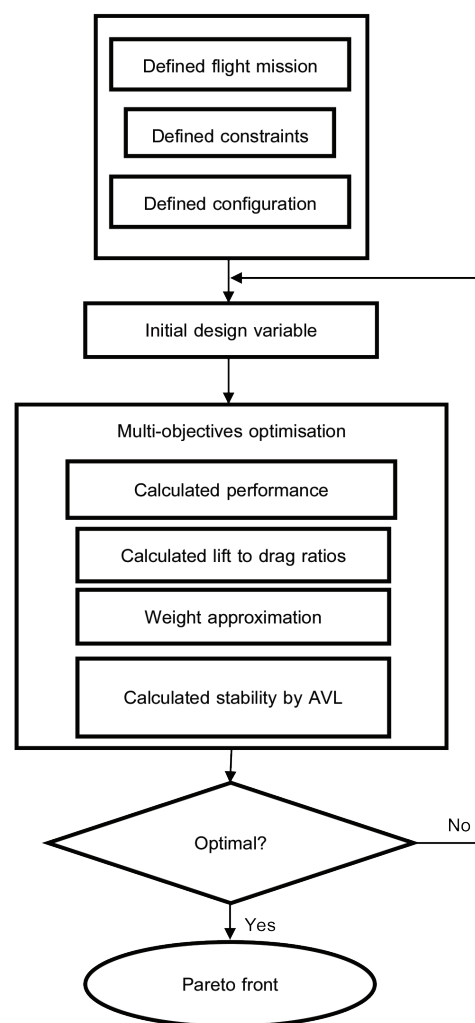
กระบวนการออกแบบแนวคิดของเครื่องบินพาณิชย์ โดยใช้วิธีการ Optimization รายละเอียดของการออกแบบทั้งกระบวนการจะแสดงดัง Figure 1 จากที่แสดงให้เห็นในแผนผัง

กระบวนการ Optimization เป็นกระบวนการที่ต้องทำซ้ำหลาย ๆ ครั้งจนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสม เริ่มจากการกำหนดภารกิจในการบิน การกำหนดครุปร่าง กำหนดตัวแปรออกแบบและกำหนดขอบเขตบังคับ โดยค่าเหล่านี้จะกำหนดโดยผู้ออกแบบ จากนั้นการประมาณค่าตัวแปรอากาศพลศาสตร์ การประมาณค่าสมรรถนะและการประมาณค่าน้ำหนักจะใช้โปรแกรม SUAVE (Aerospace Conceptual Design Environment) ที่เขียนด้วยภาษา Python ในการคำนวณ เนื่องจากการประมาณค่าเสถียรภาพเชิงกลของซอฟต์แวร์ SUAVE อยู่ในขั้นตอนการพัฒนา ผู้จัดทำจึงผนวกซอฟต์แวร์ Athena vortex lattice (AVL) มาใช้ในการคำนวณแทน การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นแบบ 2 ฟังก์ชันเป้าหมาย ดังนั้น ชุดคำตอบจะอยู่ในรูปแบบแถบหน้า พาเรโต 2 มิติ เมื่อทราบถึงตัวแปรการออกแบบที่ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ผู้ออกแบบสามารถนำผลลัพธ์เพื่อทำการตัดสินใจต่อไปสำหรับการออกแบบเบื้องต้นและการออกแบบรายละเอียดได้ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะนำไปใช้กับปัญหาการออกแบบแนวคิดของเครื่องบินพาณิชย์ ต้องใช้การคำนวณซ้ำและไม่สามารถคำนวณด้วยตนเองได้เนื่องจากการคำนวณแต่ละรอบการคำนวณใช้เวลาในระดับวินาที นั่นคือเหตุผลที่ใช้การโค้ด MATLAB เพื่อส่งการ API (Application Programming Interface) ร่วมกับโปรแกรม AVL และ SUAVE

**SUAVE**

SUAVE หรือ (Aerospace Conceptual Design Environment) คือซอฟต์แวร์รวบรวมเครื่องมือในการออกแบบตามแนวคิดของเครื่องบินที่เขียนอยู่ในรูปแบบโค้ดภาษา Python แต่ละโมดูลที่ใช้ในการออกแบบแสดงให้เห็นด้านล่าง<sup>10-13</sup> a conceptual level aircraft design environment, incorporates multiple information sources to analyze unconventional configurations. Developing the capability of producing credible conceptual level design conclusions for futuristic aircraft with advanced technologies is a primary directive. Many software tools for aircraft conceptual design rely upon empirical correlations and other handbook approximations. SUAVE proposes a way to design aircraft featuring advanced technologies by augmenting relevant correlations with physics-based methods. SUAVE is constructed as a modular set of analysis tools written compactly and evaluated with minimal programming effort. Additional capabilities can be incorporated using extensible interfaces and prototyped with a top-level script.

The flexibility of the environment allows the creation of arbitrary mission profiles, unconventional propulsion networks, and right-fidelity at right-time discipline analyses. This article will first explain how SUAVE’s analysis capabilities are organized to enable flexibility. Then, it will summarize the analysis strategies for the various disciplines required to evaluate a mission. Of particular interest will be the construction of unconventional energy networks necessary to evaluate configurations such as hybrid-electric commercial transports and solar-electric unmanned aerial vehicles (UAVs)



**Figure 1** Flow chart of aircraft conceptual design

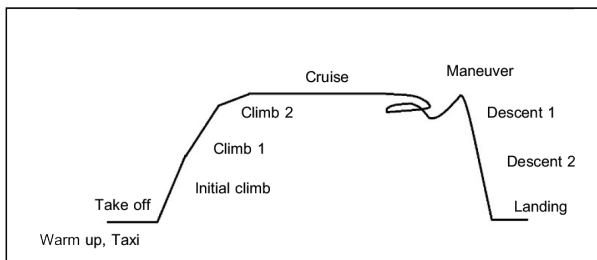
- โมดูลประมาณค่าน้ำหนัก
- โมดูลการกำหนดภารกิจการบิน
- โมดูลการประมาณ
- โมดูลแบบจำลองการขับเคลื่อน
- โมดูลประสิทธิภาพ เช่น ระยะเวลาการออกตัวและลงจอด, แผนภาพภารกิจการบิน

**Athena vortex lattice (AVL)**

AVL เป็นโปรแกรม opensource ที่ใช้วิธี vortex lattice โดย Mark drela ซึ่งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับการทดลองเมื่อออกแบบในช่วงความเร็วต่ำกว่าเสียงและมุมปะทะต่ำกว่า Stall angle (8)real-time data aids for evaluating and communicating reports about volcanic hazards. For this reason, the present research aims the aerodynamic design of a low-cost unmanned aerial vehicle (UAV ในส่วนของงานวิจัย AVL ถูกนำมาคำนวณเสถียรภาพเชิงกลเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขบังคับในกระบวนการ optimization โดยโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงให้เห็นใน Figure 7<sup>14</sup>

**ปัญหาการออกแบบเครื่องบินพาณิชย์**

การกำหนดปัญหาในการออกแบบเครื่องบินพาณิชย์เป็นขั้นตอนแรกของการออกแบบตามแนวคิด ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดรูปแบบและค่าคงที่ของตัวแปรของปัญหา เพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าน้ำมันที่ใช้ในการบิน โดยรูปทรงเครื่องบินที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ เครื่องบินพาณิชย์แบบ conventional อ้างอิงรูปร่างจาก Boeing 737-800 เป็นเครื่องบินขนาดกลางสามารถบรรทุกผู้โดยสาร สัมภาระและลูกเรือได้ไม่น้อยกว่า 170 คน โดยภารกิจในการบินจะเป็นการบินขนส่งผู้โดยสารจากต้นทางไปยังปลายทางโดยแสดงให้เห็นดัง Figure 2 รายละเอียดของแต่ละส่วนของการบินแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้



**Figure 2** Flight mission

1. “Warm up and Taxi” ใช้เวลาประมาณ 10 นาที ที่สภาวะระดับน้ำทะเล
2. “Take-off” ระยะในการ take-off ให้ได้ความสูงมากกว่า 50 ft. มุม flaps กดลงที่ 20 deg. และ Cross wind 20 knots.
3. “Initial climb” ใต้ขึ้นไปยังความสูง 2000 m. ด้วยอัตรา 6 m/s ที่ความเร็ว 125 m/s
4. “climb 1” ใต้ขึ้นไปยังความสูง 5000 m. ด้วยอัตรา 6 m/s ที่ความเร็ว 190 m/s
5. “climb 2” ใต้ขึ้นไปยังความสูง 7000 m. ด้วย

อัตรา 1.5 m/s ที่ความเร็ว 226 m/s

6. “Cruise” ระดับในการบินและความเร็วในช่วง cruise เป็นตัวแปรออกแบบ ระยะในการบินถูกกำหนดไว้ที่ 3000 NM.
7. “Maneuvers” ได้กำหนดภารกิจในการเลี้ยวเพื่อเป็นเงื่อนไขบังคับในการออกแบบ
8. “Descent 1” ร่อนลงไปยังความสูง 3000 m. ด้วยอัตรา 5 m/s ที่ความเร็ว 170 m/s
9. “Descent 2” ร่อนลงไปยังความสูงระดับน้ำทะเล ด้วยอัตรา 3 m/s ที่ความเร็ว 145 m/s
10. “Landing” กด flaps ลง 30 deg. และกาง slats ทำมุม 25 deg. เพื่อทำการลงจอด

**กระบวนการ Optimization**

ฟังก์ชันเป้าหมายของการออกแบบ คือ ค่าต่ำที่สุดของน้ำหนักรวม และส่วนกลับของอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านตามสมการที่ 1 ผลที่ได้เป็นค่าของแต่ละประชากร โดยมีเงื่อนไขบังคับ ซึ่ง penalty function ถูกนำมาใช้ในการออกแบบครั้งนี้ ดังสมการที่ 2 คือจำนวนของเงื่อนไขบังคับ, ใช้ค่าเริ่มต้นคือ 0.001, และ เท่ากับ 10 และ 1000 ตามลำดับค่าที่ได้นำมาจาก<sup>15</sup> ประชากรและเงื่อนไขบังคับในการออกแบบแสดงให้เห็นดัง Table 2 และ 3 ตามลำดับ

$$Min: f(x) = \left\{ W_G \frac{1}{L/D} \right\} (1)$$

$$s.t. \prod g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_g$$

มีการใช้อัลกอริทึม Meta-heuristic 6 รายการ เพื่อเปรียบเทียบปัญหาการหาค่าเหมาะสมหลายวัตถุประสงค์ซึ่งประกอบด้วย RPBILDE<sup>15</sup>, MOEA/D<sup>17</sup>, Two-Arch2<sup>16</sup>, PICEA-g<sup>17</sup>, KnEA/A-ENS<sup>18</sup> และ KnEA<sup>19</sup> โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นนำมาจากค่าเริ่มต้นของแต่ละอัลกอริทึม

**ผลการออกแบบ**

การหาค่าเหมาะสมที่สุดของเครื่องบินพาณิชย์ในขั้นตอนการวิเคราะห์ตามแนวคิดจาก 6 อัลกอริทึมโดยแต่ละรันจะทำซ้ำทั้งหมด 100 รอบ จำนวนประชากรที่ใช้คือ 50 ประชากร จากนั้น ค่าที่เหมาะสมที่สุดจำนวน 50 ประชากรจะถูกเก็บไว้และแสดงให้เห็นอยู่ในรูปของขอบหน้าพาเรโต ดัง Figure 3 เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ แต่ละอัลกอริทึมจะมีการทดลองซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง ผลของ Hypervolume จะ

นำไปหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองซ้ำ จากนั้นนำไปจัดอันดับเพื่อหาอัลกอริทึมที่ดีที่สุดโดยวิธี Friedman test เมื่อทราบถึงชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากแถบหน้า Pareto แล้ว ผู้ออกแบบจะมีตัวเลือกในการออกแบบที่หลากหลายเพื่อใช้ในการประกอบการตัดสินใจ ตัวอย่างของประชากรที่เลือกมาจากแถบหน้า Pareto ได้แสดงให้เห็นในคอลัม Optimal result ใน Table 1 โดยสมรรถนะจะแสดงให้เห็นใน Figure 3-6 และ Figure 7 จะแสดงให้เห็นภาพตัวอย่างของ Optimal result เครื่องบินพาณิชย์ในกระบวนการออกแบบตามแนวคิดโดยใช้ OpenVSP ในการสร้างพิกัด Degengeom แล้วใช้ MATLAB ในการพล็อตผิวของเครื่องบิน

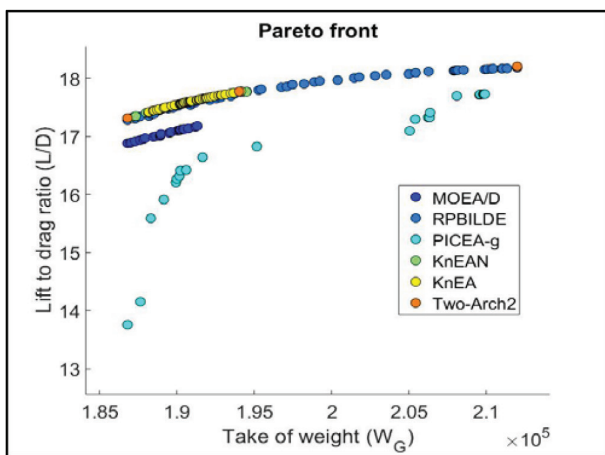


Figure 3 Pareto front of Lift to drag ratio and Take of weight

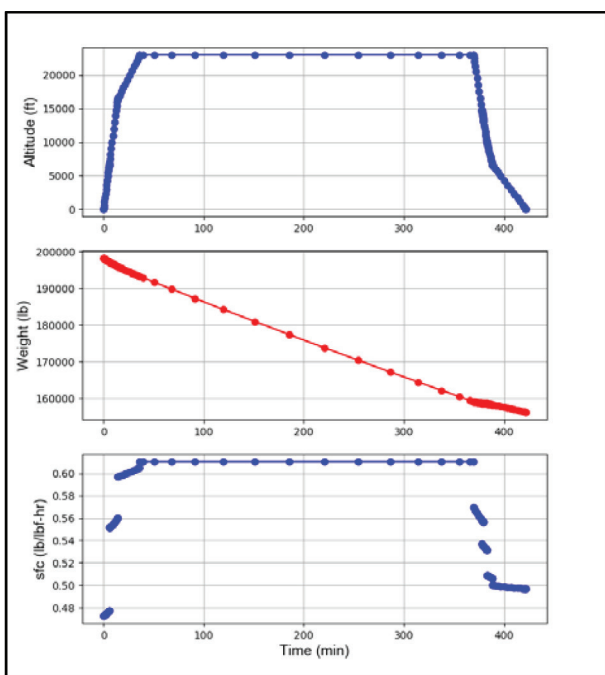


Figure 4 Attitude weight and SFC versus time

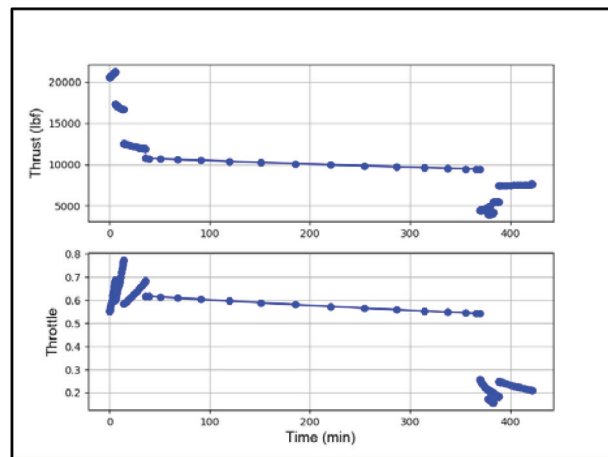


Figure 5 Thrust and Throttle versus time

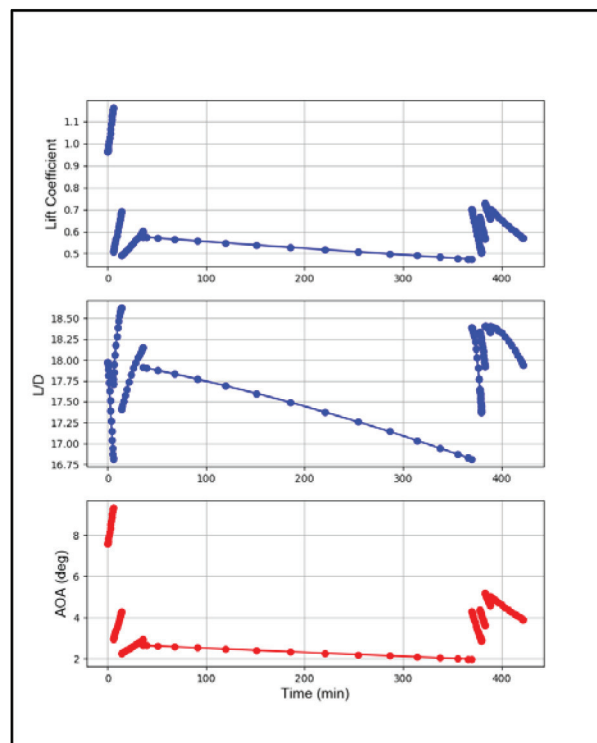


Figure 6 Lift coefficient, Lift to drag ratio and Angle of attack versus time

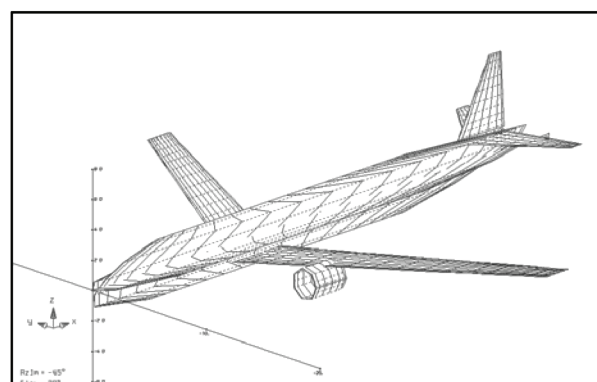


Figure 7 AVL model

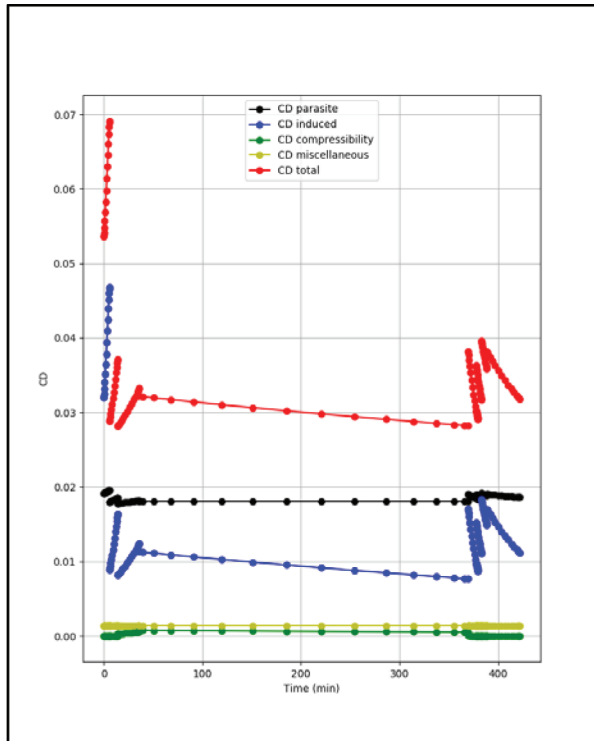


Figure 8 Drag coefficient versus time

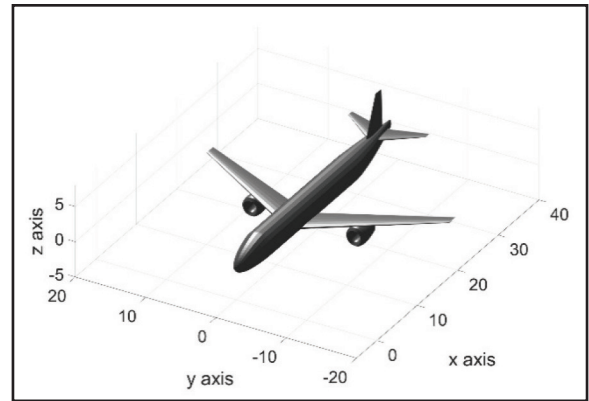


Figure 9 The Optimal result model of conventional aircraft

Table 1 Hypervolume values from various meta-heuristics

Algorithms	Mean Hypervolume	Standard deviation	Ranking
MOEA/D	93.1733	2.9978	3
RPBILDE	104.4809	0.0234	1
PICEA-g	78.3110	0.3290	6
MnKnEA	96.8586	3.6633	5
KnEA/A-ENS	92.9765	2.9562	4
Two-Arch2	103.5148	0.3732	2

**Table 2** Design variables

Table of design variables.				
No.	design variables	Lower bound	Upper bound	Optimal result
1.	Wing quarter chord sweeps angle (deg.)	10.00	30.00	30.00
2.	Wing taper ratio	0.30	0.70	0.47
3.	Wing spans (m.)	20.00	35.00	35.00
4.	Wing root chords (m.)	4.00	8.00	4.09
5.	Wing incidence (deg.)	0.00	4.00	0.78
6.	Flaps end of wing span (start at 0.1)	0.15	0.30	0.25
7.	Ratio of flaps with mean chord	0.50	0.70	0.67
8.	Ailerons end of wing span	0.80	0.95	0.86
9.	Ratio of ailerons with mean chord	0.10	0.25	0.14
10.	Horizontal tail quarter chord sweeps angle (deg.)	20.00	40.00	39.18
11.	Horizontal tail taper ratio	0.35	0.65	0.36
12.	Horizontal tail span (m.)	10.00	18.50	10.00
13.	Horizontal tail root chords (m.)	3.50	6.20	3.50
14.	Horizontal tail incidence (deg.)	-8.00	-4.00	-4.98
15.	Ratio of elevator with mean chord	0.15	0.30	0.30
16.	Vertical tail quarter chord sweeps angle (deg.)	20.00	35.00	28.99
17.	Vertical tail taper ratio	0.25	0.50	0.25
18.	Vertical tail span (m.)	5.00	8.00	5.00
19.	Vertical tail root chord (m.)	4.00	8.00	4.10
20.	Ratio of rudder with mean chord	0.15	0.30	0.15
21.	Thrust require (kN.)	20	30	25.28
22.	Flight attitude at cruise (km.)	6.00	11.00	8.50
23.	Wing translation of x axis (m.)	-3.00	3.00	-1.40
24.	Cruise speed (Mach number)	0.65	0.85	0.74

**Table 3** Constraints

Table of limit constraint.				
NO.	Constraints	Lower limit	Upper limit	Optimal result
	Throttle	0	0.9	Figure 5
	Time to 30 deg of bank angle	1	2.5	1.43
	Coefficient of pitching moment versus angle of attack	-	-0.1	-6.24
	Angle of attack	-	10	Figure 6
	Coefficient of yawing moment versus side slip angle	0	-	0.075
	Deflection of elevator (deg)	-10	10	-1.59
	Deflection of rudder (deg)	-10	10	-4.30
	Deflection of aileron (deg)	-10	10	10
	Short period frequency	1	-	6.13

**Table 3** Constraints (Continue)

Table of limit constraint.				
NO.	Constraints	Lower limit	Upper limit	Optimal result
	Short period damping ratio	0.5	1.1	0.51
	Phugoid frequency	0.1	1	0.12
	Phugoid damping ratio	0.04	0.4	0.06
	Dutch roll frequency	1	-	2.43
	Dutch roll damping ratio	0.08	0.6	0.42
	Spiral time constant	1	-	2.59
	Rolling time constant	0	1	0.32

### สรุปและอภิปรายผล

ตลอดบทความนี้ ผู้จัดทำได้แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายเป้าหมายทั้งหมด 6 อัลกอริทึมที่แตกต่างกัน คือ MOEA/D, Two-Arch2, RPBIL-DE, PICEA-g, KnEA/A-ENS และ KnEA กับปัญหาการออกแบบเครื่องบินพาณิชย์ตามแนวคิดเพื่อหาอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับปัญหา โดยใช้ Hypervolume เป็นเครื่องมือในการวัดประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึม ร่วมกับการใช้ซอฟต์แวร์ SUAVE ในการประมาณค่าประสิทธิภาพทางด้านอากาศพลศาสตร์และ AVL ที่ใช้ในการประมาณค่าเสถียรภาพเชิงกล ผลการออกแบบพบว่า RPBILDE ให้ค่า Hypervolume สูงที่สุดดัง Table 2 ซึ่งใกล้เคียงกับ Two-Arch2 ซึ่งหมายความว่าจะได้ชุดคำตอบของน้ำหนักรวมและอัตราส่วนแรงยกต่อแรงต้านที่เข้าใกล้ค่าที่ดีที่สุดโดยคำตอบจะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปแบบขอบหน้าพาเรโตซึ่งจะเป็นทางเลือกสำหรับนักออกแบบเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบขั้นต้นและขั้นละเอียดต่อไป ค่าสมรรถนะทางด้านอากาศพลศาสตร์ เส้นทางการบินและอื่น ๆ สามารถแสดงให้เห็นผ่านกราฟผลการออกแบบของซอฟต์แวร์ SUAVE และรูปร่างของเครื่องบินพาณิชย์สามารถสร้างได้ด้วยการ API ระหว่าง OpenVSP และ MATLAB ผ่าน Degengeom

### เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงการท่องเที่ยวและกีฬา. สถิตินักท่องเที่ยว.
- Matana Wiboonysake. ประเทศไทย 4.0 | Thailand 4.0 (ไทยแลนด์) และ Industry 4.0 คืออะไร? - Aware.
- Bae B, Kim S, Lee J, Nguyen N Van. Process of establishing design requirements and selecting alternative configurations for conceptual design of a VLA. Chinese J Aeronaut. 2017;30(2):738–51.
- Sadraey MH. AIRCRAFT DESIGN A Systems Engineering Approach [Internet]. Daniel Webster College, New Hampshire, USA; 2013. 19–48 p. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118352700.ch2%5Cnhttp://doi.wiley.com/10.1002/9781118352700>
- Raymer D. Aircraft Design: A Conceptual Approach, Sixth Edition. 2018.
- Singh V, Sharma SK, Vaibhav S. Transport Aircraft Conceptual Design Optimization Using Real Coded Genetic Algorithm. 2016;2016.
- Özdemir S. MULTI OBJECTIVE CONCEPTUAL DESIGN OPTIMIZATION OF AN AGRICULTURAL AERIAL ROBOT (AAR). 2012.
- Bravo-Mosquera PD, Botero-Bolivar L, Acevedo-Giraldo D, Cerón-Muñoz HD. Aerodynamic design analysis of a UAV for superficial research of volcanic environments. Aerosp Sci Technol [Internet]. 2017;70:600–14. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2017.09.005>
- Pholdee N, Bureerat S. Hybrid real-code population-based incremental learning and approximate gradients for multi-objective truss design. Eng Optim. 2014 Aug;46(8):1032–51.
- MacDonald T, Clarke M, Botero EM, Vegh JM, Alonso JJ. SUAVE: An Open-Source Environment Enabling Multi-Fidelity Vehicle Optimization. 2017;1–14.
- Botero E, Wendorff AD, Macdonald T, Variyar A, Vegh JM, Lukaczyk T, et al. SUAVE : An Open-Source Environment for Conceptual Vehicle Design and Optimization. :1–16.

12. Botero EM, Alonso JJ. Conceptual Design and Optimization of Small Transitioning UAVs using SUAVE. 2017;1–15.
13. Wendorff A, Botero E, Alonso JJ. Comparing Different Off-the-Shelf Optimizers' Performance in Conceptual Aircraft Design. 2016;1–14.
14. Drela M. AVL program for the aerodynamic and flight-dynamic analysis of rigid aircraft of arbitrary configuration.
15. Pholdee N, Bureerat S, Yıldız AR. Hybrid real-code population-based incremental learning and differential evolution for many-objective optimisation of an automotive floor-frame. *Int J Veh Des*. 2017;73(1/2/3):20.
16. Wang H, Jiao L, Yao X. Two\_Arch2: An Improved Two-Archive Algorithm for Many-Objective Optimization. *IEEE Trans Evol Comput*. 2015;19(4):524–41.
17. Wang R, Purshouse RC, Fleming PJ. Preference-Inspired Coevolutionary Algorithms for Many-Objective Optimization. *IEEE Trans Evol Comput*. 2013;17(4):474–94.
18. Zhang X, Tian Y, Jin Y. Approximate non-dominated sorting for evolutionary many-objective optimization. Vol. 369, *Information Sciences*. 2016.
19. Zhang X, Tian Y, Jin Y. A Knee Point Driven Evolutionary Algorithm for Many-Objective Optimization. Vol. 19, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2014.



# การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมความร้อนและการต้านทานการไหลของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใส่ดิฟฟิวเซอร์ทรงกรวย

## Experimental studies on thermal and flow resistance behaviors of turbulent flow through a heat exchanger tube with conical-diffuser inserts

ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์<sup>1</sup>, ธีรพัฒน์ ชมภูคำ<sup>2</sup>, พงษ์เจต พรหมวงศ์<sup>3</sup>, สมพล สกุลหลง<sup>4\*</sup>

Panuwat Hoonpong<sup>1</sup>, Teerapat Chompookham<sup>2</sup>, Pongjet Promvong<sup>3</sup>, Sompol Skullong<sup>4\*</sup>

Received: 10 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจสอบพฤติกรรมความร้อนและความเสียดทานการไหลของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการพาความร้อนแบบบังคับกรณีการไหลแบบสถานะเดียวด้วยการใส่ดิฟฟิวเซอร์ทรงกรวย จุดประสงค์ของการติดตั้งดิฟฟิวเซอร์ทรงกรวยเพื่อสร้างการไหลหมุนวนซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มระดับความปั่นป่วนของการไหลและนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อทดสอบ พฤติกรรมการไหลของอากาศและความร้อนสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนำเสนอในพจน์เลขเรย์โนลด์ในช่วง 4190 ถึง 25,800 การจัดวางสัดส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อได้รับการตรวจสอบที่ PR = 1, 3, 5, 7 และ 9 ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานสำหรับการผลักดันอากาศไหลผ่านท่อทดสอบแสดงในพจน์ของเลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ) และตัวประกอบความเสียดทาน ( $f$ ) ตามลำดับ ผลทดลองพบว่า การประยุกต์ใช้ดิฟฟิวเซอร์ทรงกรวยสามารถช่วยเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าท่อผิวเรียบ 247% ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของการใส่ดิฟฟิวเซอร์ทรงกรวยภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 1.28–1.35 โดยให้ค่าสูงสุดที่ PR = 1 และ Re = 4190

**คำสำคัญ:** ดิฟฟิวเซอร์ทรงกรวย เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การไหลหมุนวน การต้านทานการไหล สมรรถนะเชิงความร้อน

### Abstract

In this research, an experimental investigation of the thermal and flow friction characteristics of tubular heat exchanger (HE) for single-phase forced convective flow with conical-diffuser inserted in the inner tube was performed. The aim of using the conical-diffuser is to create vortex flows having a significant influence on the flow turbulence intensity

<sup>1</sup> อาจารย์, สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี 321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, หน่วยวิจัยท่อความร้อนและออกแบบเครื่องมือทางความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 41/20 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

<sup>3</sup> รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

<sup>4</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, กลุ่มวิจัยระบบพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา 199 หมู่ 6 ถนนสุขุมวิท ตำบลทุ่งสุขลา อำเภศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Mechanical Technology, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University, 321 Naraimaharat Road, Talaychubsorn, Lopburi 15000

<sup>2</sup> Asst. Prof., Heat Pipe and Thermal Tools Design Research Unit (HTDR), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>4</sup> Asst. Prof., Energy Systems Research Group, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, 199 M.6, Sukhumvit Rd., Sriracha, Chonburi 20230, Thailand

\* Corresponding author; Sompol Skullong, E-mail address: sfengsps@src.ku.ac.th, sompol@eng.src.ku.ac.th

leading to higher heat transfer enhancement in the tested tube. The air flow and heat transfer characteristics are presented for turbulent flow, Reynolds numbers ( $Re$ ) ranged from 4190 to 25,800. Three different pitch ratios (PR) of conical-diffuser arrangements in the test tube are introduced with PR = 1, 3, 5, 7 and 9 in each run. The heat transfer and energy loss due to friction for propelling air through the tube are presented in terms of Nusselt number ( $Nu$ ) and friction factor ( $f$ ), respectively. It was found that each application of the conical diffuser can help to increase considerably the heat transfer rate over that of the plain/smooth tube by about 247%. The thermal enhancement factor ( $TEF$ ) of the conical-diffuser is in the range of 1.28–1.35 where its maximum, regarded as the optimum point, is at PR = 1 and  $Re = 4190$ .

**Keywords:** Conical-diffuser, Heat exchanger, Vortex flow, Flow resistance, Thermal performance

## บทนำ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านวิศวกรรมและภาคอุตสาหกรรมทั่วไป การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีความสำคัญและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้งาน การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นที่นิยมในหมู่นักวิจัยจำนวนมาก ทั้งนี้เพื่อให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีขนาดกะทัดรัดหรือลดขนาดลง โดยความร้อนที่ได้ยังคงมีปริมาณเช่นเดียวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนปกติ ปัจจุบัน ไบบิต Ponnada *et al.*<sup>1</sup>, Abolarin *et al.*<sup>2</sup> และชดลวด Hong *et al.*<sup>3,4</sup> ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดย Eiamsa-ard *et al.*<sup>5</sup> ทำการทดลองโดยสอดใส่ไบบิตแบบเว้นระยะ ภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเปรียบเทียบกับไบบิตเต็ม เพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน Bhuiya *et al.*<sup>6</sup> ศึกษาเชิงทดลองเพื่อเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลมโดยการติดตั้งไบบิตพรุณภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จากการทดลองพบว่า การติดตั้งไบบิตพรุณให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในพจน์ของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) รวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อน (thermal performance factor) สูงกว่าท่อผิวเรียบ 340% และ 59% ตามลำดับ ต่อมา Bhuiya *et al.*<sup>7</sup> ทำการทดลองโดยติดตั้งไบบิตคู่ภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น 60–240% และ 91–286% เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ ในขณะที่สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.34 Promvong<sup>8</sup> ทำการทดลองเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนด้วยการติดตั้งไบบิตร่วมกับชดลวดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จากผลการทดลองพบว่า การใช้ไบบิตร่วมกับชดลวดให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าการติดตั้งไบบิตหรือชดลวดเพียงอย่างเดียว ต่อมา Promvong<sup>9</sup> ทำการเปรียบเทียบชดลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและหน้าตัด

กลม โดยพบว่าชดลวดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีกว่า Keklikcioglu และ Ozceyhan<sup>10</sup> ทำการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ชดลวดหน้าตัดสามเหลี่ยม พบว่า ชดลวดสามเหลี่ยมที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงแต่ก็ให้ค่าความเสียดทานสูงตามด้วย

ความพยายามในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากงานวิจัยที่ผ่านมา อุปกรณ์ เช่น ไบบิต และชดลวดสามารถสร้างการไหลแบบปั่นป่วนหรือการไหลหมุนวนภายในท่อซึ่งเกิดการขัดขวางการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อน (thermal boundary layer) บริเวณผนังท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ของไหลอุณหภูมิสูงบริเวณผนังท่อถ่ายเทมาผสมกับอุณหภูมิของไหลที่ต่ำกว่าภายในท่อได้เป็นอย่างดี ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ดังกล่าวใช้หลักการสร้างกระแสหมุนวนของของไหลและให้ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่สูงมากนักทั้งยังขึ้นรูปและผลิตชิ้นงานค่อนข้างยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการสร้างอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กระจายการไหลให้แก่ของไหลซึ่งไหลเข้าท่อขนาดเล็กและกระจายออกหรือการไหลหมุนวน อุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่า ดิฟฟิวเซอร์ทรงกรวย ทั้งนี้เพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นอีกหนึ่งแนวทางเลือกหนึ่งของอุปกรณ์เพิ่มการถ่ายเทความร้อน

## ทฤษฎีและการคำนวณ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน และสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบซึ่งแสดงในพจน์ของเลขเรย์โนลด์ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$Re = UD / \nu \tag{1}$$

โดยที่  $U$  และ  $\nu$  เป็นความเร็วเฉลี่ยและความหนืดเชิงจลน์ของอากาศตามลำดับ

สมดุลความร้อนระหว่างความร้อนที่อากาศได้รับ ( $Q_{air}$ ) และการพาความร้อน ( $Q_{conv}$ )

$$Q_{air} = Q_{conv} \tag{2}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ( $h$ ) หาได้จาก

$$h = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A(\tilde{T}_s - T_b)} \tag{3}$$

เมื่อ  $T_b = (T_o + T_i) / 2$  และ  $\tilde{T}_s = \sum T_s / 16$

โดยที่

- $A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )
- $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ( $kJ/kg K$ )
- $T_o$  คือ อุณหภูมิทางออก ( $K$ )
- $T_i$  คือ อุณหภูมิทางเข้า ( $K$ )
- $\tilde{T}_s$  คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ( $K$ )
- $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ( $kg/s$ )

เลขนัสเซลท์เฉลี่ย ( $Nu$ ) หาได้ดังนี้

$$Nu = hD / k \tag{4}$$

ตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) หาได้จาก

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

เมื่อ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทดสอบ  $\Delta P$  คือ ค่าความดันตกคร่อมชุดทดสอบ  $L$  คือ ความยาวท่อทดสอบ และ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล

การประเมินศักยภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงในพจน์ของสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF)<sup>1-10</sup> โดยสามารถแสดงได้ดังนี้

$$TEF = \left( \frac{Nu}{Nu_0} \right) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \tag{6}$$

**อุปกรณ์และวิธีการทดลอง**

ดิฟฟิวเซอร์ทรงกรวยติดตั้งภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดัง Figure 1 โดยทำมุมปะทะ ( $\alpha$ )  $30^\circ$  กับทิศทางการไหล และมีสัดส่วนระยะพิตซ์ตามแนวกระแสร

ไหลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 5 ค่า ( $P/D=PR=1, 3, 5, 7$  และ  $9$ ) ดิฟฟิวเซอร์ทรงกรวยถูกติดตั้งภายในท่อทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ )  $50\text{ mm}$  ยาว ( $L$ )  $1200\text{ mm}$  เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ความเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดัง Figure 2 โดยมีส่วนประกอบต่างๆ คือ blower หรือพัดลมซึ่งใช้เป็นแหล่งจ่ายอากาศ inverter เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของพัดลม orifice flow meter ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศ inclined manometer ใช้วัดค่าความดันตกคร่อม settling tank ทำหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศ test section หรือท่อทดสอบซึ่งมีการให้ความร้อนแก่ท่อด้วยขดลวดความร้อน โดยมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด T (T-type thermocouple) จำนวน 16 ตัว ติดตั้งที่ผิวด้านนอกของท่อทดสอบเพื่อวัดอุณหภูมิผิว และมี AC power supply หรือ variac transformer เป็นแหล่งจ่ายความร้อนให้กับระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะที่เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิด RTD จำนวน 2 ตัว ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออกท่อทดสอบ data acquisition system รุ่น FLUKE 2680A ถูกใช้เป็นตัวอ่านค่าอุณหภูมิผิวและอุณหภูมิทางเข้า-ออกท่อทดสอบ วิธีการทดลองเริ่มจากพัดลมจ่ายอากาศซึ่งเป็นของไหลทดสอบ โดยมี inverter เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบจากนั้นอากาศไหลผ่านแผ่น orifice flow meter ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าชุดทดสอบ โดยมี inclined manometer ติดตั้งไว้เพื่ออ่านค่าความแตกต่างของความดัน settling tank ทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีความเสถียรก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ calm section จะทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาเต็ม (fully developed flow) ก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ ท่อทดสอบถูกให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อน (electrical wire) แบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ และทำการหุ้มฉนวนอย่างดีเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน Fluke 2680A เป็นอุปกรณ์เก็บค่าอุณหภูมิที่เชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด T ทั้งหมด 16 ตัว ซึ่งวัดค่าอุณหภูมิที่ผิว 16 ตำแหน่ง ขณะที่เทอร์โมคัปเปิลชนิด RTD ถูกนำมาใช้เพื่อวัดค่าอุณหภูมิทางเข้าและทางออกส่วนทดสอบ ในส่วนของการวัดค่าความดันตกคร่อมชุดทดสอบ digital manometer รุ่น Dwyer 475 mark III ถูกนำมาใช้ในการวัดค่า ข้อมูลการทดลองจะทำการบันทึกเมื่ออุณหภูมินิ่ง (steady-state)

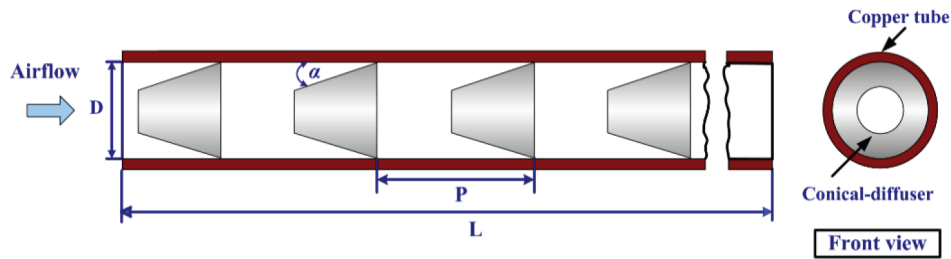


Figure 1 Conical diffuser

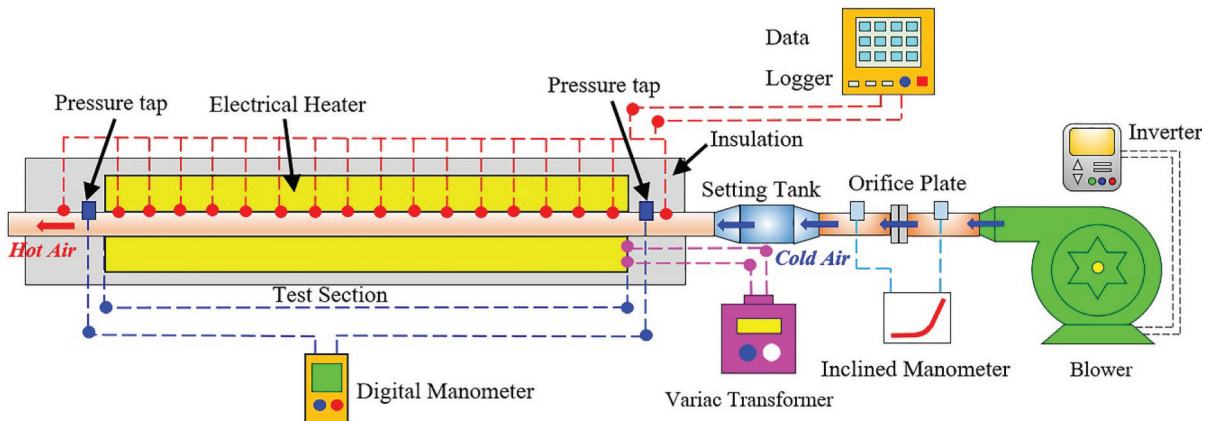


Figure 2 Schematic of the test facility HE

**การตรวจสอบท่อผิวเรียบ**

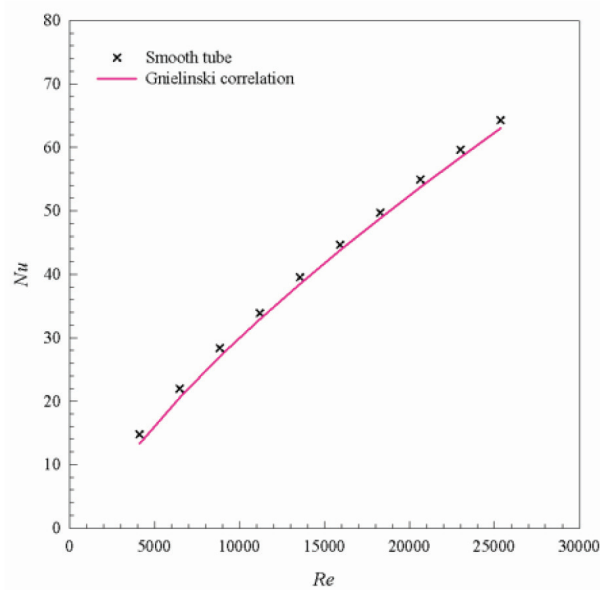
การถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการทดลองกรณีท่อผิวเรียบแสดงในพจน์ของเลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ) และตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับ สหสัมพันธ์<sup>11</sup> เพื่อความถูกต้องและแม่นยำ โดยผลของ  $Nu$  จะเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Gnielinski ขณะที่ผลของ  $f$  จะเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Petukhov โดยสมการแสดง ดังนี้

สหสัมพันธ์ของ Gnielinski

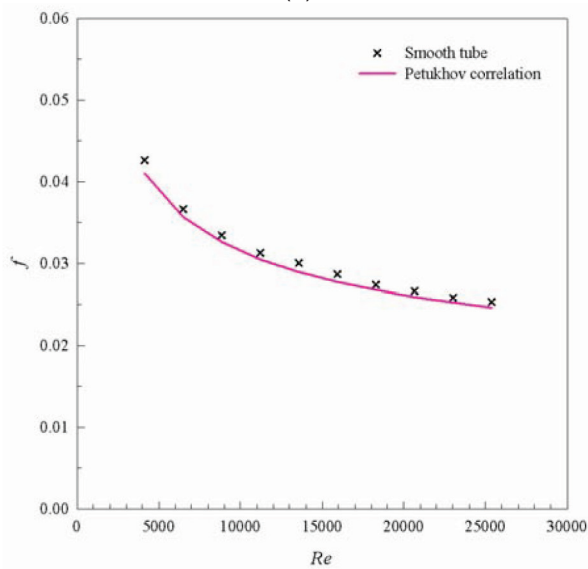
$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (7)$$

สหสัมพันธ์ของ Petukhov

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



(a)



(b)

Figure 3 Verification of (a)  $Nu$  and (b)  $f$  with  $Re$  for smooth tube.

Figure 3 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $Nu$  และ  $f$  โดย Figure 3 (a) แสดงค่า  $Nu$  ของการทดลองเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Gnielinski พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 7.5% ขณะที่ Figure 3 (b) แสดงค่า  $f$  ของการทดลองเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Petukhov พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 9.2% โดยความคลาดเคลื่อนทั้ง  $Nu$  และ  $f$  มีค่าน้อยกว่า 10%<sup>1-10</sup> ดังนั้นจึงเป็นที่ยืนยันถึงความน่าเชื่อถือของผลการทดลองและสามารถทดสอบดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยได้

### ผลการทดลองดัดฟิวเซอร์ทรงกรวย

#### การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวย แสดงดัง Figure 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ผลการทดลองพบว่า การติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ดี โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าเลขเรย์โนลด์

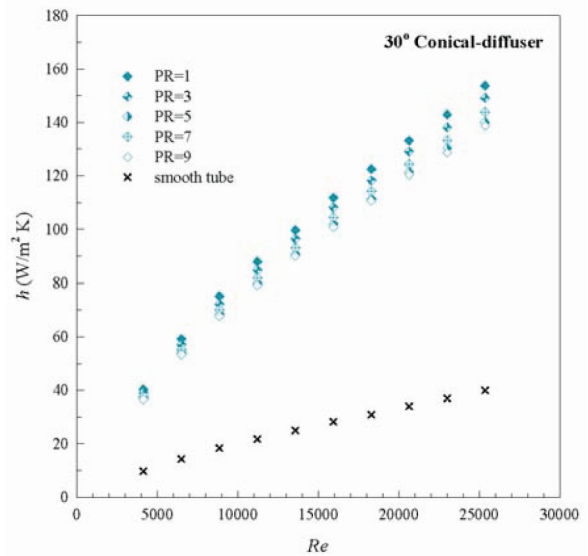


Figure 4 Variation of  $h$  with  $Re$

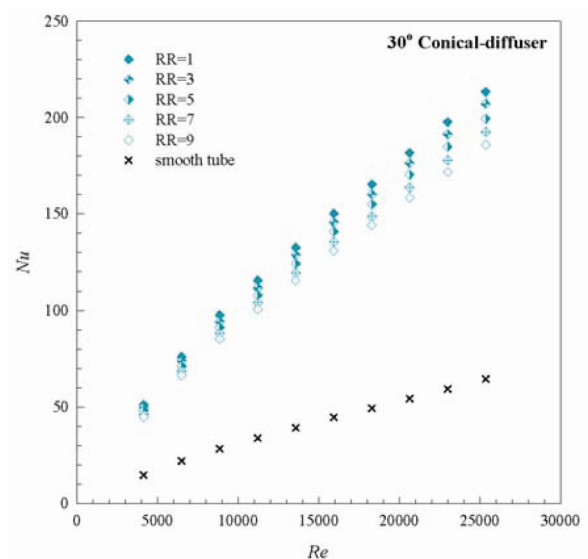


Figure 5 Variation of  $Nu$  with  $Re$

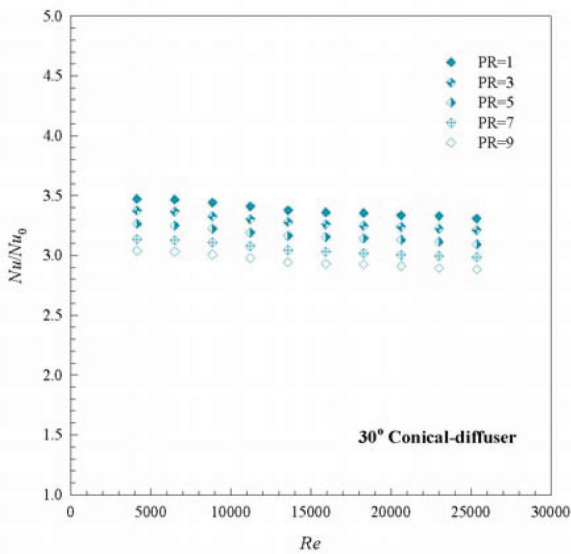


Figure 6 Variation of  $Nu/Nu_0$  with  $Re$

Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนในพจน์ของเลขนัสเซิลท์ ( $Nu$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติ กับ  $Re$  จากการทดลองพบว่า การติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยให้ค่า  $Nu$  สูงกว่าท่อผิวเรียบ 203–247% โดยเฉพาะกรณีสัดส่วนระยะพิตซ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีระยะสั้นหรือถี่ เนื่องจากสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการกระจายของของไหลได้ดีกว่ากรณีสัดส่วนระยะพิตซ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีระยะกว้างหรือห่าง ส่งผลให้สามารถลดชั้นขอบเขตความร้อนได้เป็นอย่างดีและเกิดการผสมผสานกันระหว่างของไหลได้อย่างรวดเร็ว (ของไหลอุณหภูมิต่ำบริเวณกลางท่อและของไหลอุณหภูมิสูงบริเวณผิวท่อ) โดยดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 1$  มีค่า  $Nu$  มากกว่าดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 3, 5, 7$  และ  $9$  ตามลำดับ

Figure 6 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กรณีติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยต่อเลขนัสเซิลท์ของท่อผิวเรียบ ( $Nu/Nu_0$ ) กับ  $Re$  จากการทดลองพบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $Nu/Nu_0$  มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยการติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยมีค่า  $Nu/Nu_0$  เฉลี่ยเท่ากับ 3.39, 3.28, 3.17, 3.05 และ 2.95 สำหรับ  $PR = 1, 3, 5, 7$  และ  $9$  ตามลำดับ

**อิทธิพลต่อความต้านทานการไหลของของไหล**

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการผลัดกันของไหลผ่านท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยแสดงในพจน์ของความดันตกคร่อม (Pressure drop,

$DP$ ) ตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ ( $ff_0$ ) ตามลำดับ

Figure 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $DP$  กับ  $Re$  จากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $DP$  เพิ่มขึ้น การติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 1$  มีค่าความดันตกคร่อมสูงกว่ากรณี  $PR = 3, 5, 7$  และ  $9$  ตามลำดับ เนื่องจากการติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยที่มีระยะสั้นหรือถี่จะมีพื้นที่และจำนวนมากกว่าการติดตั้งดัดฟิวเซอร์ทรงกรวยที่มีระยะห่าง ซึ่งส่งผลให้อากาศที่ไหลมาปะทะมีระดับการไหลและการกระจายตัวสูงกว่าตามไปด้วย

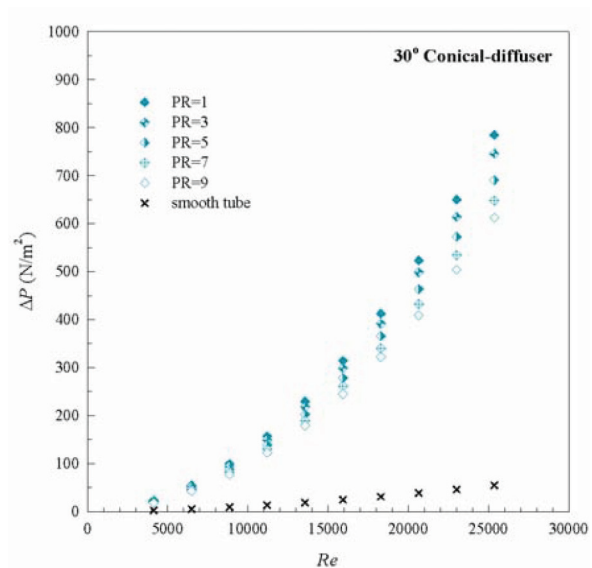


Figure 7 Variation of  $DP$  with  $Re$

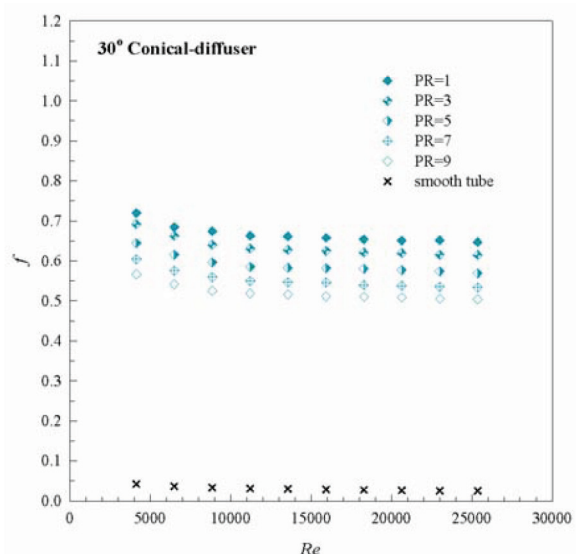


Figure 8 Variation of  $f$  with  $Re$

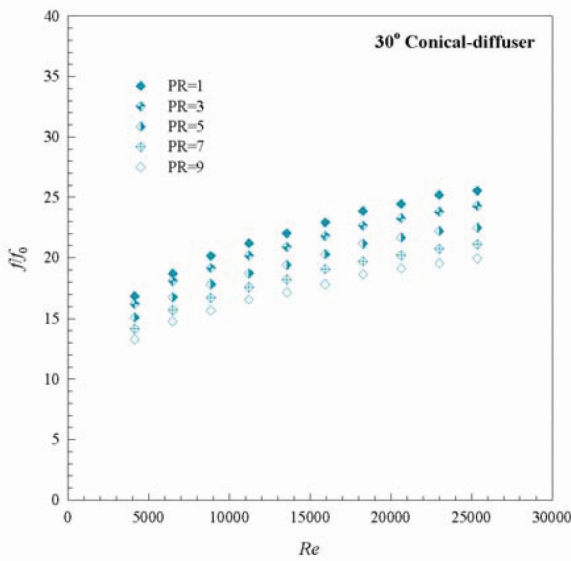


Figure 9 Variation of  $f/f_0$  with  $Re$

Figure 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $Re$  จากรูปแสดงให้ เห็นว่าการติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้ค่า  $f$  เพิ่มขึ้นประมาณ 13.28–25.54 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ

Figure 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  จากการทดลองพบว่า  $f/f_0$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า  $Re$  การติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 1$  มีค่า  $f/f_0$  สูงสุด ตามด้วยการติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 3, 5, 7$  และ  $9$  ตามลำดับ โดย  $f/f_0$  เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 22.09, 21.04, 19.57, 18.32 และ 17.26 สำหรับ  $PR = 1, 3, 5, 7$  และ  $9$  ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยแม้จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงก็ตาม แต่สิ่งที่ตามมาคือ มีค่าความเสียดทานสูงด้วยเช่นกัน ดังนั้นเพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สมรรถนะเชิงความร้อนจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการตัดสินใจ โดยจะนำค่าการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานมาประเมินซึ่งใช้สมการที่ (6)

**สมรรถนะเชิงความร้อน**

จากผลการทดลองของการถ่ายเทความร้อนและความต้านทานการไหลแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นได้ ขณะเดียวกันก็มีค่าความเสียดทานสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงได้กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการประเมินถึงสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวย คือ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ( $TEF$ ) ดังแสดงในสมการที่ 6

Figure 10 แสดงความสัมพันธ์ของ  $TEF$  กับ  $Re$  จากการทดลองพบว่า ค่า  $TEF$  มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า  $Re$  การติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 1$  มีค่า  $TEF$  สูงสุดในกรณีทดสอบ โดยมีค่าเท่ากับ 1.35 ตามด้วย  $PR = 3, 5, 7$  และ  $9$  ตามลำดับ การติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 1$  มีค่า  $TEF$  สูงกว่า  $PR = 3, 5, 7$  และ  $9$  เท่ากับ 1.6%, 2.9%, 4.5% และ 5.8% ตามลำดับ

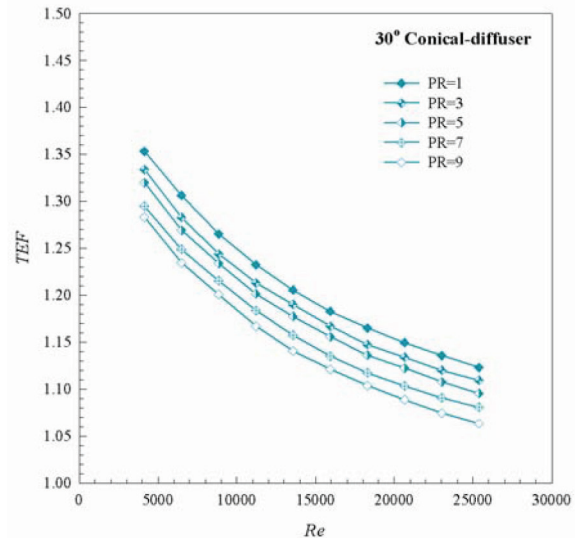


Figure 10 Variation of  $TEF$  with  $Re$

**สรุปผลการทดลอง**

การศึกษาเชิงทดลองเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยที่มีอากาศเป็นของไหลทดสอบในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน  $Re = 4190-25,800$  สามารถสรุปได้ดังนี้

การติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ โดยมีค่าสูงกว่าท่อผิวเรียบ 247%, 237%, 226%, 213% และ 203% สำหรับ  $PR = 1, 3, 5, 7$  และ  $9$  ตามลำดับ

การประเมินสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในพจน์ของ  $TEF$  ชี้ให้เห็นว่าการติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 1$  ให้ค่า  $TEF$  สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.35 และมีค่ามากกว่า  $PR = 3, 5, 7$  และ  $9$  เท่ากับ 1.6%, 2.9%, 4.5% และ 5.8% ตามลำดับ

การติดตั้งดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 1$  นอกจากจะให้ค่า  $Nu$  สูงสุดในกรณีทดสอบแล้ว ยังให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดด้วย ดังนั้น ดیفฟิวเซอร์ทรงกรวยที่  $PR = 1$  จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับกรณีทดสอบนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Ponnada, S. Subrahmanyam, T. Naidu, S.V. A comparative study on the thermal performance of water in a circular tube with twisted tapes, perforated twisted tapes and perforated twisted tapes with alternate axis, *International Journal of Thermal Sciences* 2019;136:530–538.
2. Abolarin, S.M. Everts, M. Meyer, J.P. Heat transfer and pressure drop characteristics of alternating clockwise and counter clockwise twisted tape inserts in the transitional flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2019;133:203–217.
3. Hong, Y. Du, J. Wang, S. Huang, S.M. Ye, W.B. Heat transfer and fluid flow behaviors in a tube with modified wire coils, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2018;124:1347–1360.
4. Hong, Y. Du, J. Wang, S. Ye, W.B. Huang, S.M. Turbulent thermal-hydraulic and thermodynamic characteristics in a traverse corrugated tube fitted with twin and triple wire coils, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2019;130:483–495.
5. Eiamsa-ard, S. Thianpong, C. Promvong, P. Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2006;33:1225–1233.
6. Bhuiya, M.M.K. Chowdhury, M.S.U. Saha, M. Islam, M.T. Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2013;46:49–57.
7. Bhuiya, M.M.K. Sayem, A.S.M. Islam, M. Chowdhury, M.S.U. Shahabuddin, M. Performance assessment in a heat exchanger tube fitted with double counter twisted tape inserts, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2014;50:25–33.
8. Promvong, P. Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators, *Energy Conversion and Management* 2008;49:2949–2955.
9. Promvong, P. Thermal performance in circular tube fitted with coiled square wires, *Energy Conversion and Management* 2008;49:980–987.
10. Keklikcioglu, O. Ozceyhan, V. Entropy generation analysis for a circular tube with equilateral triangle cross sectioned coiled-wire inserts, *Energy* 2017;139:65–75.
11. Incropera, F.P. DeWitt, P.D. Bergman, T.L. Lavine, A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John-Wiley & Sons, 2006.



## การศึกษาผลกระทบของการควบคุมอัตราการไหลของลมในระบบนิวเมติกในเครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบ

### The study to the effect of air flow rate controlling pneumatic system in a machine pouring raw milk into storage tanks

อดิศักดิ์ บุตรวงษ์<sup>1</sup>, วีระพล แก้วกา<sup>2</sup>, กวีพงษ์ หงษ์ทอง<sup>2</sup>, ธวัชชัย สีลาโส<sup>3</sup>, อภิชาติ ศรีชาติ<sup>1</sup>

Adisak Bootwong, Weeraphon Kaewka, Kaweepong Hongtong, Tawatchai Seelaso, Aphichat Srichat\*

Received: 10 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมอัตราการไหลของลมในระบบนิวเมติกที่ใช้บังคับการเทของเครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดปริมาณอัตราการไหลของลมและแรงดันที่เหมาะสมในการควบคุมของระบบนิวเมติกในเครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบ โดยไม่ทำให้เกิดการกระชากในขณะเทน้ำนมดิบออกจากถังเก็บและลดความสูญเสียขณะเทน้ำนมดิบในกระบวนการรวบรวมน้ำนมดิบ โดยใช้การควบคุมการทำงานโดยใช้ PLC ควบคุมระบบนิวเมติก ทำการทดลองด้วยการกำหนดให้น้ำในถังมีปริมาณ 40 ลิตร (ใช้น้ำแทนน้ำนมดิบโดยใช้น้ำหนักเท่ากับการทำงานจริง) และกำหนดแรงดันลมที่ 7 บาร์ การกำหนดเวลาที่ใช้ในการเทถึงนม 15 วินาที และควบคุมอัตราการไหลของลมที่ 25%, 50%, 75% และ 100% (โดยการปรับวาล์วควบคุม) จากการทดสอบพบว่าอัตราการไหลของลมในการควบคุมมีผลต่อปริมาณน้ำที่ได้ โดยเมื่อปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลของลมให้มีปริมาณอัตราการไหลของลมต่ำจะทำให้เครื่องสามารถเทน้ำออกได้มีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากไม่มีการกระชากจนน้ำในถังกระเด็นออกนอกภาชนะรองรับ และพบว่าเวลาที่ใช้ในการเทน้ำออกจนหมดถัง คือ 14 วินาที และการปรับวาล์วลมที่ 50% จะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำขณะเทน้อยที่สุดสำหรับเครื่องเทถึงน้ำนมดิบที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นการพัฒนาการเกษตรในกระบวนการแปรรูปน้ำนมดิบสู่ระบบอัตโนมัติต่อไป

**คำหลัก:** เครื่องเท น้ำนมดิบ ระบบอัตโนมัติ

#### Abstract

The objective of this research is to study the air flow rate control of a pneumatic system of a machine that is used in the automatic pouring of raw milk into a storage tank. The study was used to setup the amount of air flow rate and the pressure to control the pneumatic system in the raw milk storage tank machine in order to operate without surges and to reduce losses while pouring raw milk in the collection process. The pneumatic system used a PLC control system. The experiment used water instead of raw milk (they are the same weight) in the 40 L storage tank and set the air pressure of the pneumatic system at 7 bar. The time for pouring the milk into the storage tank was set at 15 seconds and the air flow rate was controlled at 25%, 50%, 75% and 100% (by adjusting position of the control valve). It was found that the air flow rate in the control system affects the water pouring that can be obtained. When the position of air flow rate control valve was adjusted to low level, the raw milk storage tank machine can pour out the water with high efficiency because the water in the tank has no surges and splashes. Then, it was found that the time of pouring water completely is 14 seconds and the air flow rate control valve set at 25% causes the least water loss for this machine. This is a development in the automation of the raw milk processing system.

**Keywords:** Pouring machine, Raw milk, Automatic system

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, <sup>2</sup> อาจารย์, <sup>3</sup> เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี 123 หมู่ 12 ต.สามพร้าว อ.เมือง จ.อุดรธานี 41000

\* Corresponding author.: Aphichat Srichat, Faculty of Technologi, Udon Thani Rajabhat University, Muang, Udonthani 41000, Thailand. saphichat@udru.ac.th.

## บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ข้อมูลจำนวนเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์และปศุสัตว์ในปี พ.ศ. 2560 จำนวน 2,810,317 ราย<sup>1</sup> มีจำนวนปริมานผู้เลี้ยงโคนมจำนวน 17,348 ราย จำนวนรวม 584,327 ตัว<sup>2</sup> ปัญหาหลักเกษตรกร คือ ไม่มีแรงงานในการฟาร์มเลี้ยงปศุสัตว์<sup>3</sup> การทำธุรกิจโคนมพบว่าวิธีการเก็บรักษาน้ำนม เริ่มต้นจากน้ำนมดิบจากเกษตรกรผู้เลี้ยงโคนม จะถูกบรรจุในภาชนะบรรจุน้ำนมดิบ จากนั้นจะจัดส่งไปยังศูนย์รวบรวมน้ำนมดิบ ซึ่งภาชนะบรรจุน้ำนมดิบ ต้องสะอาด ไม่มีกลิ่นอับหรือบูด มีผิวเรียบ ไม่มีรอยตะเข็บ ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำนมดิบ ภายหลังจากใช้งานทุกครั้งต้องทำความสะอาดทันที ปลอดภัยต่อการขนย้าย และต้องขนส่งไปยังศูนย์รวบรวมน้ำนมดิบ ภายในเวลาไม่เกิน 2 ชั่วโมง โดยศูนย์จะรวบรวมน้ำนมดิบจากเกษตรกรรายย่อย จะเทรวมกันในถังเก็บรวบรวมน้ำนมดิบ เพื่อส่งต่อไปยังโรงงานแปรรูปน้ำนมโดยใช้รถบรรทุกที่ควบคุมอุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส และควรขนส่งไปยังโรงงานแปรรูปน้ำนมภายในเวลา 24 ชั่วโมง<sup>4</sup> การขนส่งน้ำนมดิบมักจะนำไปเทรวมกันในศูนย์รวมน้ำนมดิบที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำแล้วส่งไปยังโรงงานแปรรูป<sup>5</sup> จากการศึกษาข้อมูลจากศูนย์รวมน้ำนมดิบพบว่า กระบวนการรวบรวมน้ำนมดิบในปัจจุบันใช้การลำเลียงถึงน้ำนมดิบที่รับมาจากสมาชิกภายในกลุ่มสหกรณ์โคนมต่างๆ ใช้แรงงานคนในยกถังนมวางบนสายพานลำเลียงหรือระบบรางเลื่อน โดยในแต่ละวันคนงานยกถังนมเฉลี่ยประมาณ 200 ถังต่อวัน น้ำหนักต่อถังเฉลี่ยโดยประมาณ 40 กิโลกรัม เพื่อลำเลียงถึงนมผ่านรางเลื่อน จากนั้นทำการเปิดฝาดังนมและนำไปยกเทใส่ลงในถังพักน้ำนมดิบ เพื่อรอเข้าสู่กระบวนการตรวจวัดคุณภาพและน้ำหนักของน้ำนมดิบต่อไป ในกระบวนการนี้เป็นการใช้แรงงานคนทั้งสิ้น ทำให้ต้องใช้แรงในการยกมากและกำลังการทำงานของคนลดลงตามปริมาณถึงน้ำนมดิบ ในศูนย์รวบรวมขนาดใหญ่มีการยกวางบนสายพานลำเลียงเพื่อนำถึงไปเท แต่ก็ต้องยกเทน้ำนมดิบออกจากถัง กลายเป็นปัญหาหลักในการรวบรวมน้ำนมดิบของศูนย์รวบรวม จากการศึกษาพบว่ายังไม่มีมีการนำอุปกรณ์เทถึงน้ำนมมาใช้ในกระบวนการรวมน้ำนมดิบ มีการพัฒนาเครื่องเทถึงน้ำนมดิบโดยใช้ระบบนิวเมติกควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ด้วย PLC<sup>6</sup> เพื่อนำมาแก้ปัญหากระบวนการดังกล่าว แต่ต้นแบบเครื่องเทถึงน้ำนมดิบนี้ยังไม่สามารถควบคุมการทำงานของระบบนิวเมติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ในช่วงการทำงานที่เครื่องเทถึงน้ำลงภาชนะรองรับเกิดการสูญเสีย ร้อยละของน้ำที่ได้ทดสอบที่ไม่สามารถเทลงภาชนะรองรับได้มีค่ามากทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องต่ำ เกิดความเสียหายในการเทน้ำนมดิบได้ จึงต้อง

พัฒนาวิธีการควบคุมระบบนิวเมติกเพื่อให้ประสิทธิภาพของการเทน้ำนมมีค่าสูงมากขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายในกระบวนการรวมน้ำนมดิบ

จากแนวคิดเรื่องการพัฒนาวิธีการควบคุมระบบ นิวเมติกเพื่อให้ประสิทธิภาพของการเทน้ำนมสูงขึ้น ทำให้คณะผู้วิจัยนำไปสู่การควบคุมอัตราการไหลของลมในระบบนิวเมติกที่ใช้ในการบังคับการเทของเครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติที่เหมาะสม เพื่อลดความสูญเสียน้ำนมดิบในขณะเทและทำให้เครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยการทำงานที่ค่าอัตราการไหลของลมที่ใช้เป็นตัวกำหนดการทำงานที่เหมาะสมของเครื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในขั้นตอนการรวบรวมน้ำนมดิบเพื่อขนส่งไปยังโรงงานแปรรูปน้ำนมดิบ เพื่อเป็นการลดการใช้แรงงานคนและลดต้นทุนในกระบวนการแปรรูปน้ำนมดิบอีกด้วย

## เครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติ

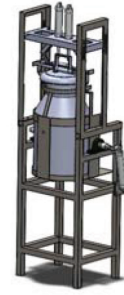
ปัจจุบันขั้นตอนในการเทถึงน้ำนมดิบในอุตสาหกรรมโคนมนั้น ใช้แรงงานคน 2 คนในการยกเทถึงน้ำนมดิบ ในแต่ละวันยกเทถึงนมเฉลี่ยประมาณ 200 ถังต่อวัน น้ำหนักต่อถังเฉลี่ยโดยประมาณ 40 กิโลกรัม โดยที่แรงงานคนจะทำการเปิดฝาดังนม จากนั้นยกเทถึงน้ำนมดิบลงในถังพักน้ำนมดิบและทำการปิดฝาดังเอง<sup>7</sup> ดังแสดงการทำงานได้ดัง Figure 1 การออกแบบเครื่องเทถึงน้ำนมดิบ ต้องสามารถปิดและเปิดฝาดังนมขนาด 40 ลิตร และเทน้ำนมดิบได้ ใช้ต้นกำลังด้วยระบบนิวเมติกในการปิดเปิดฝาดังและเทถึงน้ำนมดิบ โดยควบคุมด้วย PLC (Programmable Logic Control) ทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อมีการวางถึงน้ำนมดิบลงในตำแหน่ง ดังสามารถแสดงได้ใน Figure 2 น้ำหนักของถังนมรวมน้ำนมดิบมีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 40 กิโลกรัม/ถัง การทำงานของเครื่องใช้เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของถังเพื่อสั่งการทำงานตามลำดับขั้นตอนที่ได้เขียนโปรแกรมไว้



Figure 1 The pouring for raw milk storage tanks

ในการทดลองนี้จะทำการควบคุมการปรับ valve เพื่อควบคุมปริมาณอัตราการไหลของลมที่ไหลผ่าน solenoid

valve ของเครื่องเทน้ำนมดิบเป็น 4 ระดับ ตามที่ได้กำหนดไว้ การควบคุมอัตราการไหลของลมด้วยการปรับวาล์วลมที่ถึงลมเป็น 4 ระดับ คือ 25% (เปิดวาล์ว 1 ใน 4), 50% (เปิดวาล์วครึ่งหนึ่ง), 75% (เปิดวาล์ว 3 ใน 4) และ 100% (เปิดวาล์วสุด) โดยระบบควบคุมอัตโนมัติจะใช้ PLC (Programmable Logic Control) เป็นโปรแกรมในการควบคุม solenoid valve จะใช้ในการเปิด-ปิดช่องทางลมเพื่อให้ระบบนิวเมติกทำการเปิด-ปิดฝาถังและเทถังน้ำนมดิบตามลำดับขั้นตอนการทำงานแบบอัตโนมัติ ตามที่ได้เขียนโปรแกรมไว้ ขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งโปรแกรมควบคุมการทำงานนั้น จะเริ่มจากการเปิดสวิตช์ ON เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรการทำงานทั้งหมด หลอดไฟแสดงสถานะสีเขียวจะติด เมื่อต้องการเริ่มการทำงานให้กดปุ่ม RUN เพื่อเป็นคำสั่งให้เครื่องเริ่มทำงานซึ่งหลอดไฟแสดงสถานะสีเขียวจะกระพริบ หลังจากนั้นยกถังเก็บน้ำนมดิบวางในตำแหน่งที่เก็บถังของเครื่องเท ฯ เช่นเซอร์ตรวจจับโลหะที่ติดตั้งไว้ตรวจพบว่ามีถังน้ำนมดิบวางในตำแหน่งพร้อมทำงานแล้ว หลอดไฟแสดงสถานะสีเขียวจะติดค้าง ระบบจะหน่วงเวลา 2 วินาที ก่อนที่จะเริ่มต้นการทำงาน จากนั้นจะสั่งเปิดการทำงานของ solenoid valve ของชุดกลไกเปิด-ปิดฝาถังให้ชุดกระบอกลมทำงานเทเอียงถังเก็บน้ำนมดิบลงมายังตำแหน่งเปิดฝาถังและหน่วงเวลา 1 วินาที หลังจากนั้นจะสั่งเปิด solenoid valve ของชุดลิ้นชักฝาถัง ฝาถังจะถูกล็อกแน่นโดยหน่วงเวลา 0.5 วินาที และสั่งเปิด solenoid valve ของชุดกลไกเปิด-ปิดฝาถังให้ทำการเปิดฝาถังออกและหน่วงเวลา 5 วินาที เพื่อให้ตรวจดูภายในถังน้ำนมดิบว่าไม่มีสิ่งผิดปกติ หลังจากนั้นจะสั่ง solenoid valve ของชุดเทถังน้ำนมดิบให้ทำงานและหน่วงเวลา 10 วินาที เพื่อเทน้ำนมดิบจนหมดถัง จากนั้นจะสั่งให้ solenoid valve ของชุดเทถังน้ำนมดิบกลับมายังตำแหน่งเดิมและหน่วงเวลา 5 วินาที และสั่งให้ solenoid valve ของชุดกลไกเปิด-ปิดฝาถังทำการปิดฝาถังลงยังตำแหน่งเดิมและหน่วงเวลา 0.5 วินาที และ solenoid valve ของชุดลิ้นชักฝาถัง ปลดปล่อยฝาถังออกและหน่วงเวลา 0.5 วินาที หลังจากนั้นจะสั่ง solenoid valve ชุดกลไกเปิด-ปิดฝาถังขึ้นไปยังตำแหน่งเดิมและหน่วงเวลา 0.5 วินาที เป็นการจบการทำงาน หลอดไฟแสดงสถานะสีเขียวจะกระพริบ ทำการนำถังนมเปล่าออกจากเครื่องและสามารถยกน้ำถังน้ำนมดิบใหม่วางในตำแหน่งทำงาน โดยไม่ต้องกดปุ่ม RUN อีก ระบบจะตรวจจับถังน้ำนมดิบได้เองจากเซ็นเซอร์ตรวจจับโลหะ เมื่อมีการผิดพลาดของระบบกลไก สามารถที่จะกดปุ่ม STOP เพื่อที่จะหยุดการทำงานทั้งหมดของระบบการทำงานได้ทันที



**Figure 2** The model of pouring raw milk storage tank machine

## การทดลองและวิธีการทดลอง

### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องเทถังเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติโดยใช้การควบคุมการทำงานโดยใช้ PLC (Programmable Logic Control) การเขียนโปรแกรมในการควบคุม Solenoid Valve ให้เปิด-ปิดลมเพื่อให้ระบบนิวเมติกทำงานด้วยการเปิด-ปิดฝาถังและเทถังน้ำนมดิบตามลำดับขั้นตอนการทำงานโดยอัตโนมัติ แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องเทถังเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติสามารถแสดงได้ดัง Figure 3 ทั้งนี้จะทำการควบคุมอัตราการไหลของลมที่ใช้ในการส่งจ่ายให้อุปกรณ์ทำงานด้วยระบบนิวเมติกของเครื่องให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้เพื่อศึกษาถึงการปรับตั้งอัตราการไหลของลมที่เหมาะสมต่อการทำงานของเครื่องนี้ เครื่องเทถังเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังนี้ 1) โครงสร้างหลักเครื่องเทน้ำนมดิบ เป็นจุดเชื่อมต่อโครงสร้างชุดบนและกลไกชุดเทถังน้ำนมดิบ เข้าด้วยกัน ใช้เหล็กกล่องขนาด 1"-1/2x1"-1/2 ความหนา 3 mm. เป็นวัสดุหลัก, 2) โครงสร้างชุดบนเชื่อมต่อจากโครงสร้างหลักด้วยน็อตขนาด 1/2"x3" จำนวนข้างละ 3 ตัว ใช้เหล็กฉากขนาด 40 mmx40 mm ความหนา 4 mm เจาะช่องสลอตเพื่อเป็นจุดยึดกับชุดกลไกเปิด-ปิดฝาถังนม, 3) กลไกชุดเทถังนม ใช้เหล็กแผ่นความหนา 3 mm เป็นโครงสร้างวางถังนม เชื่อมต่อกับเพลลาขนาด 28 mm ใส่กับตลับลูกปืน NTN เบอร์ P306 ยึดด้วยน็อต 1/2"x2" กับโครงสร้างหลัก ใช้แผ่นเหล็กความหนา 12 mm เป็นฐานยึดกระบอกลม โดยกระบอกลมขนาด 40 mmx150 mm ปลายกระบอกลมต่อกับจุดเชื่อมโยงไปยังเพลลาเพื่อหมุนเพลลาให้เทถังนมได้ใน 130 องศา ซึ่งเป็นมุมที่เทน้ำนมดิบออกจนหมดถัง, 4) กลไกชุดเปิดปิดฝาถังนม ใช้เหล็กฉากขนาด 25 mmX25 mm ความหนา 3 mm เป็นโครงสร้างในการเชื่อมต่อกับโครงสร้างชุดบน ยึดด้วยน็อต M10x30 ในช่องสลอตของโครงสร้างชุดบน เจาะรูขนาด 30 mm เพื่อยึดกระบอกลมขนาด 40 mmX100 mm สองกระบอก ในส่วนของจุดเชื่อมโยงกลไกเปิดปิดฝาถังนมใช้เหล็กแบนขนาด 1"

ความหนา 6 mm, 5) กลไกชุดล็อกฝาถังนม ใช้เหล็กแบนขนาด 1" ความหนา 6 mm เป็นโครงสร้างยึดกับกลไกชุดเปิดปิดฝาถัง และยึดกระบอบกลมขนาด 25 mmX50 mm จำนวน 2 กระบอบ ปลายกระบอบกลมเชื่อมต่อกับชุดมือล็อกฝาถัง และ 6) อุปกรณ์ระบบควบคุมการทำงาน ใช้บอร์ด PLC FX1S-22MRT ในการโปรแกรมระบบควบคุมการทำงาน โดยมีแหล่งจ่ายไฟจาก Switching Power Supply 24VDC เพื่อเป็นไฟเลี้ยงอุปกรณ์ภายในตู้คอนโทรล เช่น บอร์ด PLC FX1S-22MRT, Solenoid Valve , เซ็นเซอร์ตรวจจับโลหะ, และหลอดไฟแสดงสถานะหน้าตู้ควบคุมไฟฟ้า ดังแสดงใน Figure 4

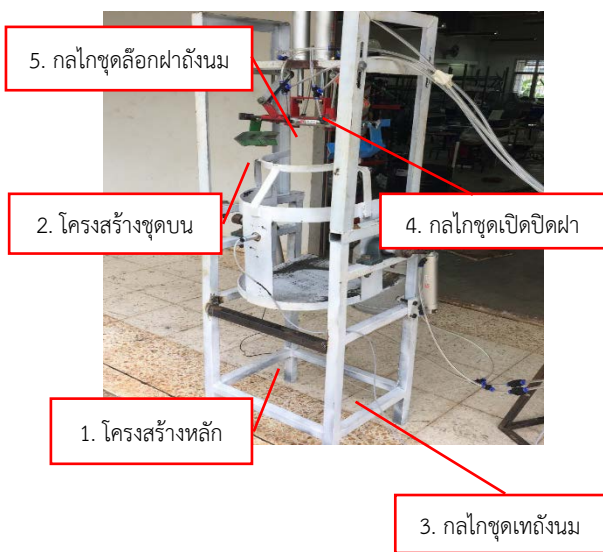


Figure 3 Raw milk tank pouring machine components

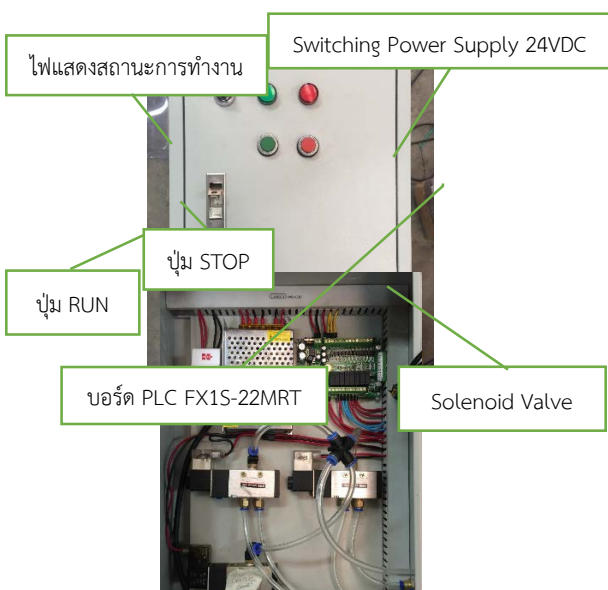


Figure 4 Control system equipment

### วิธีการทำการทดลอง

การทดสอบเครื่องเทถังเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติจะใช้น้ำเปล่าแทนน้ำนมดิบ (เนื่องจากการทดสอบเน้นให้คล้ายกับการเทน้ำนมที่สนใจในส่วนของน้ำหนักของน้ำนมในถัง จึงไม่ได้พิจารณาคุณสมบัติอย่างอื่นของน้ำนมดิบร่วมในการทดลอง) ทำการทดลองเครื่องเทถังน้ำนมดิบด้วยระบบอัตโนมัติด้วยการปรับตั้ง valve ลมที่ใช้จ่ายลมให้เครื่องเท ฯ เป็น 4 ระดับ คือ 25%, 50%, 75% และ 100% และชั่งน้ำหนักของน้ำที่สามารถเทออกได้ นำมาวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพการเทของเครื่อง ฯ โดยกำหนดให้ถังนมบรรจุน้ำแทนน้ำนมดิบในปริมาณ 40 ลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงสำหรับการบรรจุน้ำนมดิบลงในถังนมจริง และกำหนดแรงดันลมที่ 7 บาร์ ทดสอบโดย ไม่ให้น้ำในถังเกิดการกระเพื่อมและสูญเสียปริมาณน้ำที่ได้ ในส่วนของระบบควบคุมการทำงานจะหน่วงเวลาในช่วงการเทถังนม โดยเริ่มจาก 5 วินาที ไปจนถึง 15 วินาที เพื่อทดลองหาปริมาณอัตราการจ่ายลมที่เหมาะสมไม่ให้มีปริมาณน้ำที่ตกค้างภายในถัง โดยทดสอบจำนวน 5 รอย แล้วหาค่าเฉลี่ยของการทำงาน บันทึกผลการทดลอง

### ผลการทดลอง

จากการทดสอบเครื่องเทถังเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติสามารถแสดงค่าเฉลี่ยการทดสอบปริมาณน้ำที่เทได้และร้อยละของน้ำที่เทได้ของเครื่องเทถังเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติ ที่ระดับการเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลของลม 25%, 50%, 75% และ 100% โดยกำหนดแรงดันลมที่ 7 บาร์ ได้ดัง Table 1 พบว่าเมื่อระยะเวลาในเทเพิ่มขึ้นปริมาณการเทก็เพิ่มสูงขึ้น และที่เวลา 5 วินาที การปรับตั้งวาล์วลมที่ 75% ปริมาณการเทน้ำได้จะมีค่ามากที่สุด คือ 18.57 ลิตร แต่เมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 15 วินาที พบว่าการปรับตั้งวาล์วลมที่ 50% ปริมาณการเทน้ำได้จะมีค่ามากที่สุด คือ 39.65 ลิตร ซึ่งทำให้น้ำเหลือค้างในถังน้อยที่สุด คือเป็นร้อยละของน้ำที่เทได้เท่ากับ 99.13 และในขณะที่ไม่มีน้ำกระเด็นออกนอกภาชนะรองรับมาก นั้นเกิดจากแรงดันของลมที่ส่งจ่ายให้อุปกรณ์ทำงานหรือกระบอบกลมลดลงครั้งหนึ่งจากเดิมที่ทำการทดสอบด้วยเกิดเปิดวาล์วลมเต็มที่ จากการทดลองถ้าปรับวาล์วลมที่ 25% จะทำให้แรงดันที่กระทำกับอุปกรณ์ลดลงแต่กลับพบว่าการเทน้ำออกมากถึงได้ไม่หมดมีน้ำค้างถึงอยู่บางส่วน นั่นคือ ถ้าแรงดันต่ำเกินไปก็จะทำให้ไม่สามารถเทน้ำออกได้ทั้งหมด และพบว่าการเปิดวาล์วลมที่ 50% จะทำให้ประสิทธิภาพการเทน้ำนมได้ดีที่สุด

จากการทดลองสามารถแสดงค่าปริมาณน้ำที่ตกค้างในถังและปริมาณน้ำที่สูญเสียไม่ตกลงบนภาชนะของเครื่องเท

ถึงเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติ ที่ระดับการเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลของลม 25%, 50%, 75% และ 100% โดยกำหนดแรงดันลมที่ 7 บาร์ ได้ตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยสามารถนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับการไหลที่ได้ดัง Figure 5 – 7 เพื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ได้กำหนดไว้ จาก Figure 5 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดเวลาในการควบคุมและการปรับความเร็วลมมีผลต่อปริมาณน้ำที่ได้เมื่อใช้เวลามากจะส่งผลให้ได้ปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้เวลาน้อยจะส่งผลให้ได้ปริมาณน้ำที่ลดน้อยลง จะเห็นได้ว่าปรับวาล์วความเร็วลมเปิดที่ 50% เหมาะสมที่สุดเนื่องจากปริมาณน้ำที่ได้จะมากที่สุดในช่วงเวลาตั้งแต่ 14

วินาที เป็นต้นไป จาก Figure 6 พบว่าการกำหนดเวลาในการควบคุมและการอัตราการไหลของลมมีผลต่อปริมาณน้ำตักค้างภายในถัง เมื่อเวลามากจะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ตักค้างภายในถังลดลงจนหมด และในการวาล์วลมเปิดมากหรืออัตราการไหลของลมมากจะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ตักค้างภายในถังจะหมดเร็วกว่าวาล์วที่เปิดน้อยหรืออัตราการไหลของลมน้อย และจาก Figure 7 แสดงให้เห็นว่าการปรับความเร็วลมมีผลต่อปริมาณน้ำที่สูญเสีย เมื่อปรับความเร็วลมวาล์วเปิดมากหรืออัตราการไหลของลมมากจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำมากกว่าวาล์วที่เปิดน้อยซึ่งเกิดจากกระบอกลมทำงานได้อย่างเหมาะสม ทำให้น้ำไม่เกิดการกระเด็นออกนอกภาชนะที่รองรับ

**Table 1** The average water pouring of clearing for the raw milk storage tank at the opening the valve controlling for the flow rate of air 25%, 50%, 75% and 100% at the air pressure 7 bar (simulated by pouring water)

Time (Second)	The amount of water inside the Tank (Liter)	The amount of water that can be poured (Liter)				Percentage of the amount of water that can be poured (%)			
		25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
5	40	8.73	12.73	18.57	8.20	21.83	31.83	46.43	20.50
6	40	10.70	14.50	23.10	10.10	26.75	36.25	57.75	25.25
7	40	18.43	19.34	27.50	12.50	46.08	48.35	68.75	31.25
8	40	25.97	25.97	28.93	12.90	64.93	64.93	72.33	32.25
9	40	30.27	35.27	29.90	14.25	75.68	88.18	74.75	35.63
10	40	33.03	38.03	30.27	18.50	82.58	95.08	75.68	46.25
11	40	38.07	38.54	32.57	22.00	95.18	96.35	81.43	55.00
12	40	38.67	38.67	29.14	25.53	96.68	96.68	72.85	63.83
13	40	38.77	38.03	30.63	25.87	96.93	95.08	76.58	64.68
14	40	39.07	<u>39.57</u>	29.43	26.40	97.68	<u>98.93</u>	73.58	66.00
15	40	<u>39.17</u>	39.65	27.5	26.75	97.93	99.13	68.75	66.88

**Table 2** The average water pouring of remaining in the tank for the raw milk storage tank at the opening the valve controlling for the flow rate of air 25%, 50%, 75% and 100% at the air pressure 7 bar (simulated by pouring water)

Time (Second)	The amount of water inside the Tank (Liter)	The amount of water left in the tank (Liter)				Percentage of the amount of water left in the tank (%)			
		25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
5	40	30.97	26.95	4.36	9.45	77.43	67.38	10.90	23.63
6	40	28.90	25.10	1.00	5.40	72.25	62.75	2.50	13.50
7	40	21.18	20.22	0.20	2.84	52.95	50.55	0.50	7.10
8	40	13.56	13.56	0.12	0.77	33.90	33.90	0.30	1.93
9	40	9.18	4.28	0.10	0.37	22.95	10.70	0.25	0.93
10	40	6.12	1.62	0.50	0.00	15.30	4.05	1.25	0.00
11	40	0.85	1.04	0.20	0.00	2.13	2.60	0.50	0.00
12	40	0.43	0.95	0.00	0.00	1.08	2.38	0.00	0.00
13	40	0.33	1.57	0.00	0.00	0.83	3.93	0.00	0.00
14	40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Table 3** The average amount of wasted water falling on the container for the raw milk storage tank at the opening the valve controlling for the flow rate of air 25%, 50%, 75% and 100% at the air pressure 7 bar (simulated by pouring water)

Time (Second)	The amount of water inside the Tank (Liter)	The amount of water lost doesn't fall on the container (Liter)				Percentage of the amount of water lost doesn't fall on the container (%)			
		25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
5	40	0.30	0.32	17.07	22.35	0.75	0.80	42.68	55.88
6	40	0.40	0.40	15.90	24.50	1.00	1.00	39.75	61.25
7	40	0.39	0.44	12.30	24.66	0.98	1.10	30.75	61.65
8	40	0.47	0.47	10.95	26.33	1.18	1.18	27.38	65.83
9	40	0.55	0.45	10.00	25.38	1.38	1.13	25.00	63.45
10	40	0.85	0.35	9.23	21.50	2.13	0.88	23.08	53.75
11	40	1.08	0.42	7.23	18.00	2.70	1.05	18.08	45.00
12	40	0.90	0.38	10.86	14.47	2.25	0.95	27.15	36.18
13	40	0.90	0.40	9.37	14.13	2.25	1.00	23.43	35.33
14	40	0.93	0.43	10.57	13.60	2.33	1.08	26.43	34.00
15	40	0.83	0.35	12.50	13.25	2.08	0.88	31.25	33.13

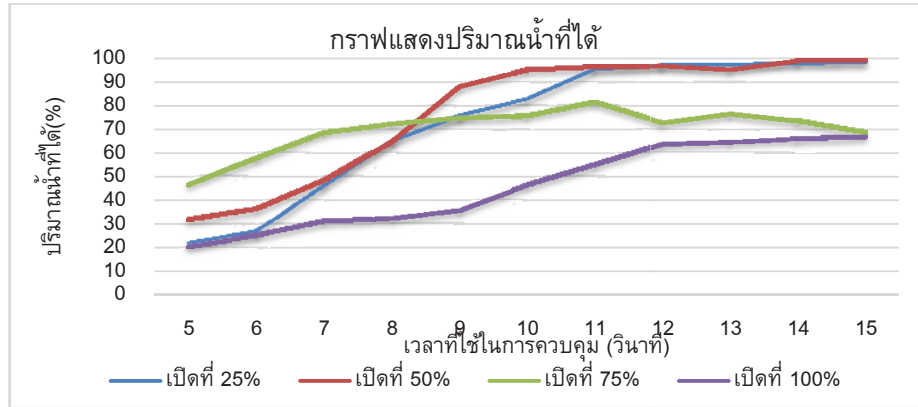


Figure 5 The percentage of the water pouring of clearing for the raw milk storage tank

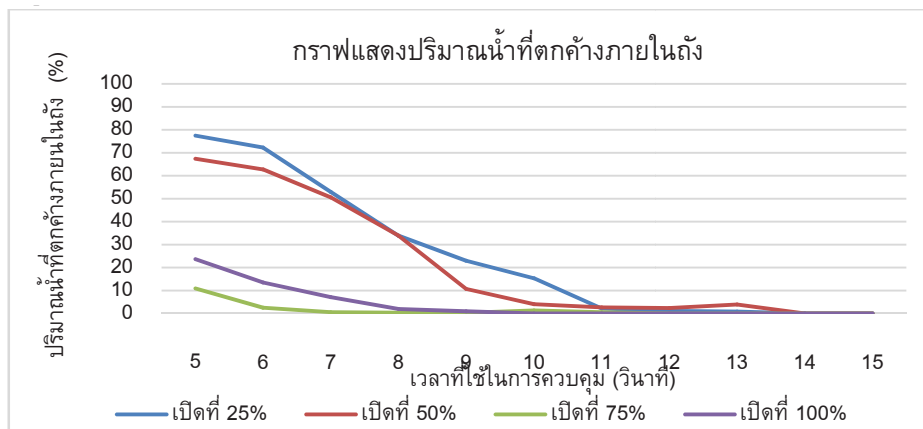


Figure 6 The percentage of the water pouring of remaining in the tank for the raw milk storage tank

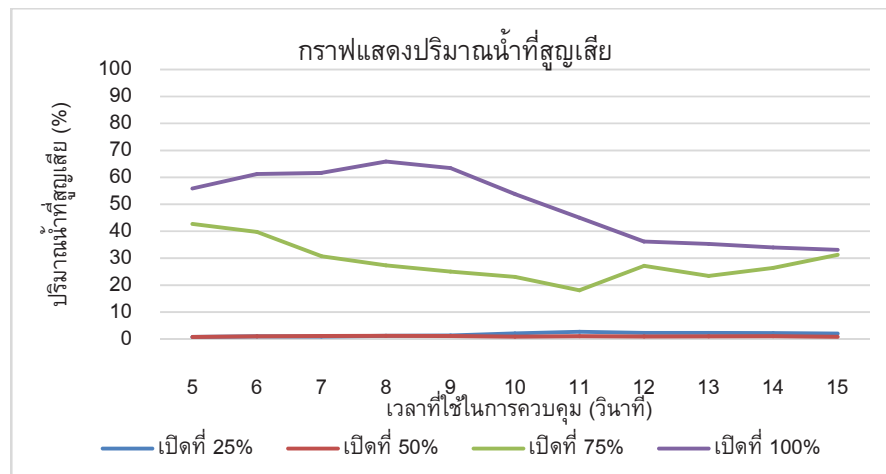


Figure 7 The percentage of the wasted water falling on the container for the raw milk storage tank

**สรุปผลการทดลอง**

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมอัตราการไหลของลมในระบบนิวเมติกที่ใช้บังคับการเทของเครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดปริมาณอัตราการไหลของลมและแรงดันที่เหมาะสมในการควบคุมของระบบนิวเมติกในเครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบ โดยไม่ทำให้เกิดสูญ

เสียของน้ำนมดิบในขณะที่เทน้ำนมดิบออกจากถังเก็บในกระบวนการรวบรวมน้ำนมดิบ การควบคุมการทำงานของระบบใช้ PLC ควบคุมระบบนิวเมติก เครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบเป็นเครื่องที่พัฒนาไว้แล้ว ทำการทดลองด้วยการกำหนดให้น้ำในถังมีปริมาณ 40 ลิตร (ใช้น้ำแทนน้ำนมดิบโดยใช้น้ำหนักเท่ากับการทำงานจริง) และกำหนดแรงดันลมที่ 7 บาร์

การกำหนดเวลาที่ใช้ในการเทถึงนม 15 วินาที และควบคุม อัตราการไหลของนมที่ 25%, 50%, 75% และ 100% (โดยการปรับวาล์วควบคุม) จากการทดสอบพบว่าอัตราการไหลของนมในการควบคุมมีผลต่อปริมาณน้ำที่ได้ โดยเมื่อปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลของนมให้มีปริมาณอัตราการไหลของนมต่ำจะทำให้เครื่องสามารถเทน้ำออกได้มีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากไม่มีการกระซากจนน้ำในถังกระเด็นออกนอกภาชนะรองรับ และพบว่าเวลาที่ใช้ในการเทน้ำออกจนหมดถัง คือ 14 วินาที และการปรับวาล์วลมที่ 50% จะทำให้เกิดการสูญเสีย น้ำขณะเทน้อยที่สุดสำหรับเครื่องเทน้ำนมดิบที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นการพัฒนาการเกษตรในกระบวนการแปรรูปน้ำนมดิบสู่ระบบอัตโนมัติ สามารถลดการใช้แรงงานคนและลดต้นทุนในกระบวนการแปรรูปน้ำนมดิบลงได้อีกด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา และ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานีที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดในการทำวิจัย ขอขอบคุณนักศึกษาที่ช่วยในการสร้างเครื่องเทน้ำนมดิบและทำการทดลองจนแล้วเสร็จจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

1. กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ (2560). ข้อมูลจำนวนปศุสัตว์ในประเทศไทย ปี 2560, ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, หน้า 8.
2. กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ (2560). จำนวนเกษตรกรและโคนม รายจังหวัด ปี 2560, ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, [ระบบออนไลน์], สืบค้นจาก [http://ict.dld.go.th/th2/images/stories/stat\\_web/monthly/2560/T3-1.pdf](http://ict.dld.go.th/th2/images/stories/stat_web/monthly/2560/T3-1.pdf), สืบค้นเมื่อวันที่ 6/11/2561.
3. ปศุศาสตร์ นัวร์ (2560). เรื่องอาหารสำเร็จรูปและ ผสมเอง อย่างไหนตอบใจทย์ชาวปศุสัตว์, [ระบบออนไลน์], สืบค้นจาก <http://www.pasusart.com>, สืบค้นเมื่อวันที่ 7/11/2561.
4. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ (2561). การเก็บรักษาน้ำนม, ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร บริษัท ฟู้ด เน็ตเวิร์ค โซลูชั่น จำกัด, [ระบบออนไลน์], สืบค้นจาก <http://www.foodnetworksolution.com>, สืบค้นเมื่อวันที่ 7/11/2561.
5. สุณีรัตน์ เอี่ยมละมัย, อดุลย์ วังตาล และจุไรรัตน์ ถนอมกิจ (2556). มาตรฐานความปลอดภัยอาหารตลอดห่วงโซ่การผลิตเพื่อสนับสนุนการขับเคลื่อนยุทธศาสตร์ความปลอดภัยอาหาร : นำนม, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) หน้า 12 – 19.
6. ชีรศักดิ์ พงศ์คำ, ผศ.อดิศักดิ์ บุตรวงษ์, ธวัชชัย สีลาโส และ ผศ.ดร.อภิชาติ ศรีชาติ. การพัฒนาเครื่องเทถึงเก็บน้ำนมดิบอัตโนมัติ. การประชุมวิชาการการประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 5 ณ โรงแรมเจริญธานี อำเภอเมืองจังหวัดขอนแก่น, 14 ธันวาคม 2561 หน้า 201 – 207.
7. สหกรณ์โคนมวังน้ำเย็น (2560). รูปแบบการเทถึงน้ำนมดิบในปัจจุบัน. ระบบออนไลน์, สืบค้นจาก <https://www.bloggang.com/data/f/foremostdairy/picture/1315549864.jpg>, สืบค้นเมื่อเมื่อวันที่ 7/11/2561.



# การวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วลมในเขตพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์

## Wind Speed Data Analysis in Kalasin Province, Thailand

พนิดา สุขสมพร้อม<sup>1</sup>, เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต<sup>2</sup>, สุภชัย พลน้ำเที่ยง<sup>3</sup>

Panida Suksomprom<sup>1</sup>, Kiatfa Tangchaichit<sup>2</sup>, Supachai Polnumtiang<sup>3</sup>

Received: 10 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศักยภาพความเร็วลมเฉพาะเขตพื้นที่บริเวณสถานีวัดความเร็วลมภายในจังหวัดกาฬสินธุ์ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนของประเทศไทย โดยเสาวัดลมแบบโครงถักมีความสูง 120 เมตรเหนือพื้นดิน (AGL) และติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วลม (Anemometer) และทิศทางลม (Wind Vane) ที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตร ทำการบันทึกข้อมูลลมทุก ๆ 10 นาทีที่กล่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) เป็นระยะเวลา 5 ปีติดต่อกัน เริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึง เดือนธันวาคม 2559 ข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติโดยใช้การกระจายตัวแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution Function) เป็นรายปี รายเดือน และรายวัน ผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปี คือ 3.12, 3.62 และ 3.93 เมตรต่อวินาที กำลังลม (Power Density,  $W/m^2$ ) มีค่าตั้งแต่ 37, 56 และ 72 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดินตามลำดับ ทิศทางการกระจายลมส่วนใหญ่จากทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือไปยังทิศใต้ ในช่วงเวลากลางคืนความเร็วลมจะสูงกว่าในช่วงเวลากลางวัน และมีค่า shape (k), scale parameter (c) เฉลี่ยที่ตำแหน่งนี้มีค่าอยู่ในช่วง 2.00 ถึง 2.05 และ 3.60 ถึง 4.50 เมตรต่อวินาที จากการวิเคราะห์ข้อมูลลมที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ถือได้ว่าความเร็วลมมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นกังหันลมขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับแหล่งพลังงานทางเลือก เพื่อลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานและมลพิษต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ:** พลังงานลม ศักยภาพลม ความเร็วลม จังหวัดกาฬสินธุ์ ไวบูลล์ฟังก์ชัน

### Abstract

The objective of this research was to study wind speed data at Kalasin province in the upper northeast of Thailand. Wind speed and direction at 60, 90 and 120 meter height above ground level (AGL) on a 120 m Guy Mast triangle tower, were recorded and analyzed for the 5-year period from January 2012 until December 2016. The Weibull Distribution Function was used to analyze data yearly, monthly, and by daily periods. The wind speeds were found to be 3.12, 3.62 and 3.93 m/s and Power Density in this area was 37, 56, 72  $W/m^2$  at 60, 90 and 120 meter height AGL respectively. The wind direction was mostly from between northeast to south and had shape (k) and scale parameter (c) mean values between 2.00 to 2.05 and 3.60 to 4.50 m/s. sares

**Keywords:** Wind Energy, Wind Potential, Wind Speed, Kalasin Province, Weibull Function

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาโท, <sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, <sup>3</sup> นักศึกษาปริญญาเอก, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002, ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยขอนแก่น (AERD-KKU)

<sup>1</sup> Masters student, <sup>2</sup> Assistant Professor, <sup>3</sup> PhD student, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang District, Khon Kaen, 40002, Thailand.

\* Corresponding author; Assistant Professor Dr.Kiatfa Tangchaichit, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang District, Khon Kaen, 40002, Thailand., Center for Alternative Energy Research and Development, Khon Kean University (AERD-KKU). kiatfa@kkumail.com

## บทนำ

พลังงานถือได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญที่ทุกประเทศทั่วโลกให้ความสนใจและเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อน เศรษฐกิจ เป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำเนินชีวิตของประชาชน เนื่องจากความต้องการทางด้านพลังงานมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นในทุกปี ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนางานวิจัยด้านพลังงานทางเลือกอื่น ๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล หรือแม้แต่พลังงานลมที่หาได้ในประเทศไทย<sup>1</sup> เป็นต้น เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานให้ประเทศมีพลังงานใช้อย่างเพียงพอและมีประสิทธิภาพ

พลังงานลมถือเป็นพลังงานทางเลือกรูปแบบหนึ่ง เป็นพลังงานหมุนเวียนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ สะอาด ใช้น้ำแล้วไม่หมดไป ไม่สร้างมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้พลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกมาทดแทนพลังงานที่ใช้ในปัจจุบัน เพื่อลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ นับว่าทางเลือกที่ดี เนื่องจากพลังงานลมใช้ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง เป็นพลังงานที่ไม่ได้เกิดขึ้นสม่ำเสมอตลอดทั้งปี เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษา เก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา นานอย่างน้อย 1 ปีขึ้นไป<sup>2</sup> เพื่อที่จะได้ผลการประเมินที่ถูกต้องแม่นยำ ใกล้เคียงกับศักยภาพพลังงานลมที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ เพื่อประโยชน์และความคุ้มค่าในการลงทุน หากผลการประเมินศักยภาพพลังงานลมในพื้นที่มีศักยภาพที่จะผลิตไฟฟ้าได้ก็จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างสูง ในการติดตั้งฟาร์มกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้านั้นต้องมีการประเมินศักยภาพพลังงานลมก่อน ดังเช่น ในประเทศจีน<sup>3</sup> สหรัฐอเมริกา<sup>4</sup> เยอรมัน<sup>5</sup> และอินเดีย<sup>6</sup> เป็นต้น สำหรับประเทศไทยได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมในช่วง 10 กว่าปีที่ผ่านมาจากหน่วยงานต่างๆ โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา การจัดทำแผนที่พลังงานลม และการศึกษาเพื่อประเมินศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง<sup>7-10</sup> และในปัจจุบันกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังลมของประเทศไทยอยู่ที่ 627.82 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ.2560<sup>11</sup> และรัฐบาลได้ทำการตั้งเป้าหมายให้ได้ 3,002 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ.2036<sup>12</sup> ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอส่วนหนึ่งของผลการศึกษาพื้นที่ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนของประเทศไทยซึ่งเป็นพื้นที่ราบสูงและมีความเป็นไปได้ในการศึกษาวิจัยเฉพาะแหล่ง “การวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วลมในเขตพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์” โดยได้นำเสนอผลการศึกษาความเร็วลมเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 5 ปี เป็นรายปี รายเดือนและรายวัน และทิศทางการกระจายลมส่วนใหญ่ เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานลม และเพื่อ

เป็นฐานข้อมูลประกอบการตัดสินใจที่จะพัฒนาการติดตั้งฟาร์มกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไปในอนาคต

## วัตถุประสงค์

เพื่อประเมินศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่งในเขตพื้นที่โรงเรียนบ้านคำบอน ตำบลยางอู่ม อำเภอท่าคันโท จังหวัดกาฬสินธุ์ และเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการลงทุนติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

**ความเร็วลมเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน** ที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตร หาได้จากสมการที่ (1) และ (2)

$$V_m = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n V_i \right] \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2 \quad (2)$$

เมื่อ  $V_m$  คือ ความเร็วเฉลี่ย  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด  
 $\sigma$  คือ ค่าของ Standard Deviation (SD)

## สัมประสิทธิ์แรงเฉือนของลม (Wind Shear Coefficient (WSC), $\alpha$ )

หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตำแหน่งวัดลมและความเร็วลมที่วัดได้จากสมการที่ (3)

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha \quad (3)$$

เมื่อ  $h$  คือ ระดับความสูง

## การวิเคราะห์การกระจายตัวของความเร็วลม ไวบูลล์ฟังก์ชัน (Weibull Distribution Function)

ไวบูลล์ฟังก์ชันประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ตัว คือ Shape Parameter ( $k$ ) และ Scale Parameter ( $c$ ) การหาค่า  $k$ ,  $c$  และการแจกแจงความถี่สะสม (Cumulative distribution,  $F(v)$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ (4-8) ค่าพารามิเตอร์รูปร่าง  $k$  มีความสัมพันธ์กับทิศทางและความเร็วลมของลม ถ้า  $k$  มีค่าต่ำแสดงว่ามีความเร็วลมต่ำ และ

พารามิเตอร์ระดับ c สัมพันธ์กับอัตราเร็วลมเฉลี่ยถ้าความเร็วลมเฉลี่ยมีค่าสูง c ค่าจะสูงตามไปด้วย

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m}\right)^{-1.086} \quad (5)$$

$$c = \frac{V_m}{\Gamma(1+1/k)} \quad (6)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (7)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (8)$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือ Gamma Function  
 $k$  คือ พารามิเตอร์รูปร่างของไวบูลล์  
 $c$  คือ พารามิเตอร์ระดับของไวบูลล์  
 $v$  คือ ความเร็วของลม (เมตรต่อวินาที)  
**ความหนาแน่นของกำลังลม (Wind Power Density (WPD), W/m<sup>2</sup>)**

เป็นปริมาณต่อพื้นที่หน้าตัด กำลังลมจะแปรผันกำลังสามกับความเร็วลม สิ่งที่มีผลต่อความเร็วลมคือ ความเร็ว (V) และความหนาแน่นของอากาศ ( $\rho_{Air}$ ) ดังสมการที่ (9)

$$WPD = \frac{1}{2} \rho_{Air} V^3 \quad (9)$$

**วิธีการดำเนินงานวิจัย**

เสาวัดลมแบบโครงถักสามเหลี่ยมความสูง 120 เมตร ติดตั้งที่บริเวณจังหวัดกาฬสินธุ์ที่ ละติจูด (Deg) 16.900 °N ลองจิจูด (Deg) 103.329 °E และติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วแบบถ้วย (Anemometer) และทิศทางลม (Wind Vane) ที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดินตามลำดับดังใน Figure 1-2 และ Table 1 ข้อมูลลมทุก ๆ 10 นาทีจะถูกส่งมายังกล่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) เป็นระยะเวลา 5 ปีติดต่อกัน เริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึง เดือนธันวาคม 2559 ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ในทางสถิติ ค่าเฉลี่ยรายปี รายเดือน และ รายวัน รวมทั้งการกระจายตัวของข้อมูลแบบไวบูลล์<sup>13-15</sup> เพื่อหาค่า Shape และ Scale Parameter ในแต่ละระดับความสูงที่ต่างกันเหนือพื้นดิน การ์ดบันทึกข้อมูลของกล่องบันทึกข้อมูล บันทึกลงสู่คอมพิวเตอร์ ข้อมูลลมที่ได้จากกล่องบันทึกข้อมูลจะเป็นนามสกุล .RWD ด้วยความถี่ 1 วันต่อ 1 ไฟล์ และ จากนั้นจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแปลงไฟล์เป็นไฟล์ นามสกุล .TXT จากนั้นจะนำไปจัดเรียงในโปรแกรม Microsoft Excel และทำการวิเคราะห์ต่อไป

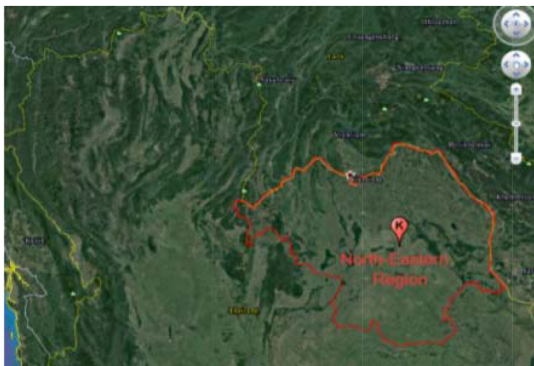


Figure 1 Wine measurement site (K)



Figure 2 Wind mast and all equipments

Table 1 Wind mast and all equipments

Model	Detail	Manufacturer
120 m mast tower	Guyed Lattice Mast	NRG System
Anemometer NRG#40C	3-cup type, Measuring range 1-96 m/s	
Wind Vane NRG#200P	Measuring range 0-360 degree, -55 to 60 degree C	

**ผลการวิจัยและอภิปราย**

**ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยรายปี (Annual Mean Wind Speed)**

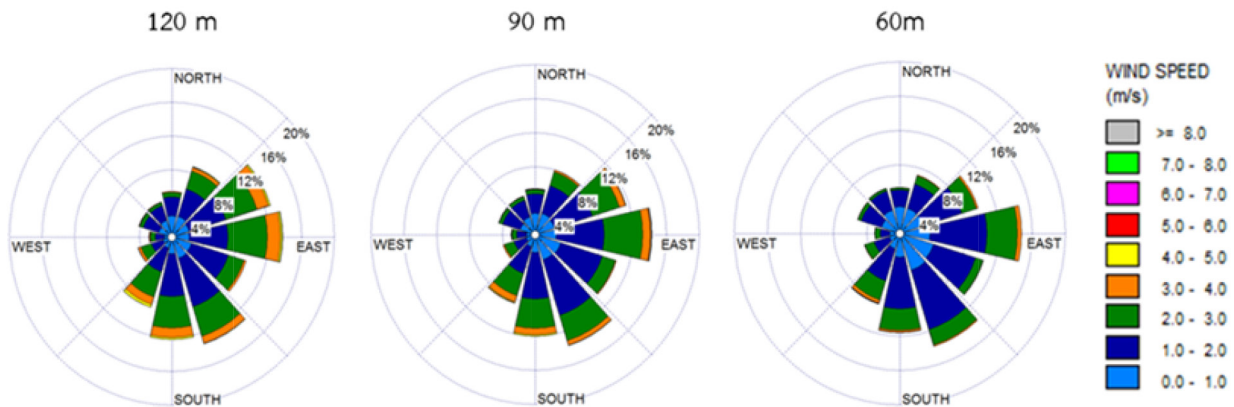
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยเป็นระยะเวลา 5 ปีติดต่อกัน เริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึง เดือนธันวาคม 2559 ที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดิน (AGL) โดยพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยที่บริเวณสถานีวัดความเร็วลมภายในจังหวัดกาฬสินธุ์มีค่าอยู่ในช่วง 3.12- 3.93 เมตรต่อวินาที ผลจากงานวิจัยนี้พบว่า ที่ระดับความสูง 120 เมตรจะมีความเร็วลมสูงสุดและลดลงมาตามระดับความสูงที่ 90 เมตร และที่ระดับความสูง 60 เมตร ตามลำดับ การกระจายตัวของทิศทางลมที่ระดับความสูงทั้ง 3 ระดับดังแสดงใน Figure 3 ทิศทางลมถูกแจกแจงโดยใช้โปรแกรม WIND PLOT<sup>16</sup> ทิศทางลมส่วนใหญ่พัดมาจากทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ไปยังทิศใต้ ซึ่งเป็นมรสุมประจำฤดูพื้นที่ของประเทศไทย ความเร็วลมเฉลี่ย ที่ได้จัดว่าเป็นความเร็วลม Class 1<sup>17</sup> ซึ่งถือว่าเป็นความเร็วลมที่ค่อนข้างต่ำ

**ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือน (Monthly Wind Speed Variation)**

ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนในแต่ละปีตั้งแต่ พ.ศ.2555 ถึง พ.ศ. 2559 รวม 5 ปี ดังแสดงใน Figure 4 พบว่าความเร็วลมค่อนข้างคงที่ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงสิงหาคมและความเร็วลมเฉลี่ยมีความเร็วสูงสุดในช่วงฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม จะมีแนวโน้มลดลงในช่วงฤดูฝนเดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคม และความเร็วลมในฤดูหนาวมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากฤดูฝนเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ ดังแสดงใน Table 2

**ข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยรายวัน (Daily Wind Speed)**

ลมจะมีความเร็วในช่วงเวลากลางคืนมากกว่าช่วงเวลากลางวันในทุกระดับความสูงเหนือพื้นดิน ซึ่งช่วงเวลากลางวันความเร็วลมค่อนข้างเสถียร ดังแสดงใน Figure 5 และ Table 3 ซึ่งเปรียบเทียบ ความเร็วลมในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนในแต่ละระดับความสูง



**Figure 3** Wind direction at 120, 90, 60 m AGL

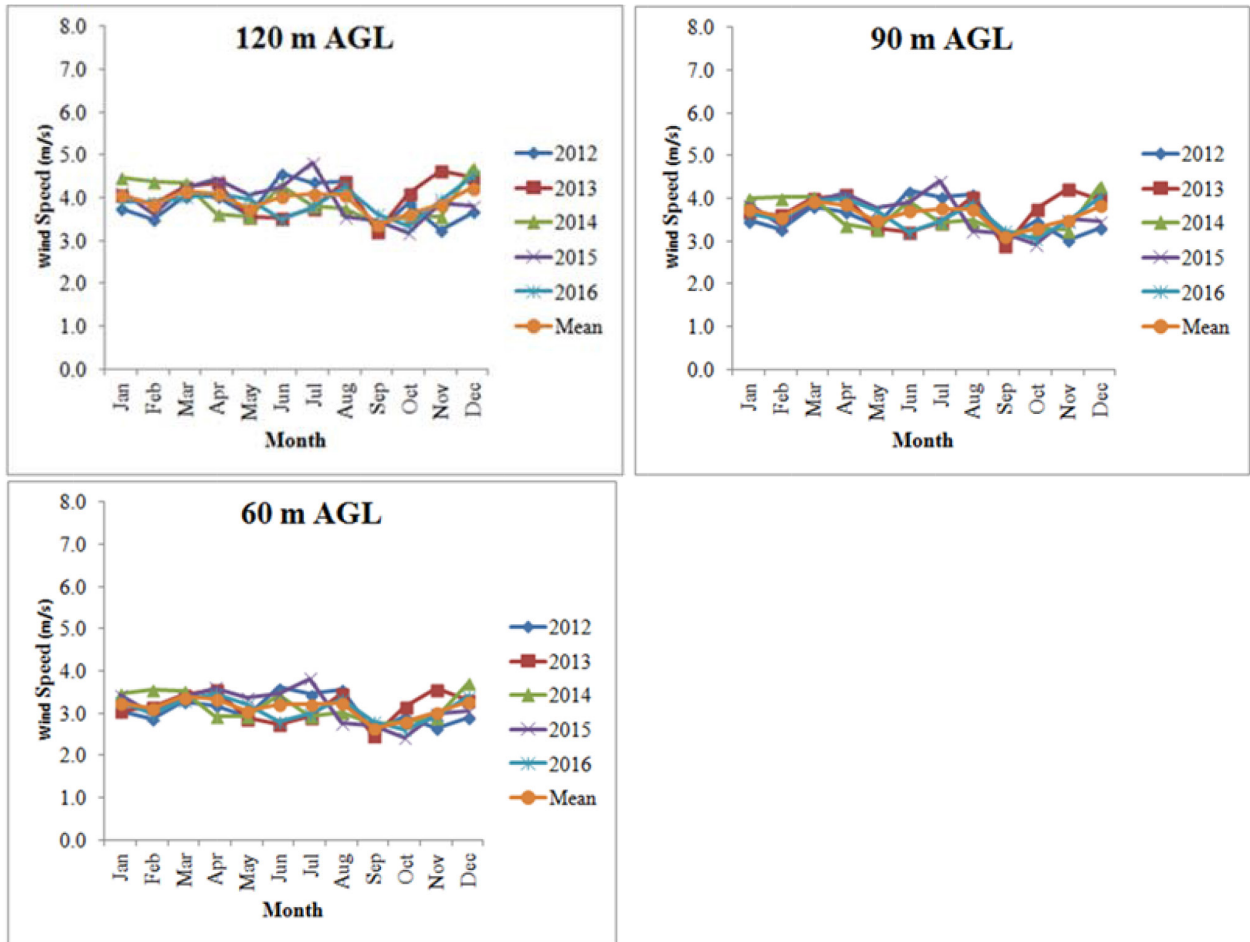


Figure 4 Monthly wind speed variation

Table 2 Seasonal wind speed distribution (m/s)

Seasonal	Height above ground level (m)		
	120 m	90 m	60 m
Winter	3.99	3.65	3.16
Summer	4.00	3.75	3.26
Rainy	3.83	3.51	3.01

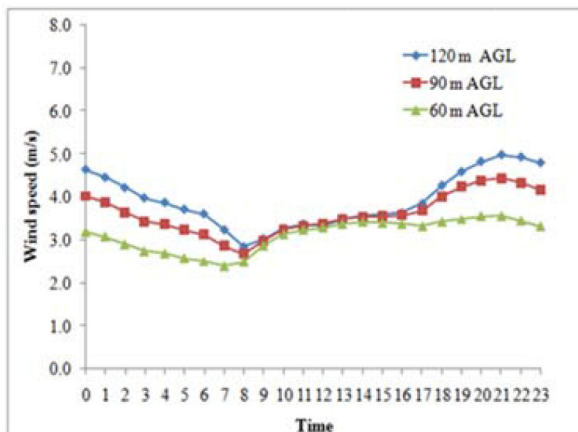


Figure 5 Time of day

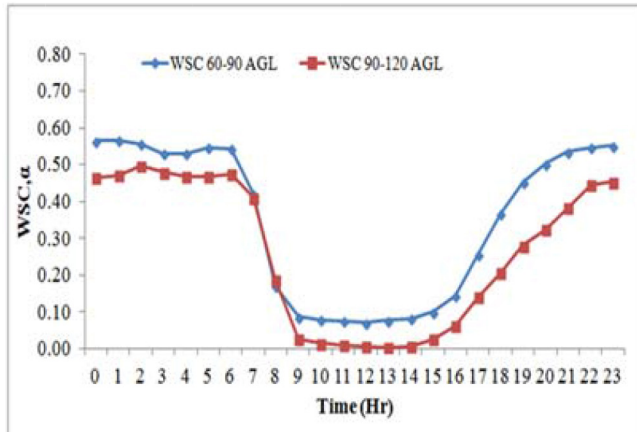


Figure 6 Wind Shear Coefficient

**Table 3** wind speed variation in day and night (m/s)

Time	Height above ground level (m)		
	120 m	90 m	60 m
Day (07.00-18.00 น.)	3.46	3.36	3.14
Night (18.00-07.00 น.)	4.29	3.86	3.04

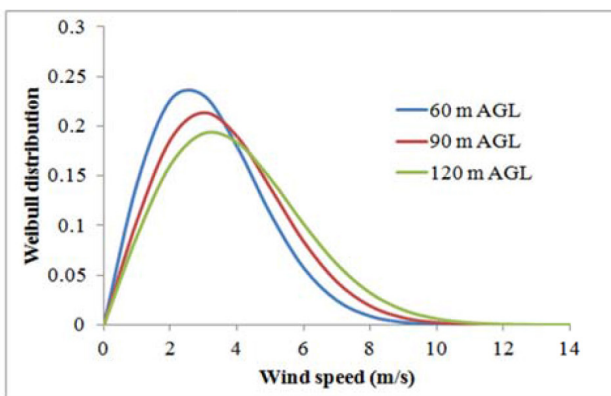
**แรงเฉือนลม (Wind Shear Coefficient (WSC))**

Figure 6 แรงเฉือนลมแสดงให้เห็นว่า WSC เฉลี่ยของบริเวณสถานีวัดความเร็วลม ระหว่าง 60-90 เมตร คือ 0.35 WSC ระหว่าง 90-120 เมตร คือ 0.26 WSC เริ่มเพิ่มขึ้น

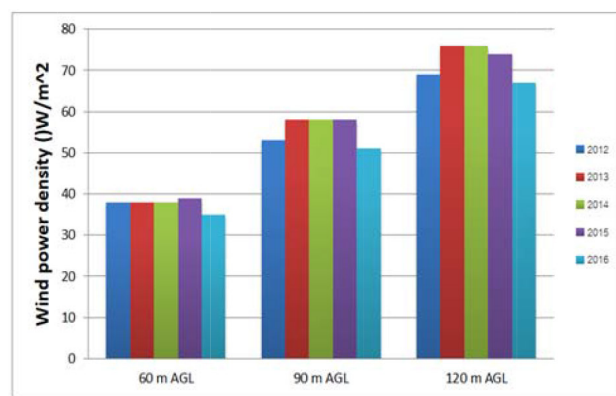
ในเวลา 16.00 น. จนถึง 0.00 น. (เที่ยงคืน) และค่อนข้างเสถียรจนกระทั่งเวลา 6.00น. – 9.00 น. ลดลงอย่างฉับพลันภายในเวลา 3 ชั่วโมง ส่วนสาเหตุที่ WSC ระหว่าง 60-90 เมตร มีค่ามากเนื่องมาจากการได้รับอิทธิพลของความขรุขระของพื้นผิวดิน (Surface Roughness)

**การแจกแจงการกระจายตัวของข้อมูลเฉลี่ย**

จากการการใช้เวบูลล์ฟังก์ชันหาการกระจายตัวของความเร็วลมที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดิน ดังแสดงใน Figure 7 โดยมี Shape และ Scale พารามิเตอร์เฉลี่ย ดัง Table 4



**Figure 7** Weibull distribution curve 2012-2016



**Figure 8** Wind Power Density ( $W/m^2$ )

**Table 4** Summary shape (k), scale parameter (c, m/s) and power (P,  $W / m^2$ ) 2012-16

Year	Parameter	Height above ground level (m)		
		120	90	60
2012	k	2.10	2.11	2.02
	c	4.5	4.1	3.5
	P	69	53	38
2013	k	2.07	2.09	2.01
	c	4.6	4.2	3.6
	P	76	58	38
2014	k	2.04	2.05	2.01
	c	4.5	4.2	3.6
	P	76	58	38
2015	k	2.00	2.02	1.98
	c	4.5	4.2	3.6
	P	75	58	39
2016	k	2.09	2.07	1.97
	c	4.4	4.0	3.5
	P	67	51	35
Annual	k	2.05	2.07	2.00
	c	4.5	4.1	3.6
	P	72	56	37

**Table 5** Wind Power Density ( $W/m^2$ )

Height above ground level (m)	Wine speed (m/s)	Wind Power Density ( $W/m^2$ )
120	3.93	72
90	3.62	56
60	3.12	37

**กำลังลม (Wind Power Density,  $W/m^2$ )**

กำลังลมเฉลี่ยที่ความสูงต่างๆ ดังแสดงใน Table 5 กำลังลมที่ความสูง 120 เมตร สูงกว่าที่ความสูง 90 และ 60 เมตร ตามลำดับและในปี 2558 พลังงานลมมีค่าสูง ดัง Figure 8 กำลังลมจะแปรผันกำลังสามกับความเร็วลม ซึ่งเป็นสมการไม่เชิงเส้น (Non-Linear) เมื่อลมมีความเร็วมาก กำลังลมก็จะมีค่ามากตามไปด้วย อีกประการหนึ่งคือ กำลังลมจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของอากาศพื้นที่บนภูเขาสูงค่าความหนาแน่นของอากาศจะเบาบางซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อกำลังลมที่ได้ อย่างไรก็ตามกำลังลมที่วัดได้ในเขตพื้นที่นี้ยังถือได้ถือได้จัดว่าอยู่ในระดับที่ต่ำ<sup>18</sup> ไม่เหมาะสมกับการติดตั้งกังหันลมสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์โดย  $\bar{P}/A < 100 W/m^2$  ต่ำ,  $\bar{P}/A \approx 400 W/m^2$  ดีและ  $\bar{P}/A > 700 W/m^2$  ดีมาก

**สรุปผลการวิจัย**

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศักยภาพความเร็วลมเฉพาะเขตพื้นที่บริเวณสถานีวัดความเร็วลมภายในจังหวัดกาฬสินธุ์ เป็นระยะเวลา 5 ปีติดต่อกันเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนธันวาคม 2559 เพื่อศึกษาความเร็วลม ไวนูลล์ พารามิเตอร์ทิศทางลม และกำลังลม พบว่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดิน (AGL) คือ 3.12, 3.62 และ 3.93 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในขณะที่ทิศทางลมส่วนใหญ่การกระจายตัวจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือไปยังทิศใต้ในช่วงเวลากลางคืนความเร็วลมจะสูงกว่าในช่วงเวลากลางวัน ค่า shape (k), scale parameter (c) เฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.00 ถึง 2.05 และ 3.60 ถึง 4.50 เมตรต่อวินาที และในส่วนของกำลังลม (Power Density,  $W/m^2$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 37, 56 และ 72 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ระดับความสูง 60, 90 และ 120 เมตรตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วลมและกำลังลมที่วัดได้ ซึ่งจัดอยู่ใน Wind Class 1 เท่านั้นถือได้ว่าความเร็วลมมีค่าค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามกังหันลมขนาดใหญ่ นั้นยังไม่เหมาะสมกับการติดตั้งสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์ เนื่องจากการติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์มีความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปี 6 เมตรต่อวินาที ที่ความสูง 50 เมตรเหนือพื้นดิน

ขึ้นไป<sup>17</sup>

ดังนั้นความเร็วลมนี้กังหันลมขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับแหล่งพลังงานทางเลือกเพื่อลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานและมลพิษต่อไปในอนาคต โดยอาจนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการเกษตร เช่น กังหันลมขนาดเล็กเพื่อการสูบน้ำ เป็นต้น

**กิตติกรรมประกาศ**

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยขอนแก่น (AERD-KKU) สำหรับการสนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ และผู้ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินงานในงานวิจัยนี้ทุกท่าน

**เอกสารอ้างอิง**

1. Energy Vision. สถานการณ์พลังงาน, [ระบบออนไลน์], [http://www.dede.go.th/download/state\\_61/frontpage-jan\\_nov60.pdf](http://www.dede.go.th/download/state_61/frontpage-jan_nov60.pdf), เข้าดูเมื่อวันที่ 10/04/2562.
2. iEnergyGuru. พลังงานลม: ลักษณะเฉพาะของลม และเครื่องมือวิเคราะห์, [ระบบออนไลน์], <https://ienergyguru.com/2015/07/พลังงานลม>
3. Fa Liua, et al. On wind speed pattern and energy potential in China, *Applied Energy*, vol. 236, 2019, pp. 867–876.
4. Acker T.L., William S.K., Duque E.P.N., Brummels G. and Buechler J. Wind Resource Assessment in the State of Arizona: Inventory, Capacity Factor and Cost, *Renewable Energy*, vol. 32, 2007, pp. 1453-1466.
5. Christopher and JungDirkSchindler. The role of air density in wind energy assessment – A case study from Germany, *Energy*, Vol. 171, 15 March 2019, pp. 385-392.
6. Sanjay Kumar and KaraAtulSharmab. Wind power developments in India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 48, August 2015, pp. 264-275
7. วรพงศ์ พวงแก้ว และคณะ. การประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมและความเป็นไปได้ในการติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาด 0.225-0.75 เมกะวัตต์ ตามแนวชายฝั่งทะเลของจังหวัดนครศรีธรรมราชและจังหวัดสงขลา, *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, ปีที่ 12 ฉบับที่ 3, ตุลาคม 2552 - มกราคม 2553

8. มานพ พูนน้อย และ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต (2556). การศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่งในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนของประเทศไทย, *วารสารวิจัย มข.*, ปีที่ 18 ฉบับที่ 5, หน้า 803-810
9. สุภชัย พลน้ำเที่ยง และ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต (2560). การวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานลมในเขตพื้นที่จังหวัดหนองคาย, *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 34 ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2560
10. สมพล ชิวมงคลกานต์ และคณะ (2557). ศักยภาพพลังงานลมบริเวณอำเภอปากพนังและอำเภอเชียรใหญ่ของจังหวัดนครศรีธรรมราช, *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, ปีที่ 17 ฉบับที่ 1, มกราคม-มิถุนายน 2557
11. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน. *ผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน*, [ระบบออนไลน์], [http://www.dede.go.th/download/stat62/2\\_Calendar\\_Year\\_renewable\\_Energy\\_2561.pdf](http://www.dede.go.th/download/stat62/2_Calendar_Year_renewable_Energy_2561.pdf), เข้าดูเมื่อวันที่ 11/04/2562.
12. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน. *แผนปฏิบัติการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579*, [ระบบออนไลน์], [http://www.dede.go.th/download/files/AEDP%20Action%20Plan\\_Final.pdf](http://www.dede.go.th/download/files/AEDP%20Action%20Plan_Final.pdf), เข้าดูเมื่อวันที่ 11/04/2562.
13. Z.R.Shu, Q.S.Li and P.W.Chan, Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong, *Energy Conversion and Management*, Vol.101,pp.644-657, 2015.
14. Myung Eun Lee et al, Assessment of offshore wind energy at Younggwang in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.21, pp. 131-141, 2013.
15. Laerte de Araojo Lima et al. Wind resource evaluation in SJC Paraba-Brazil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.16, pp.474-480, 2012.
16. Wind Plot. Available, [ระบบออนไลน์], <https://www.weblakes.com>. 2017.
17. TRECA สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย. *พลังงานลม*, [ระบบออนไลน์], <http://www.reca.or.th/library-wind-power.aspx>, เข้าดูเมื่อวันที่ 16/04/2562.
18. Amir Dabbaghiyan et al., Evaluation of wind energy potential in the province of Bushehr, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.55, 2016, pp.455-466.



# การศึกษาเชิงตัวเลขผลกระทบของความชื้นต่อจิตรกรรมฝาผนังในโบราณสถานของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

## Numerical Simulation on the Effect of Moisture Distribution on Ancient Mural Painting in Archaeological Temple of Phra Nakhon Si Ayutthaya Province

มงคล แก้วบำรุง<sup>1\*</sup>

Mongkol Kaewbumrung<sup>1\*</sup>

Received: 11 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

### บทคัดย่อ

จังหวัดพระนครศรีอยุธยามีวัดเก่าแก่โบราณเป็นจำนวนมากซึ่งล้วนแสดงถึงความเจริญรุ่งเรืองของศิลปกรรมชั้นสูงที่สั่งสมมาหลายร้อยปีที่ได้รับการสืบทอดมาถึงปัจจุบัน เพื่อรักษาและสืบทอดความสวยงามอันทรงคุณค่าของศิลปะกรรมต่างๆ งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นการนำเทคโนโลยีทางวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์มาช่วยในการคำนวณและวางแผนการรักษาวัดและโบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา จากการศึกษาและเก็บข้อมูลพบว่าจิตรกรรมฝาผนังของวัดโบราณเสียหายเป็นจำนวนมากจนไม่สามารถฟื้นฟูหรือรักษาให้คงสภาพเหมือนเดิมได้ โดยมีสาเหตุหลักมาจากความชื้นในฤดูฝนที่เกิดการสะสมภายในอาคารของโบราณสถาน ทำให้ภาพจิตรกรรมฝาผนังเกิดการหลุดลอกและเสื่อมสภาพ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการวางระบบระบายความชื้นไม่ดีพอจนทำให้เกิดการสะสมความชื้นที่ก่อให้เกิดหยดน้ำทำความเสียหายแก่ภาพดังกล่าว เพื่อลดปัญหาและยืดอายุของจิตรกรรมฝาผนังดังกล่าวผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลของรูปทรงของพระอุโบสถ/พระวิหาร มาศึกษาการไหลและการกระจายตัวของความชื้นด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยพิจารณาปริมาณความชื้นทิศทางลม และความสัมพันธ์กันของขนาดอาคาร พบว่ารูปทรงของพระอุโบสถ/พระวิหาร แต่ละแบบมีพฤติกรรมการไหลและบริเวณการสะสมของความชื้นที่แตกต่างกัน ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวางแผนการออกแบบระบบระบายอากาศแบบเฉพาะเจาะจงได้เป็นอย่างดี อีกทั้งเป็นการนำความรู้ทางวิศวกรรมชั้นสูงมาประยุกต์ใช้ในการอนุรักษ์โบราณสถานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ:** การศึกษาเชิงตัวเลข ความชื้น จิตรกรรมฝาผนัง โบราณสถาน

### Abstract

Phra Nakhon Si Ayutthaya province has many ancient temples which represent the prosperity of high-class Royal architecture over the last hundred years. However, study and data collection found that the murals of these ancient temples have been damaged, mainly due to moisture in the rainy season. In particular, the humidifying system in the buildings may be inappropriate, producing an adverse effect on the murals with peeling and deterioration. In order to preserve and inherit the beauty of various Royal arts, the numerical simulation approach is required. The simulated flow field and moisture distribution of the ordination hall style using 3D computational fluid dynamics (CFD) is the focus of this research. To extend the life of ancient murals, a plan for the treatment of these archaeological and ancient temples is proposed. Clearly, the moisture content, wind direction and the relationship of the building size are taken into account. The simulation results found that the size and style of temples influence the flow field and moisture accumulation. The data can be used to plan the design of an effective and specific ventilation system and also permit the application of advanced engineering knowledge effectively in archaeological temple preservation projects.

**Keywords:** Numerical Simulation, Moisture, Ancient wall painting, Archaeological Temple.

<sup>1</sup> อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลหันตรา อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000 ติดต่อ: E-mail, mongkol.kaewbumrung@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 02-979-6999

<sup>1</sup> Lecture, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. 60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

\* Corresponding author: Mongkol Kaewbumrung,

## บทนำ

จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีวัดเก่าแก่โบราณเป็นจำนวนมาก ซึ่งล้วนแสดงถึงความเจริญรุ่งเรืองของศิลปะกรรมชั้นสูงที่สั่งสมมาหลายร้อยปีที่ได้รับการสืบทอดมาถึงปัจจุบัน อันประกอบไปด้วยโบราณสถาน โบราณวัตถุจำนวนมาก เช่น วิหารพระมงคลบพิตร วัดพระศรีสรรเพชญ์ วัดพระราม วัดราชบูรณะ วัดมหาธาตุ และ วัดพระเมรุราชิการามวรวิหาร เป็นต้น ซึ่งได้รับการประกาศขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลก จากการประชุมคณะกรรมการมรดกโลกสมัยสามัญ ณ กรุงคาร์เธจ ประเทศตูนิเซีย เมื่อวันที่ 13 ธันวาคม 2534 และเพื่อเป็นการอนุรักษ์มรดกทางวัฒนธรรมในสมัยกรุงศรีอยุธยาหรือสร้างขึ้นในช่วงต้นของกรุงรัตนโกสินทร์ที่ได้ชำรุดทรุดโทรมไปเป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งจิตรกรรมฝาผนังเก่าแก่ที่ยังคงหลงเหลืออยู่ให้ได้ชื่นชมอยู่บ้างแต่ก็มีอัตราการเสื่อมสลายในระดับที่น่าเป็นห่วงอันเนื่องมาจากความชื้นภายในพระอุโบสถ พระวิหาร หรือ พระมณฑป ทำให้จิตรกรรมฝาผนังโบราณดังกล่าวหลุดลอก ถึงแม้ว่าจะได้รับการบูรณะปฏิสังขรณ์บ้างแต่ก็ยังคงเกิดปัญหาเนื่องจากความชื้นจนถึงปัจจุบัน เช่น วัดพระเมรุราชิการามวรวิหาร วัดช้างใหญ่ วัดศาลาปูนวรวิหาร วัดไม้รวก และ วัดกลาง อ. นครหลวง เป็นต้น

เพื่อศึกษาการไหลและการกระจายตัวของความชื้นในอาคารโบราณสถานที่มีรูปแบบแตกต่างกันผู้วิจัยได้นำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการศึกษาสำหรับโบราณสถานขนาดใหญ่ดังนี้

Watkinson<sup>1</sup> ศึกษาการแพร่ของความชื้นและคลอไรด์เพื่อทำนายและหาสาเหตุการผุกร่อนของตะปูสำหรับโครงสร้างอาคารโบราณ Billingsgate (London) พบว่าอัตราการสึกกร่อนสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในอากาศ, Inuzuka<sup>2</sup> ประยุกต์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป scSTREAM เพื่อจำลองการไหลของอากาศภายในอาคาร Sekisui Museum ประเทศญี่ปุ่น พบว่าภายในอาคารที่ไม่มีระบบปรับอากาศหรือมีระบบระบายอากาศที่ไม่เหมาะสมภายใต้สภาวะอากาศชื้นจะส่งผลให้เกิดการสะสมของความชื้นและความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในอาคารอันจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งของหรือระบบโครงสร้างในอาคารดังกล่าวได้ ต่อมา Turcanu<sup>3</sup> ประเมินสภาพภูมิอากาศในอาคารผ่านการจำลองสถานการณ์ความร้อนในโบสถ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT และใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $STD\ k-\epsilon$  พบว่าสำหรับอาคารขนาดใหญ่ต้องใช้เวลามากกว่าอาคารขนาดเล็กเพื่อปรับสภาพอากาศ อุณหภูมิ และความชื้นให้มีการกระจายตัว

แบบสม่ำเสมอทั้งอาคารและอาจจะก่อให้เกิดการสะสมของความชื้นที่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างหรือวัตถุที่เก็บรักษาไว้ภายในอาคารได้ ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการปรับสภาพของภูมิอากาศภายในอาคารขนาดใหญ่ระบบปรับอากาศจะต้องมีความเหมาะสมและสามารถควบคุมการไหลของอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทำนองเดียวกันกับการศึกษาของ Yasa<sup>4</sup> ศึกษาแบบภูมิอากาศภายในโบราณสถาน The Konya Slender Minaret Madrasah ประเทศตุรกี ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยพื้นฐานที่ต้องพิจารณาสำหรับระบบระบายอากาศภายในอาคารคือ อุณหภูมิ ความชื้น และความสว่าง โดยหากความไม่สัมพันธ์กันของความชื้นและอุณหภูมิจะก่อให้เกิดผลเสียต่อโครงสร้างอาคารทั้งภายนอกและภายใน ความเสียหายของโครงสร้างและวัตถุภายในอาคารจะเสียหายอย่างรวดเร็วหากมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของความชื้นและอุณหภูมิ เช่นเดียวกับ Khalil<sup>5</sup> ศึกษาการระบายอากาศและระบบปรับอากาศของโบสถ์โบราณ St Marry's ซึ่งตั้งอยู่ในเมืองไคโร ประเทศอียิปต์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT พบว่าการออกแบบระบบระบายอากาศภายในนั้นมีความสำคัญอย่างมากต่อการกระจายความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งการต่อเติมหรือออกแบบทางสถาปัตยกรรมจะต้องกระทำบนพื้นฐานของการออกแบบที่ถูกต้องเหมาะสมเพื่อป้องกันความไม่สมดุลของระบบระบายอากาศภายในอันจะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารและสถาปัตยกรรมที่เก่าแก่ได้ นอกจากนี้ Agostino<sup>6</sup> ศึกษาวิธีระบายอากาศภายในของอาคาร The Crypt of Lecce Cathedral (South Italy) ประเทศอิตาลี โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเปรียบเทียบกับทดลองซึ่งมีการเก็บข้อมูลสภาพอากาศนานถึงหนึ่งปี พบว่าผลที่ได้จากการศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองได้เป็นอย่างดี และยังพบอีกว่าการเปิด-ปิด หน้าต่างหรือประตูในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ มีผลกับความชื้น อุณหภูมิ และอัตราการเสื่อมสลายของประติมากรรมปูนปั้น, จิตรกรรมฝาผนัง และภาพเขียนสี ภายในอาคาร ดังนั้นในแต่ละช่วงฤดูต้องกำหนดระเบียบการเปิดและปิดประตู-หน้าต่างอย่างเหมาะสมเพื่อยืดอายุของโบราณสถานดังกล่าว ในทำนองเดียวกันกับการศึกษาของ Tronchin<sup>7</sup> ศึกษาการไหลของอากาศและระบบระบายอากาศใน Malatestiana Library ประเทศอิตาลี เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดเรื่องการบริหารจัดการพลังงานสำหรับโบราณสถานซึ่งกำหนดโดย UNESCO ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IESVE แบบสามมิติ พบว่าข้อมูลทางอากาศพลศาสตร์สามารถนำมาใช้เป็นข้อกำหนดเพื่อวางแผนการเปิด-ปิด ประตูและหน้าต่างของอาคารให้สอดคล้องกับสภาวะภูมิอากาศได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hussein<sup>8</sup> ศึกษาแบบ

ระบายอากาศของกลุ่มโบราณสถานขนาดใหญ่คือที่ราบสูง  
ก็เข้าอันเป็นที่ตั้งของพีรามิดกษัตริย์แห่งมรดกโลกที่สำคัญและ  
เป็นหนึ่งในเจ็ดสิ่งมหัศจรรย์ของโลก โดยมีวัตถุประสงค์หลัก  
เพื่อหาอิทธิพลของลมตะวันตกเฉียงเหนือ (ที่ความเร็วลมเฉลี่ย  
ตลอดทั้งปี) และลมพายุตตะวันตกเฉียงใต้ต่อโครงสร้างของกลุ่ม  
โบราณสถานพีรามิดและสฟิงซ์ พบว่าความเร็วลมที่เกิดขึ้นใน  
ฤดูกาลต่างๆมีผลกระทบต่อการใช้การร่อนอย่างมีนัยสำคัญ  
นอกจากนี้ Hamdi<sup>9</sup> และ Khalil<sup>10</sup> ศึกษาการกระจายตัวของ  
ความชื้นในหลุมฝังศพ KV57, Valley of the Kings, Luxor  
ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT พบว่า ปริมาณคน  
ที่เข้าไปเยี่ยมชมโบราณสถานมีผลต่อความชื้นที่เกิดขึ้นภายใน  
ซึ่งความชื้นดังกล่าวหากไม่สามารถบริหารหรือจัดการได้อย่าง  
เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อจิตรกรรมฝาผนังภายใน  
และในปี 2019, Grau-Bove<sup>11</sup> รวบรวมผลงานวิจัยที่ใช้พลศาสตร์  
ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการสำรวจ สนับสนุนการอนุรักษ์  
เชิงป้องกันและบางครั้งช่วยในการตีความทางประวัติศาสตร์  
หรือโบราณคดี พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมี  
นัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสามารถ  
ประยุกต์ใช้ในงานโบราณคดีและประวัติศาสตร์ได้เป็นอย่างดี  
และเป็นที่ยอมรับขององค์กรระดับโลก เช่น UNESCO  
และวงการวิจัยในระดับนานาชาติ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้มี  
วัตถุประสงค์หลักเพื่อประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิง  
คำนวณมาทำนายพฤติกรรมการไหลและการกระจายตัวของ  
ความชื้นในอาคารโบราณสถานของวัดที่มีรูปแบบตั้งแต่สมัย  
อยุธยาเพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากการระบายอากาศ  
ที่ไม่เหมาะสม ประกอบด้วยพระอุโบสถวัดพระเมรุราชิการาม  
วรวิหาร พระอุโบสถวัดช้างใหญ่และ มณฑปวัดกลาง อ.นครหลวง

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

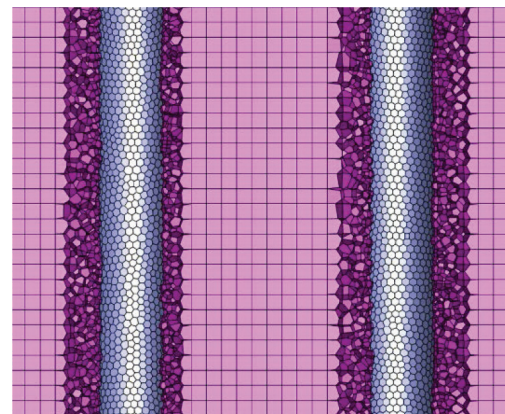
ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาการไหลแบบสามมิติ  
ภายใต้กรอบอ้างอิงการเคลื่อนที่แบบ Eulerian Reference  
Frame โดยรูปทรงของพระอุโบสถ วิหารและมณฑปที่ศึกษา  
ประกอบด้วย พระอุโบสถวัดพระเมรุราชิการามวรวิหาร, อุโบสถ  
วัดช้างใหญ่ และ มณฑปวัดกลาง ดัง Figure 1



(ก) พระอุโบสถวัดพระเมรุราชิการามวรวิหาร  
The Royal Ordination Hall of Phra Meru Rachikaram  
Worawihan Temple



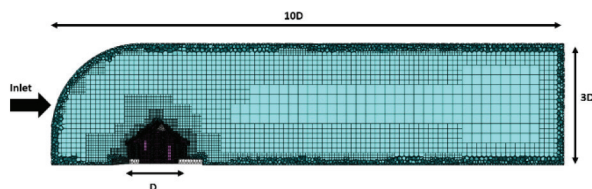
(ข) อุโบสถ วัดช้างใหญ่  
The Ordination Hall of Wat Chang Yai



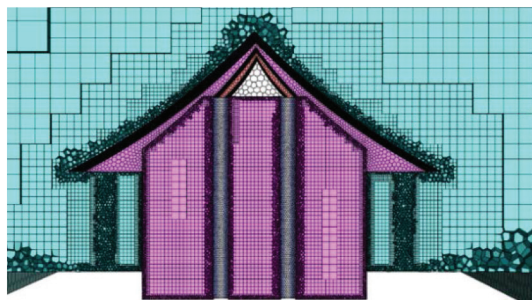
(ค) มณฑปวัดกลาง อ.นครหลวง  
The Pavilion of Wat Klang, Nakhon Luang

Figure 1 Architecture of the Royal Ordination Hall / the  
Ordination Hall and the Pavilion

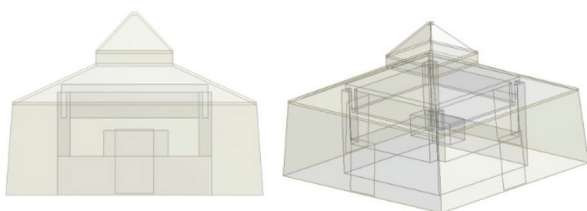
การไหลของอากาศใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST  $k-\omega$  กริดที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบ MOSAIC ซึ่งจากการศึกษาพบว่า MOSAIC Meshing Technology สามารถใช้จำนวนกริดและเวลาคำนวณน้อยกว่ากริดชนิดอื่นแต่ยังคงมีความถูกต้องของคำตอบที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับกริดแบบอื่นๆ<sup>12</sup> โดยกริดที่ใช้ในการศึกษาหลังจากทดสอบ Grid Independent Test แล้วแสดงดัง Figure 2 และ Table 1



กริดทั้งโดเมนของการศึกษา (D = 16 เมตร)  
Computational Grid (D = 16 m)



กริดภายในอาคาร  
Cross-section of Computational Grid



กริดบริเวณผนังภายในอาคาร  
Near Wall Cross-section of Computational Grid

Figure 2 Computational Grid by MOSAIC Technology

Table 1 Number of Computational Grid

	Grid Type		
	Polyhedral	Hexahedral	Isotropic poly prism
พระอุโบสถวัดพระเมรุฯ	5,122,455	4,345,121	3,23,453
อุโบสถ วัดช้างใหญ่	3,122,343	2,232,321	1,267,878
มณฑป วัดกลาง อ. นครหลวง	3,094,323	2,178,987	1,134,967

1. แบบจำลองความปั่นป่วน SST  $k-\omega$

จากการศึกษาที่ผ่านมา<sup>5,8,11</sup> แสดงให้เห็นว่าสมการจำลองความปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  ให้ผลที่ถูกต้องและสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี โดยแบบจำลองความปั่นป่วนดังกล่าวนี้เกิดจากการจัดรูปแบบสมการใหม่ของ BSL  $k-\omega$  ด้วยการเพิ่มพจน์ Turbulence Shear Stress ( $\tau_{ij}$ ) เข้าไปในสมการของ Turbulent Viscosity ( $\mu_t$ )<sup>12</sup> โดยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1) – (7)

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \cdot \vec{I} \right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \tag{4}$$

$$\nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left( \sum_j h_j J_j \right) \tag{5}$$

เมื่อ

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*}, 0.31 \omega \right]} \tag{6}$$

$$S = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \tag{7}$$

สำหรับค่าคงที่ในสมการที่ (1) – (7) อ้างอิงจาก<sup>12</sup>

**2. กฎการอนุรักษ์องค์ประกอบทางเคมีของความชื้น (Species Transport Equations)**

เนื่องจากความซับซ้อนของการไหลและกลไกการเคลื่อนที่ของแต่ละองค์ประกอบทางเคมี (species) ดังนั้นสมการสำหรับการแพร่สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 8

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i \quad (8)$$

เมื่อ

$R_i$  คือ Net rate of production species  $i$

$\bar{J}_i$  คือ Diffusion flux of species  $i$

ในงานวิจัยนี้พิจารณาการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นพจน์การแพร่ของมวลที่เกิดขึ้นแต่ละองค์ประกอบ สามารถเขียนระบบสมการที่เกี่ยวข้องกันได้ดังสมการที่ 9 และ สมการที่ 10 ตามลำดับ

$$\bar{J}_i = -(\rho D_{i,m} + 1.428 \mu_i) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (9)$$

$$\bar{H}_i = \nabla \cdot \left( \sum_{i=1}^n h_i \bar{J}_i \right) \quad (10)$$

**3. ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**

เนื่องจากการคำนวณพฤติกรรมกรการไหลในการศึกษาครั้งนี้เป็นแบบปั่นป่วนสำหรับมากกว่าสององค์ประกอบทางเคมี ดังนั้นเพื่อเพิ่มความถูกต้องและการเข้าสู่ค่าตอบของระบบสมการ Table 2 คือการตั้งค่าสำหรับโปรแกรม ANSYS FLUENT 2019R1

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยใช้ข้อมูลสภาพอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยาสำหรับภาคกลาง พบว่าโดยเฉลี่ยภาคกลางมีความชื้นสัมพัทธ์ 73 % อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 35 องศาเซลเซียส และความเร็วลมโดยเฉลี่ย 36 กิโลเมตรต่อชั่วโมง<sup>13</sup>

**Table 2** Numerical Setting

P-V Coupling	Couple
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	2 <sup>nd</sup> Order
Momentum	2 <sup>nd</sup> Order Upwind
Energy	2 <sup>nd</sup> Order Upwind
Species	2 <sup>nd</sup> Order Upwind
Pseudo Transient	Enable
WFG Correction	Enable
Multigrid	Flow - F-Cycle TKE - F-Cycle TDR - F-Cycle

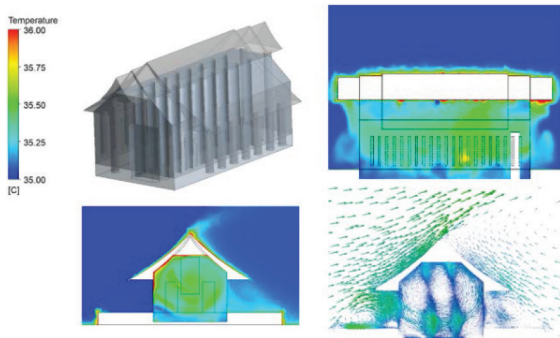
**ผลการจำลอง**

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการไหลและการกระจายตัวของความชื้นในโบราณสถาน ซึ่งเป็นสถาปัตยกรรมที่สร้างขึ้นตั้งแต่สมัยกรุงศรีอยุธยา และรัตนโกสินทร์ตอนต้น เพื่อวางแผนการอนุรักษ์เชิงบูรณาการที่ถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ โดยประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับจำลองการไหลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT R2019R1 ของพระอุโบสถวัดพระเมรุราชิกการามวรวิหาร อุโบสถวัดข้างใหญ่ และ มณฑปวัดกลาง อ.นครหลวง ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผลการศึกษาพบว่า

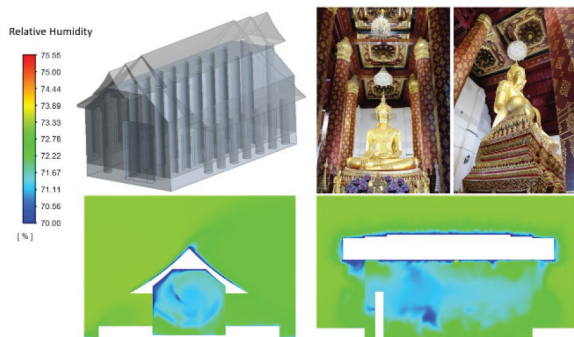
**1. พฤติกรรมกรการไหลภายในพระอุโบสถวัดพระเมรุราชิกการามวรวิหาร**

พระอุโบสถวัดพระเมรุราชิกการามวรวิหาร เป็นอาคารขนาดใหญ่ กว้างประมาณ 16 เมตร ยาวประมาณ 50 เมตร อายุ 515 ปี สร้างในรัชสมัยสมเด็จพระรามาธิบดีที่ 2 เมื่อ พ.ศ. 2047 มีดาวเพดานมงคลจักรวาลเก่าแก่ทำจากไม้แกะสลักลงรักปิดทองประดับกระจก พระอุโบสถเป็นสถาปัตยกรรมแบบอยุธยาตอนต้น มีการเจาะช่องแสงแทนการใช้หน้าต่าง ในสมัยพระเจ้าอยู่หัวบรมโกศ ได้เพิ่มเสารับชายคาเพื่อความสวยงามและรับโครงสร้างได้ดีขึ้น พระประธานในอุโบสถเป็นพระพุทธรูปทรงเครื่องหล่อสำริดขนาดใหญ่ที่สุดที่ปรากฏและมีความงดงามมาก เป็นศิลปะสมัยอยุธยาตอนปลาย ด้านหลังยังมีพระพุทธรูปอีกองค์หนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กกว่า คือพระศรีอริยเมตไตรย ในสมัยรัชกาลที่ 3 แห่งกรุงรัตนโกสินทร์ได้มีการปฏิสังขรณ์วัดนี้ โดยรักษาแบบอย่างเดิมไว้<sup>14</sup> จาก Figure 3 แสดงภาพตัดขวางแนวความกว้างและความยาวกึ่งกลางพระอุโบสถเพื่อศึกษาการกระจายของอุณหภูมิภายนอกและภายในพระอุโบสถ พบว่าเกิดการหมุนวนของกระแสอากาศทั้งภายนอกและภายในอย่างชัดเจน โดยการหมุนวนภายนอกเกิดขึ้นที่บริเวณด้านเดียวกับทิศทางอากาศที่ไหลเข้าพระอุโบสถ บริเวณใต้หลังคาซึ่งมีอากาศบางส่วนไหลผ่านช่องระบายอากาศด้านข้างผนังเข้าไปภายในและสะสมพลังงานการหมุนกลายเป็นบริเวณการหมุนวนของอากาศขนาดใหญ่บริเวณกึ่งกลางใต้เพดานอันเป็นที่ตั้งของดาวเพดาน นอกจากนี้ อุณหภูมิจะสูงสุด 36 องศาเซลเซียสที่บริเวณผนังเพดานฝั่งซ้าย ซึ่งจากพฤติกรรมกรการไหลดังกล่าวอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าการเจาะช่องแสงของผนังพระอุโบสถดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการสะสมของอุณหภูมิด้านบนของเพดานสัมพันธ์กับทิศทางการหมุนวนเนื่องจากทิศของกระแสอากาศ ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความชื้นต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ ดังรูปที่ 4 นอกจากนี้ การลดพื้นที่ต่ำกว่าขอบพระอุโบสถภายนอกไม่ทำให้เกิดการสะสมของความชื้นแต่ช่วยเพิ่มความเร็วของอากาศและแลกเปลี่ยน

ความชื้นจากบริเวณการหมุนวนกลางพระอุโบสถออกไปสู่ภายนอกอาคาร ดังนั้นข้อควรระวังสำหรับสถาปัตยกรรมการเจาะช่องแสงดังกล่าวคือ จำนวนช่อง ขนาด และตำแหน่งการเจาะที่จะต้องเหมาะสมและต้องสัมพันธ์กับทิศทางการไหล และฤดูกาล เป็นอย่างดี เพื่อสามารถบริหารความชื้นที่สะสมภายในพระอุโบสถได้อย่างมีประสิทธิภาพและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับศิลปกรรมภายในพระอุโบสถ



**Figure 3** Velocity and Temperature Distribution of the Royal Ordination Hall, Phra Meru Rachikaram Worawihan Temple

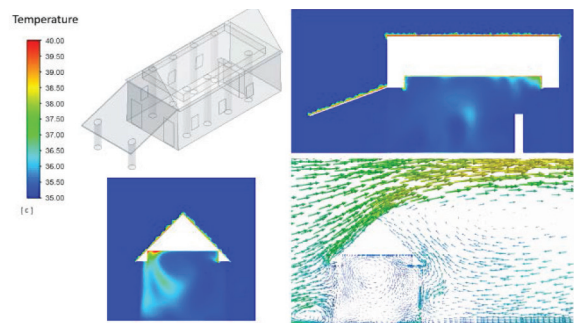


**Figure 4** Humidity Distribution of the Royal Ordination Hall, Phra Meru Rachikaram Worawihan Temple

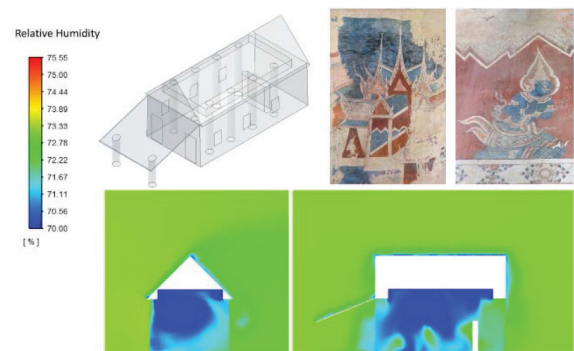
**2. พฤติกรรมการไหลภายในอุโบสถ วัดช้างใหญ่**

อุโบสถวัดช้างใหญ่ เป็นอาคารขนาดกลาง ก่ออิฐถือปูนขนาด 5 ห้อง ด้านกว้าง 3 ห้อง ด้านหน้ามีพาไล หน้าบันเรียบทั้ง 2 ด้าน ลักษณะอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หลังคาคลุมอย่างทรงคฤห์ ที่สกัดด้านหน้าต่อเป็นเฉลียงทำหลังคาแบบจันทับ (เฉลียงที่ทำหลังคาเป็นเพิงหมาแหงนคลุม) อายุประมาณ 312 ปี ผังด้านหน้าและผนังภายในอุโบสถของวัดช้างใหญ่มีภาพจิตรกรรมฝาผนังรอบด้าน เขียนด้วยสีฝุ่นรองพื้นด้วยดินสอพอง ด้านหลังองค์พระประธานเป็นภาพพระพุทธประวัติตอนมารวิชัย ผังด้านหน้าพระประธานเป็นภาพไตรภูมิ ผังด้านข้างด้านบนเป็นภาพเทพชุมนุม ส่วนด้าน

ล่างระหว่างช่องหน้าต่างเป็นภาพทศชาติชาดก ภาพจิตรกรรมเหล่านี้สันนิษฐานว่าเขียนในสมัยอยุธยาตอนปลาย ตรงกับรัชสมัยพระเจ้าอยู่หัวบรมโกศ ระหว่าง พ.ศ. 2275-2301 ต่อมาภาพบางตอนได้ถูกซ่อมแซมในสมัยรัตนโกสินทร์ตอนต้น ประมาณปี พ.ศ. 2356<sup>14</sup> จาก Figure 5 แสดงอุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศภายในและภายนอกพบว่าอากาศเกิดการหมุนวนเป็นวงขนาดใหญ่ภายในอุโบสถและมีอุณหภูมิสูงด้านที่อากาศไหลเข้าเนื่องจากการสะสมความร้อนภายในบริเวณที่เกิดการหมุนวนของอากาศ ซึ่งคล้ายคลึงกับการไหลภายในพระอุโบสถวัดพระเมรุราชิการามวรวิหาร และจากผลการหมุนวนของกระแสอากาศดังกล่าวส่งผลให้มีความชื้นต่ำเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ แต่จาก Figure 6 พบว่าบริเวณด้านซ้าย และ หลังอุโบสถ มีความชื้นสูงส่งผลให้อุณหภูมิสูงและทำความเสียหายแก่ภาพจิตรกรรมฝาผนัง และจากการตรวจสอบแสดงดัง Figure 7 พบความเสียหายของจิตรกรรมฝาผนังบริเวณด้านหลัง และ ด้านขวา มากกว่าบริเวณอื่นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รูปทรงของวิหารแบบวัดช้างใหญ่หากมีอากาศไหลเข้าด้านข้างของอุโบสถจะมีโอกาสของความเสียหายต่อจิตรกรรมมากที่สุดด้านหลังและด้านตรงข้ามกับทิศทางการไหลเข้าของอากาศมากที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณอับอากาศ



**Figure 5** Velocity and Temperature Distribution of the Ordination Hall, Wat Chang Yai



**Figure 6** Humidity Distribution of the Ordination Hall, Wat Chang Yai



Figure 7 The Damaged mural painting inside the Ordination Hall, Wat Chang Yai

### 3. พฤติกรรมการไหลภายในมณฑป วัดกลาง

#### อ. นครหลวง

วัดกลางสร้างขึ้นประมาณ พ.ศ.2330 ต้นกรุงรัตนโกสินทร์ เป็นวัดที่ตั้งอยู่ติดแม่น้ำป่าสัก โบราณสถานสำคัญคือมณฑปหรือวิหาร ซึ่งเชื่อว่าสร้างในสมัยรัชกาลที่ 3 ลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ก่ออิฐถือปูน หลังคามุงกระเบื้องกลางมณฑปมีพระแท่นยกสูงบนลวดลายบัวคว่ำบัวหงาย มีบันไดเดินขึ้นได้ทั้งสี่ทิศ บนแท่นมีโลงลอยตลึงทองพื้นสีแดง ขนาดความกว้าง 70 เซนติเมตร. ยาว 2 เมตร ส่วนตัวโลงศพ มีความสูง 1 เมตร มีฐานซุกซ็องรับ ที่พิเศษคือตรงปลายโลงด้านทิศตะวันตก มีฝาพระบาทของพระพุทธรเจ้ายืนโผล่พ้นโลงทองออกมาทั้ง 2 พระบาท กลางพระบาทมีรูปตราจักรและลายกันหอยสวยงาม ที่ปลายพระบาทมีพระกัศลับปะยี่นไหวพระบาทอยู่ ซึ่งเป็นการจำลองพิธีถวายพระเพลิงพระพุทธรเจ้าแบบเป็นสามมิติเสมือนจริง และมีจิตรกรรมฝาผนังรอบฝาผนังทั้ง 4 ทิศ เป็นเรื่องราวของสาวกพระพุทธรเจ้า ที่มาร่วมในถวายพระเพลิงพระบรมศพ<sup>14</sup> ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในมณฑปวัดกลาง แสดงดัง Figure 8 พบว่า เกิดการสะสมความร้อนที่ด้านบนของเพดานและเกิดการหมุนวนของกระแสอากาศหลายจุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านตรงข้ามกับประตูทางเข้า ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทไม่มีประสิทธิภาพและเมื่อพิจารณา Figure 9 แสดงการกระจายความชื้นภายในและภายนอกมณฑป แสดงให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของความชื้นภายในและภายนอกอาคารโดยเฉพาะบริเวณผนังด้านใน ซึ่งส่งผลให้เกิดความชื้นสะสมภายในมณฑปและสร้างความเสียหายแก่ภาพจิตรกรรมฝาผนังอย่างรุนแรงจนยากแก่การซ่อมแซมให้เหมือนเดิม รวมถึงโบราณวัตถุอื่นๆอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งจากผลดังกล่าวสอดคล้องกับภาพที่เสียหายหลุดลอก บริเวณด้านในรอบมณฑป เสารอบๆ โลงทอง และลายเขียนสีบนเพดาน แสดงดัง Figure 10 ดังนั้น จากผลการ

จำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับสถาปัตยกรรมของมณฑปรูปทรงดังกล่าวมีโอกาสเกิดความเสียหายค่อนข้างสูงที่บริเวณขอบด้านบนของผนังอาคาร และในช่วงฤดูฝนบริเวณขอบหลังคาด้านบนเปิดเป็นช่องว่างซึ่งจะส่งผลให้ความชื้นสามารถกระจายเข้ามาในอาคารผนวกกับการระบายอากาศที่ไม่ดีพอ ส่งผลให้เกิดอับชื้นทั่วทั้งมณฑปและสร้างความเสียหายโบราณวัตถุภายใน

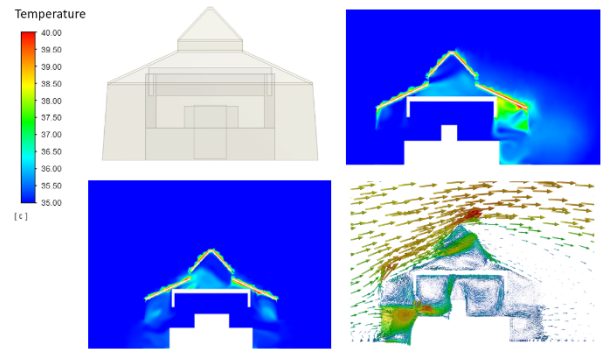


Figure 8 Velocity and Temperature Distribution of the Pavilion, Wat Klang, Nakhon Luang



Figure 9 Humidity Distribution of the Pavilion, Wat Klang, Nakhon Luang

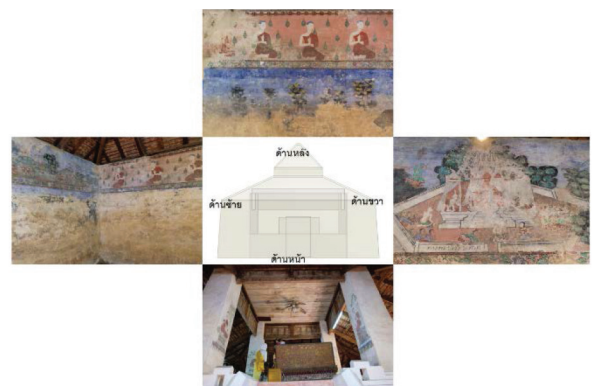


Figure 10 The Damaged mural painting inside the Pavilion, Wat Klang, Nakhon Luang

## สรุปและข้อเสนอนะ

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาทำนายพฤติกรรมการไหลและการกระจายตัวของความชื้นในอาคารโบราณสถานของวัดที่มีรูปแบบตั้งแต่สมัยอยุธยาเพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากการระบายอากาศที่ไม่เหมาะสม ประกอบด้วย พระอุโบสถวัดพระเมรุราชิกการามวรวิหาร อุโบสถวัดช้างใหญ่ และ มณฑปวัดกลาง อ.นครหลวง ด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน  $SST\ k-\omega$  และกฎการอนุรักษ์องค์ประกอบทางเคมีของความชื้น (Species Transport Equations) สร้างกริดแบบ MOSAIC Meshing Technology ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT 2019R1 ผู้วิจัยใช้ข้อมูลสภาพอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยาสำหรับภาคกลาง มีความชื้นสัมพัทธ์ 73 % อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 35 องศาเซลเซียส และความเร็วลมโดยเฉลี่ย 36 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ผลการศึกษาพบว่าอาคารที่มีสถาปัตยกรรมแบบพระอุโบสถวัดพระเมรุราชิกการามวรวิหาร เกิดการหมุนวนของกระแสอากาศทั้งภายนอกและภายในอย่างชัดเจน โดยการหมุนวนภายนอกเกิดขึ้นที่บริเวณด้านเดียวกับทิศทางการไหลเข้าพระอุโบสถบริเวณใต้หลังคา (ด้านซ้าย) ซึ่งมีอากาศบางส่วนไหลผ่านช่องระบายอากาศด้านข้างผนังเข้าไปภายในและสะสมพลังงานการหมุนกลายเป็นบริเวณการหมุนวนของอากาศขนาดใหญ่บริเวณกึ่งกลางใต้เพดานอันเป็นที่ตั้งของดาวเพดาน นอกจากนี้อุณหภูมิจะสูงสุด 36 องศาเซลเซียสที่บริเวณผนังเพดานซ้าย ซึ่งจากพฤติกรรมการไหลดังกล่าวอธิบายได้อย่างชัดเจนว่า การเจาะช่องแสงของผนังพระอุโบสถดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการสะสมของอุณหภูมิด้านบนของเพดานสัมพันธ์กับทิศทางการหมุนอันเนื่องมาจากทิศของกระแสอากาศ ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความชื้นต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ นอกจากนี้การยกพื้นต่ำกว่าขอบพระอุโบสถภายนอกไม่ทำให้เกิดการสะสมของความชื้นแต่ช่วยเพิ่มความเร็วของอากาศและแลกเปลี่ยนความชื้นจากบริเวณการหมุนวนกลางพระอุโบสถออกไปสู่ภายนอกอาคาร ดังนั้นข้อควรระวังสำหรับสถาปัตยกรรมการเจาะช่องแสงดังกล่าวคือ จำนวนช่อง ขนาด และตำแหน่งการเจาะที่จะต้องเหมาะสมและสัมพันธ์กับการไหลหรือฤดูกาลเป็นอย่างดี

สำหรับอุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศภายในและภายนอกอุโบสถ วัดช้างใหญ่ พบว่าอากาศเกิดการหมุนวนเป็นวงขนาดใหญ่ภายในวิหารและมีอุณหภูมิสูงด้านที่อากาศไหลเข้าเนื่องจากการสะสมความร้อนภายในบริเวณที่เกิดการหมุนวนของอากาศ ซึ่งคล้ายคลึงกับการไหลภายในพระอุโบสถวัดพระเมรุราชิกการามวรวิหาร และจากผลการหมุน

วนของกระแสอากาศดังกล่าวส่งผลให้มีความชื้นต่ำเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ นอกจากนี้ บริเวณด้านซ้าย และ หลังอุโบสถมีความชื้นสูงส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นและทำความเสียหายแก่ภาพจิตรกรรมฝาผนัง ตรวจสอบพบความเสียหายของจิตรกรรมฝาผนังบริเวณด้านหลัง และ ด้านขวา มากกว่าบริเวณอื่นอย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง อันแสดงให้เห็นว่า รูปทรงของอุโบสถ วัดช้างใหญ่ หากมีอากาศไหลเข้าด้านข้างของอุโบสถจะมีโอกาสของความเสียหายต่อจิตรกรรมมากที่ด้านหลังและด้านตรงข้ามกับทิศทางการไหลเข้าของอากาศมากที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณอับอากาศ

ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในมณฑปวัดกลาง พบว่า เกิดการสะสมความร้อนที่ด้านบนของเพดานและเกิดการหมุนวนของกระแสอากาศหลายจุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านตรงข้ามกับประตูทางเข้า ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศและความชื้นไม่มีประสิทธิภาพ การกระจายความชื้นภายในและภายนอกมณฑปแสดงให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของความชื้นภายในและภายนอกมณฑปโดยเฉพาะบริเวณผนังด้านใน ซึ่งส่งผลให้เกิดความชื้นสะสมภายในมณฑปและสร้างความเสียหายแก่ภาพจิตรกรรมฝาผนังอย่างรุนแรงจนยากแก่การซ่อมแซมให้เหมือนเดิม รวมถึงโบราณวัตถุอื่นๆอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งจากผลดังกล่าวสอดคล้องกับภาพจิตรกรรมฝาผนังที่เสียหาย หลุดลอก บริเวณด้านในรอบมณฑป เสารอบๆ โลงทอง และลายเขียนสีบนเพดาน ดังนั้นจากผลการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับสถาปัตยกรรมของมณฑปรูปทรงดังกล่าวมีโอกาสเกิดความเสียหายค่อนข้างสูงที่บริเวณขอบด้านบนของผนังอาคาร และในช่วงฤดูฝน บริเวณขอบหลังคาด้านบนเปิดเป็นช่องว่างซึ่งจะส่งผลให้ความชื้นสามารถกระจายเข้ามาในอาคารผนวกกับการระบายอากาศที่ไม่ดีพอ ส่งผลให้เกิดอับชื้นทั่วทั้งมณฑปและโบราณวัตถุภายใน

สำหรับงานวิจัยในอนาคตจะมุ่งเน้นการศึกษาเพิ่มเติมของทิศทางการไหลเข้า ความผันแปรของความชื้นในแต่ละฤดูกาล การกลั่นเป็นหยดน้ำ และการแพร่ของความชื้นเข้าสู่ผนัง เพื่อทำนายและออกแบบวัสดุสำหรับบำรุงรักษาหรือเคลือบภาพเขียน จิตรกรรมฝาผนัง และวางแผนระยะเวลาการบูรณะได้อย่างถูกต้องแม่นยำตามหลักวิทยาศาสตร์มากยิ่งขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโปรแกรม ANSYS FLUENT จากห้องวิจัยการเผาไหม้ขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้การควบคุมของ ดร. เฉลิมพล เปล่งสอาด



## เอกสารอ้างอิง

1. Watkinson D.E., Rimmer M.B. & Emmerso N.J. (2019). The Influence of Relative Humidity and Intrinsic Chloride on Post-excavation Corrosion Rates of Archaeological Wrought Iron. *Studies in Conservation*, 2047-0584.
2. Inuzuka M. (2016): Modelling temperature and humidity in storage spaces used for cultural property in Japan. *Studies in Conservation*, 2047-0584.
3. Turcanu F.E., Verdes M., Serbanoiu I., Ciocan V., & Balan M.C. (2017). Assessment of Indoor Climate Environment Via Hygrothermal Simulation in Historical Churches. 10<sup>th</sup> International Conference Interdisciplinarity in Engineering, 181, 412-417.
4. Yasa E., Fidan G. & Tosun M. (2014), Analysis of Historic Buildings in Terms of their Microclimatic and Thermal Comfort Performances "Example of Konya Slender Minaret Madrasah". *J. Archit Eng Tech*, 3(3), DOI :10.4172/2168-9717.1000126.
5. Khalil E.E. (2016). Air Conditioning of St Mary's Archeological Church, Cairo. *REHVA Journal*, 2, 56-60.
6. Agostino D.D., Congedo P.M. & Cataldo R. (2013). Ventilation control using computational fluid-dynamics (CFD) modelling for cultural buildings conservation, *Procedia Chemistry*, 8, 83-91.
7. Tronchin L. & Fabbri K. (2017). Energy and Microclimate Simulation in a Heritage Building: Further Studies on the Malatestiana Library. *Energies*, 10(10), 1621.
8. Hussein A. & El-Shishiny H. (2009), Influences of wind flow over heritage sites: A case study of the wind environment over the Giza Plateau in Egypt. *Environmental Modelling & Software*, 24, 389-410.
9. Hamdi A., Ali M., El-Bialy E. & Khalil E.E. (2015). Flow Regimes and Thermal Analyses in Ventilated Archeological Tomb KV57, Valley of the Kings, Luxor. *Journal of Energy and Power Sources*, 3(2), 131-136.
10. Khalil E.E. (2017). On the Modeling of Air Flow in the Tombs of the Valley of Kings. *Fluid Mechanics: Open Access*, 4(3), DOI: 10.4172/2476-2296.1000166.
11. Grau-Bove J., Mazzei L., Strlic M. & Cassar M. (2019). Fluid simulations in heritage science. *Heritage Science*, 7(16).
12. ANSYS. (2019). ANSYS FLUENT-Solver Theory Guide. ANSYS FLUENT Release 2019R1, Ansys Inc., Canonsburg, PA.
13. Thai Meteorological Department. (2019). Thailand Annual Weather Summary. Available from <https://www.tmd.go.th>. Accessed February 3, 2019.
14. The Fine Arts Department. (2019). Available from <http://www.finearts.go.th>. Accessed February 3, 2019.

## การศึกษาเชิงตัวเลขของการเผาไหม้มีเทนด้วย RNG $k-\epsilon$ Turbulence Eddy Dissipation Concept

### Numerical Simulation of Methane Combustion Using RNG $k-\epsilon$ Turbulence Eddy Dissipation Concept

มงคล แก้วบำรุง<sup>1\*</sup>

Mongkol Kaewbumrung<sup>1\*</sup>

Received: 11 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

#### บทคัดย่อ

การเผาไหม้เป็นกระบวนการที่สำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการเปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เป็นพลังงานความร้อน ซึ่งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นล้วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อน การไหลในห้องเผาไหม้เป็นแบบปั่นป่วนและต้องใช้ต้นทุนสูงสำหรับเครื่องมือในการทดลอง เพื่อเพิ่มความเข้าใจในขั้นตอนการเผาไหม้ของมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ที่เกิดขึ้น ปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้แบบ RNG  $k-\epsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept สำหรับกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดของมีเทนซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา จะนำมาศึกษาในครั้งนี้ โดยผลของอุณหภูมิที่ได้จากกรณีศึกษาแบบสองมิติจะเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับตัวแปรที่สนใจต่อการเปลี่ยนแปลง พลังงานความร้อน การปลดปล่อยไฮดรอกซิล (OH), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ได้แก่ ความเร็วการไหลเข้า มุมการฉีด อุณหภูมิ ของมีเทนและอากาศ จากการศึกษาพบว่า ความเร็วการไหลเข้าและมุมการฉีดของก๊าซมีเทนมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเปลวไฟที่เกิดขึ้น และอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิด OH, CO และ  $\text{CO}_2$  อย่างมีนัยสำคัญ ด้วยข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าค่าคุณสมบัติที่ทางเข้ามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้และปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้ เพื่อความเข้าใจในเชิงวิชาการถึงกระบวนการปฏิสัมพันธ์ของคุณสมบัติความปั่นป่วนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large Eddy Simulation – Dynamics Structure เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในอนาคต

**คำสำคัญ:** กลไกการเผาไหม้แบบละเอียด ปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้ Large Eddy Simulation

#### Abstract

Combustion is a very important process for changing energy from various fuels. High heat from combustion is employed for various engineering applications. However, analysis of combustion processes is very complex, since physical mechanisms are related to many chemical reaction equations and various scales of turbulent motions. In order to save costs for experimental set up and understanding in more detail, a numerical study of combustion was performed in the study. The combustion of methane ( $\text{CH}_4$ ) using turbulence interaction of RNG  $k-\epsilon$  combustion with detailed kinetic mechanism, 53 species and 325 reactions was chosen in this work. The results of the temperature predictions from a two-dimensional case are compared with the available experimental data from Sandia National Laboratories. The inlet velocity, angle of injection and temperature of methane and air are the main parameters to predict heat

<sup>1</sup> อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000 ติดต่อ: E-mail, mongkol.kaewbumrung@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 02-979-6999

<sup>1</sup> Lecture, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. 60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

\* Corresponding author: Mongkol Kaewbumrung,

release and reaction rate of hydroxyl (OH), carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). It was found that the flow velocity and the injection angle of methane influenced changes in the shape of the flame while the temperature increased the reaction rate of CO, CO<sub>2</sub> and OH significantly. It can be concluded that the physical properties at the inlet have an effect to the rate of chemical reactions of combustion and the amount of product gas generated after combustion. For academic understanding of the combustion process on the rate of reaction, however, large eddy simulation with dynamics structure is a suitable choice for future studies.

**Keywords:** Detail Chemistry Mechanism, Large Eddy Simulation, Turbulence Eddy Dissipation Concept.

## บทนำ

การเผาไหม้เป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันโดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดอัตราการปล่อยแก๊สพิษออกสู่บรรยากาศ ละอองขนาดเล็กที่มีผลต่อสุขภาพ (PM 2.5) และการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เป็นต้น ในหลายปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรได้ออกแบบและศึกษาปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้ที่ซับซ้อนมากขึ้น ประกอบกับความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการคำนวณที่สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับกลไกการเผาไหม้แบบละเอียด (Detail Kinetic Mechanism) อย่างมากมาย เช่น Waszkiewicz<sup>1</sup> ศึกษากลไกการเผาไหม้แบบละเอียดสำหรับ 48 องค์ประกอบทางเคมี 213 ปฏิกิริยา สามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการเผาไหม้ระหว่าง มีเทน (CH<sub>4</sub>) และ ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ต่ออัตราการเกิดน้ำ (H<sub>2</sub>O) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ได้อย่างถูกต้อง เช่นเดียวกับ Kim<sup>2</sup> ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการเผาไหม้ของมีเทนห้าแบบคือ 3-STEP, WD4, SKELETAL, DRM-19 และ GRI-2.11 โดยพิจารณาการไหลเป็นแบบสองมิติ ใช้สมการความปั่นป่วนแบบปรับปรุงของ Standard  $k - \epsilon$  มีปฏิสัมพันธ์กับการเผาไหม้แบบ Eddy Dissipation Concept. (EDC) พบว่า DRM-19 (21 องค์ประกอบทางเคมี, 84 ปฏิกิริยา) และ GRI-2.11 (49 องค์ประกอบทางเคมี, 279 ปฏิกิริยา) ซึ่งเป็นกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดที่ให้ผลการคำนวณคุณสมบัติของการเผาไหม้และก๊าซที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับการทดลองการเผาไหม้ของมีเทน และ Zohra<sup>3</sup> พบว่าการเผาไหม้ของมีเทนจะให้ผลการศึกษาที่ถูกต้องเมื่อใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard  $k - \epsilon$  มีปฏิสัมพันธ์กับการเผาไหม้แบบ Eddy Dissipation Concept. (EDC) มากกว่า Finite Rate Combustion ในทำนองเดียวกัน Aboje<sup>4</sup> เปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับการก่อมลพิษจากการเผาไหม้ของมีเทนและอากาศด้วยอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ และ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) พบว่าการจำลองความปั่นป่วนแบบ Renormalized group (RNG)

$k - \epsilon$  และ SST  $k - \omega$  ให้ผลอุณหภูมิและความเข้มข้นขององค์ประกอบทางเคมีสอดคล้องกับการทดลองเช่นเดียวกับกับผลของ Farokhi<sup>5</sup> และ การศึกษาของ Emami<sup>11</sup> ศึกษาการเผาไหม้ของมีเทนถึงการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน ด้วยการจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k - \epsilon$  ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT ในห้องเผาไหม้สำหรับอุตสาหกรรมแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาผสมสูงขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณสูงขึ้นและรูปแบบการไหลในห้องเผาไหม้จะสัมพันธ์กับการเพิ่มของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้สำหรับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแบบสองชนิดในกระบอกสูบสำหรับมีเทนมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยการฉีดเชื้อเพลิงผสมระหว่าง ดีเซล - มีเทน และทำนายการเผาไหม้และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในกระบอกสูบด้วยความปั่นป่วนแบบ Renormalization group (RNG)  $k - \epsilon$  ของ Aniello<sup>9</sup> พบว่าผลของความดัน อุณหภูมิ และอัตราการปล่อยพลังงานความร้อน ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองได้เป็นอย่างดี, Chen<sup>6</sup> ศึกษาความสัมพันธ์ของความร้อนในห้องเผาไหม้มีเทนขนาดเล็กด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองมิติ พบว่า ความร้อนที่ผนังห้องเผาไหม้ อัตราการไหลและส่วนผสมของมีเทน มีผลต่อความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้อย่างมีนัยสำคัญ, Shi<sup>7</sup> ทดลองและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขถึงผลกระทบของออกซิเจนต่อความถี่เสียงรบกวนของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของมีเทนพบว่าอัตราส่วนของออกซิเจนที่มีค่าไม่เกิน 0.30 จะให้ความถี่เสียงรบกวนของเปลวไฟที่ดีที่สุด และเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวอยู่ในช่วงระหว่าง 0.40 - 0.45 การเผาไหม้จะไม่มีเสียงรบกวนเนื่องจากความไม่สมดุลกันของปฏิกิริยาเคมี และ Mithun<sup>10</sup> พบว่าเสียงรบกวนของเปลวไฟจากการเผาไหม้ของมีเทนจะสูญเสียความเป็นสมมาตรมากขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์มากกว่า 153 ซึ่งการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี และเช่นเดียวกับ Plengsa-Ard<sup>8</sup> ศึกษาการเผาไหม้ในกระบอกสูบและการกระจายตัวของความ

ร้อนที่ผนังกระบอกสูบด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k-\epsilon$  โดยค่าของ ความดัน และ อัตราการปล่อยพลังงาน ความร้อน ให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า RNG  $k-\epsilon$  เหมาะสมกับการศึกษาการเผาไหม้

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อทำนายการไหลในห้องเผาไหม้ของมีเทน ( $CH_4$ ) มีปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้แบบ RNG  $k-\epsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept มีกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดมีองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา โดยผลของอุณหภูมิที่ได้จากกรณีศึกษาแบบสองมิติจะเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับตัวแปรที่สนใจต่อการเปลี่ยนแปลง พลังงานความร้อน การปลดปล่อยไฮดรอกซิล (OH), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ได้แก่ ความเร็วการไหลเข้า มุมการฉีด อุณหภูมิ ของมีเทนและอากาศ

**แบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาการไหลแบบสองมิติในระบบพิกัด  $x-y$  ภายใต้กรอบอ้างอิงการเคลื่อนที่แบบ Eulerian Reference Frame โดยในเชื้อเพลิงที่ใช้คือก๊าซมีเทน ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา<sup>12,13,14</sup> โดยกรณีศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลอง และระบบสมการที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k-\epsilon$ , กฎการอนุรักษ์องค์ประกอบทางเคมี (Species Transport Equations) และแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้ (Turbulence-Chemistry Interaction) ตามลำดับ กริดที่ใช้ศึกษาห้องเผาไหม้ขนาดความกว้าง 0.44 เมตร สูง 3 เมตร ดัง Figure 1 เป็นแบบ Quadrilateral Element หลังจากทำ Grid Independent Test แล้ว พบว่ากริดจำนวน 532,167 กริด ไม่มีผลกับคำตอบที่ได้ ซึ่งที่บริเวณผนังห้องเผาไหม้มีการปรับกริดให้มีความละเอียดเพื่อเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณแรงเฉือนที่ผิวผนังห้องดัง Figure 2

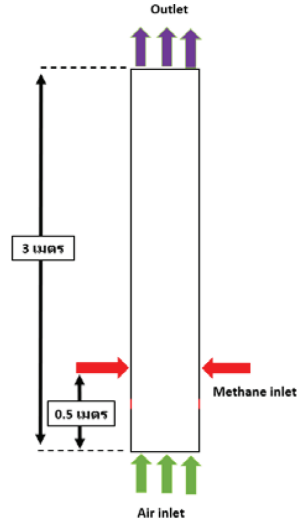


Figure 1 Computational geometry

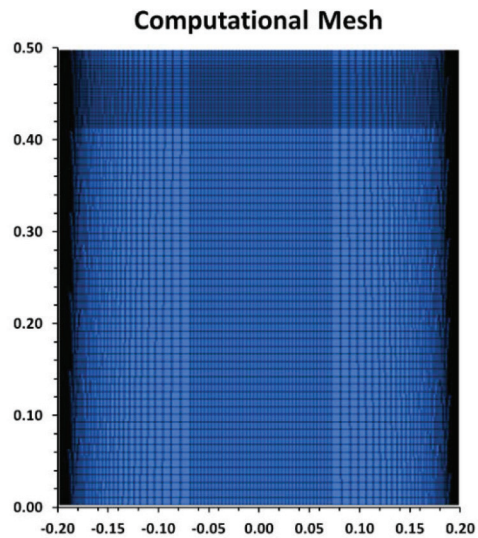


Figure 2 Computational grid

**1. แบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k-\epsilon$**

จากการศึกษาที่ผ่านมา<sup>5,8,11</sup> แสดงให้เห็นว่าสมการจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k-\epsilon$  ให้ผลที่ถูกต้องและสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี โดยแบบจำลองความปั่นป่วนดังกล่าวนี้เกิดจากการจัดรูปแบบสมการใหม่ของ STD  $k-\epsilon$  ด้วยการประยุกต์คุณสมบัติทางสถิติของการไหลเรียกว่า Renormalization Group Theory<sup>16</sup> ทำให้สามารถเพิ่มความถูกต้องของการไหลแบบหมุนและเกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดของการไหลอย่างรวดเร็ว (Rapidly Strained Flows)<sup>16</sup> โดยระบบสมการดังกล่าวสามารถเขียนได้ดัง สมการที่ (1) และ (2)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \epsilon \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + 1.42 \left( \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \left( 1.68 + \frac{0.0845 \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \right) \frac{\epsilon^2}{k} \tag{2}$$

เมื่อ

$$\eta \equiv Sk / \epsilon, \quad \eta_0 = 4.38, \quad \beta = 0.012$$

### 2. กฎการอนุรักษ์องค์ประกอบทางเคมี (Species Transport Equations)

เนื่องจากความซับซ้อนของการไหลและกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดของมีเทนการหาคำตอบของแต่ละปฏิกิริยาสามารถเขียนอยู่ในรูปพจน์ของการพาได้ตั้งสมการที่ 3

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i \tag{3}$$

เมื่อ

$R_i$  คือ Net rate of production species  $i$

$\bar{J}_i$  คือ Diffusion flux of species  $i$

ในงานวิจัยนี้พิจารณาการเผาไหม้แบบปั่นป่วนตั้งนั้นพจน์การแพร่ของมวลที่เกิดขึ้นแต่ละองค์ประกอบ (Species) สามารถเขียนระบบสมการที่เกี่ยวข้องกันได้ตั้งสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ

$$\bar{J}_i = -(\rho D_{i,m} + 1.428 \mu_i) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \tag{4}$$

$$\bar{H}_i = \nabla \cdot \left( \sum_{i=1}^n h_i \bar{J}_i \right) \tag{5}$$

### 3. แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้ (Turbulence-Chemistry Interaction)

สำหรับแบบจำลองปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้แบบ Eddy Dissipation-Concept เป็นแบบจำลองที่เป็นส่วนขยายของ Eddy-Dissipation Model<sup>16</sup> โดยสมมติให้การเผาไหม้เกิดขึ้นในโครงสร้างการไหลขนาดเล็ก (Small Turbulent Structure) ดังนั้น Length Fraction of the Small

Scales  $\xi^*$  จะถูกเพิ่มในการคำนวณ Detail Chemical Mechanism สำหรับความปั่นป่วนในการเผาไหม้ โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$R_i = \frac{\rho (\xi^*)^2}{0.4082 [1 - (\xi^*)^3]} \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} (Y_i^* - Y_i) \tag{6}$$

$$\xi^* = 2.1377 \left( \frac{\nu \epsilon}{k^2} \right)^{1/4} \tag{7}$$

เมื่อ

$Y_i^*$  คือ the fine-scale species mass fraction

### ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

เนื่องจากการคำนวณการเผาไหม้สำหรับองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา แบบปั่นป่วนมีความไม่เชิงเส้นตั้งนั้น เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการศึกษา ผู้วิจัยจะใช้ผลของกริดศึกษามาตรฐานของการเผาไหม้มีเทนที่ได้จากการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเปรียบเทียบกับการทดลองของ Barlow<sup>12</sup> ดัง Figure 3 พบว่าเงื่อนไขขอบเขตและการตั้งค่าเชิงตัวเลขให้ผลสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี โดยการตั้งค่าการคำนวณเป็นไปดัง Table 1

Table 1 Numerical setting

P-V Coupling	Couple
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	2 <sup>nd</sup> Order Upwind
Energy	2 <sup>nd</sup> Order Upwind
Species	2 <sup>nd</sup> Order Upwind
TKE	2 <sup>nd</sup> Order Upwind
TDR	2 <sup>nd</sup> Order Upwind

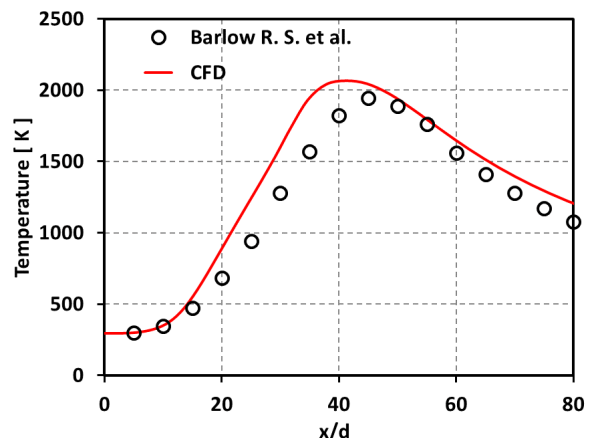


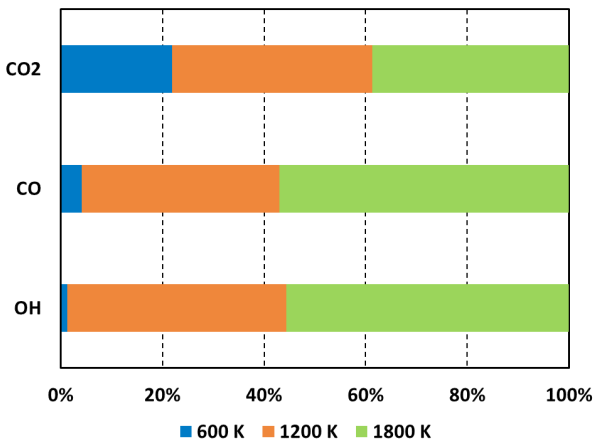
Figure 3 Results of the validation study<sup>12</sup>

**ผลการจำลอง**

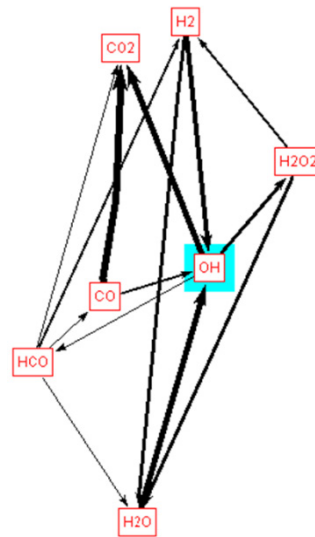
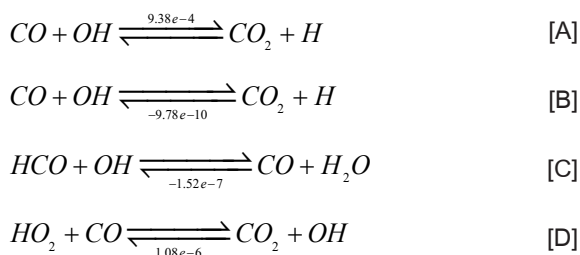
สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการเผาไหม้มีเทนด้วย RNG  $k - \epsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT R2019R1 ซึ่งใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method, FVM) เพื่อทำนายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน การปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และ ไฮดรอกซิล (OH) เนื่องจาก ความเร็วการไหลเข้าของอากาศ อุณหภูมิ และมุมการฉีดมีเทนผลการศึกษาพบว่า

**1. ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทางเข้าของอากาศก่อนการเผาไหม้**

เพื่อศึกษาผลกระทบของความร้อนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ อุณหภูมิทางเข้าของอากาศก่อนการเผาไหม้ ประกอบด้วย 600 เคลวิน, 1,200 เคลวิน และ 1,800 เคลวิน โดยมีความเร็วของอากาศ 20 เมตรต่อวินาที ผลจากการศึกษาแสดงดัง Figure 4 และ Figure 5 พบว่าที่อุณหภูมิ 600 เคลวิน มีอัตราการเกิด OH ในปริมาณที่น้อยและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้ (Reaction Path of Combustion) ดังในสมการ [A] – [D] จากการใช้โปรแกรม CHEMKIN 2019R1 ศึกษาเพิ่มเติมถึงเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Egolfopolous<sup>14</sup>



**Figure 4** The rate of occurrence of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference inlet temperature



**Figure 5** The reaction path of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference inlet temperature

**2. ผลของการเปลี่ยนความเร็วของอากาศ**

สำหรับความเร็วอากาศที่ศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย 5 เมตรต่อวินาที, 10 เมตรต่อวินาที และ 20 เมตรต่อวินาที โดยมีอุณหภูมิ 1,800 เคลวิน ผลแสดงดัง Figure 6 พบว่าเมื่อที่ความเร็วต่ำอัตราการเกิด OH ซึ่งเป็นสารที่บ่งบอกถึงเกิดการเผาไหม้มีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับสารอื่นๆ แต่เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น OH มีอัตราการเกิดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าความเร็วของอากาศมีผลกับอัตราการเผาไหม้ของมีเทนอย่างชัดเจน และนอกจากนี้ผลจากการทำนายเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จาก Figure 7 พบว่า OH เกิดจากปฏิกิริยา [E] แต่ในขณะเดียวกัน OH ก็เป็นสารตั้งต้นให้กับปฏิกิริยา [F] ในอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ OH เกิดขึ้นน้อย นอกจากนี้ความเร็วของอากาศมีผลกับการผสมระหว่างอากาศและมีเทนก่อนการเผาไหม้ หากสารผสมดังกล่าวไม่เหมาะสมหรือไม่สม่ำเสมอจะส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์<sup>13</sup>

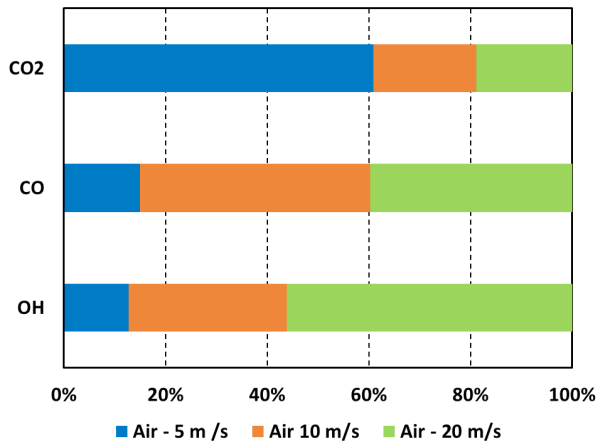


Figure 6 The rate of occurrence of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference inlet velocity

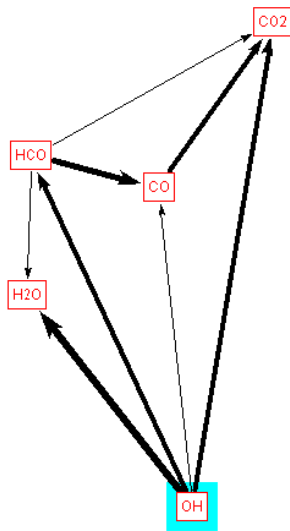
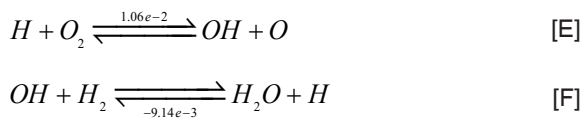


Figure 7 The reaction path of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference inlet velocity

3. ผลของการเปลี่ยนมุมการไหลเข้าของมีเทน การเผาไหม้ของมีเทนนอกจากความเร็วของการอากาศทางเข้า และ อุณหภูมิ จะมีผลกับการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น การผสมกันระหว่างมีเทนกับอากาศเป็นตัวแปรที่สำคัญเช่นกันของประสิทธิภาพการเผาไหม้และสสารที่เกิดขึ้น ซึ่ง Figure 8 แสดงผลกระทบของการเปลี่ยนมุมการฉีดมีเทนที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย 0°, 30° และ 45° ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมุมการไหลของมีเทนเท่ากับ 45° มีอัตราการเกิด OH มากที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่นๆ ซึ่งจากการศึกษาของ Barlow<sup>12</sup> พบว่า

OH คือสสารที่บ่งบอกได้ถึงจุดเริ่มต้นการเผาไหม้และเป็นสสารที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ดังนั้นจากการศึกษามุมการฉีดมีเทนแสดงให้เห็นว่าที่มุมการฉีด 45° เป็นมุมที่ดีที่สุดสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ สำหรับผลกระทบของเปลวไฟที่เกิดขึ้น มุมการฉีด 0° และ 45° ให้ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน แต่มุม 30° มีความยาวของเปลวไฟที่สั้นที่สุด อย่างไรก็ตาม ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นยังคงต้องการจำลองความปั่นป่วนที่ขึ้นกับเวลาเพื่อพิจารณารูปทรงของเปลวไฟเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป เช่น Large Eddy Simulation with Dynamics Structure เป็นต้น

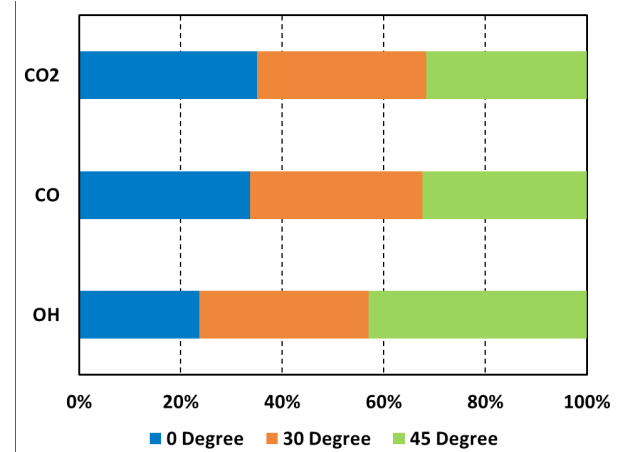


Figure 8 The rate of occurrence of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference methane inject angle

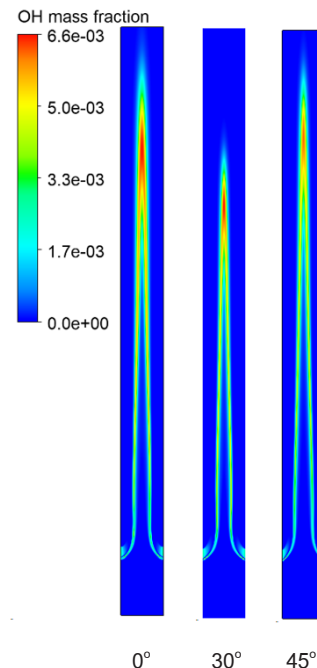


Figure 9 The contour of OH, CO and CO<sub>2</sub> at the difference methane inject angle

## สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษานี้มุ่งเน้นทำนายการไหลในห้องเผาไหม้ของมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) มีปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของการเผาไหม้แบบ RNG  $k-\epsilon$  Turbulence Eddy Dissipation Concept มีกลไกการเผาไหม้แบบละเอียดมีองค์ประกอบทางเคมี 53 ชนิด 325 ปฏิกิริยา โดยผลของอุณหภูมิต่างกันจากกรณีศึกษาแบบสองมิติ ให้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษาของ Barlow<sup>16</sup> ดัง Figure 3 เป็นอย่างดี สำหรับตัวแปรที่สนใจต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน การปลดปล่อยไฮดรอกซิล (OH), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ได้แก่ ความเร็วการไหลเข้ามุมการฉีด อุณหภูมิ ของมีเทนและอากาศ จากการศึกษาพบว่า ความเร็วการไหลของอากาศที่ทางเข้า 20 เมตรต่อวินาทีให้อัตราการเกิด OH มากที่สุด และ ที่ความเร็วทางเข้า 5 เมตรต่อวินาทีให้อัตราการเกิด  $\text{CO}_2$  มากที่สุด และมุมการฉีดมีเทน  $45^\circ$  มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเปลวไฟที่เกิดขึ้นและทำให้อัตราการเกิด OH, CO และ  $\text{CO}_2$  อย่างมีนัยสำคัญ ด้วยข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าค่าคุณสมบัติที่ทางเข้ามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้และปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้ เพื่อความเข้าใจในเชิงวิชาการถึงกระบวนการปฏิสัมพันธ์ของคุณสมบัติความปั่นป่วนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Large Eddy Simulation – Dynamics Structure เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโปรแกรม ANSYS FLUENT จากห้องวิจัยการเผาไหม้ขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้การควบคุมของ ดร. เฉลิมพล เป็ล่งสอาด

## เอกสารอ้างอิง

- Boukhalfa N. (2016). Chemical Kinetic Modeling of Methane Combustion. 4<sup>th</sup> International Conference on Process Engineering and Advance Materials. Procedia Engineering, 148, 1130-1136.
- Kim Y.J., Oh C.B., & Fujita O. (2013). Prediction Performance of Chemical Mechanisms for Numerical Simulation of Methane Jet MILD Combustion. Advance in Mechanical Engineering, Article ID 138729, 16 pages.
- Zohra K.F., Mounir A. , & Salah C. (2017). Numerical Simulation of  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-AIR}$  Non-premixed Flame Stabilized by a Bluff Body. International Conference on Materials and Energy 2015, Energy Procedia, 139, 530-536.
- Aboje A.A., Garba M.U., Abdulkareem A.S. Muzenda E., & Faruq A.A. (2017) Numerical Modeling of Pollutant Formation in a Lifted Methane-Air Vertical Diffusion Flame. Cogent Environmental Science, 3, 1302543.
- Farokhi M. , & Birouk M. (2019). A hybrid EDC/Flamelet Approach for Modelling Biomass Combustion of Grate-Firing Furnance. Combustion Theory and Modeling, 1741 – 3559.
- Chen J., Song W. , & Xu D. (2017) Computational Fluid Dynamics Simulation of the Thermal Uniformity in Catalytic Micro-Combustors. Frontiers in Heat and Mass Transfer. DOI: 10.5098/hmt.8.21.
- Shi B., Peng W., Li B., Hu J., Wang N. & Ishizuka S. (2017) .  $\text{CO}_2$  diluted propane/oxygen combustion in a rapidly mixed tubular flame burner. Proceedings of the Combustion Institute, 36, 4261-4268.
- Plengsa-ard C. & Kaewbumrung M. (2018). CFD Modelling Wall Heat Transfer Inside a Combustion Chamber Using ANSYS Forte. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering ,297. 012036.
- Aniello A., Bartolucci L., Cordiner A., Mulone V., Krishnan S.R., & Srinivasan K.K. (2018). CFD Analysis of Diesel-Methane Dual Fuel Low Temperature Combustion at Low and High Methane Substitution, Proceedings of the ASME 2018 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, November 4-7, 2018, San Diego, CA, USA.
- Mithun J., Sundararajan T., & Srinivasan K. (2019): Transition from Symmetric to asymmetric Flame Anchoring in Two-Dimensional Channels with Sudden Expansion. Combustion Science and Technology, 1563 – 521X.
- Emami M.D., Shahbazian H., & Sunden B. (2018). Effect of Operational Parameters on Combustion and Emissions in an Industrial Gas Turbine Combustor. ASME. J. Energy Resour. Technol. , 141(1):012202-012202-14. doi:10.1115/1.4040532.



12. Barlow, R. S., Frank, J. H., A. N. Karpetis, & Chen J.Y., (2005) "Piloted Methane/Air Jet Flames: Scalar Structure and Transport Effects," *Combust. Flame* 143(4), 433-449.
13. Schneider, Ch., Dreizler, A., & Janicka, J., (2003) "Flow Field Measurements of Stable and Locally Extinguishing Hydrocarbon-Fuelled Jet Flames" *Combust. Flame*, 135,185-190.
14. F.N. Egolfopolous et al. (1988). *Proceedings of Combustion Institute*, 23, 471.
15. ANSYS, 2018, ANSYS FLUENT-Solver Theory Guide. ANSYS FLUENT Release 2019R1, Ansys Inc., Canonsburg, PA.

# การออกแบบระบบติดตามอุณหภูมิเพื่อเหนี่ยวนำการออกดอกของต้นมะยงชิด

## Design of Monitoring System for Induced Flowering of Plum Mango

พีรศุภมภ์ ไชยศรีมณีพรรณ<sup>1</sup>, ชินวัฒน์ ยัพวัฒน์<sup>2</sup>, ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์<sup>1\*</sup>

Peerasutth Chairsrimaneepan, Chinawat Yapwattanaphun, Taweedej Siritanapipat

Received: 11 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

### บทคัดย่อ

มะยงชิดเป็นไม้ผลทางเศรษฐกิจที่มีราคาสูงและเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งในและนอกประเทศ เนื่องจากปัญหาการมีผลผลิตไม่เพียงพอ เป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีที่ไม่เหมาะสม ซึ่งการปลูกมะยงชิดควรมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีอยู่ 18-20 องศาเซลเซียส เป็นผลให้การออกดอกเกิดขึ้นในฤดูหนาวเท่านั้น ผู้วิจัยได้ทำการนำห้องเย็นมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิเพื่อเหนี่ยวนำการออกดอก ร่วมกับการใช้แนวคิด Internet of Things (IoT) ในการติดตามสภาพแวดล้อมภายในและภายนอก ด้วยการทดลองที่แตกต่างกัน 3 วิธี ซึ่งคณะผู้จัดทำได้ใช้อุปกรณ์ DHT22 จำนวน 6 ตัว เพื่อใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น รวมถึงใช้ CT sensor YHDC SCT-013 เพื่อใช้วัดค่ากระแสไฟฟ้า และเขียนคำสั่งผ่านโปรแกรม Arduino IDE ไปยัง Node MCU (ESP32) เพื่อให้รับค่าจาก Sensor และทำการส่งข้อมูลขึ้นสู่ Cloud (Firebase) ทำให้ผู้ใช้สามารถติดตามอุณหภูมิและความชื้นภายในและภายนอก การเพื่อกระตุ้นให้มะยงชิดสามารถออกดอกได้ตลอดปีรวมถึงนำข้อมูลที่ได้ออกวิเคราะห์และติดตามการใช้พลังงานเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของระบบห้องเย็น (sCOP) แบบ Realtime

**คำสำคัญ:** IoTs ห้องเย็น การออกดอกนอกฤดูของมะยงชิด การเก็บค่าขึ้นคลาวด์จากเซ็นเซอร์

### Abstract

*Plumeria* is an economic plant which has a high value and demand in domestic and international markets. However, production is limited by an unsuitable environment, as the average ambient temperature for planting should be around 18-20 °C throughout the year, which allows *Plumeria* to flower during winter. Therefore, the researcher used a cold room to control temperature and utilized the Internet of Things (IoT) concept to track internal and external conditions with 3 types of experiment. The researcher used 6 ea of DHT22 sensors to measure temperature and humidity, a YHDC SCT-013 sensor to measure electricity, and an Arduino IDE program to write commands on Node MCU (ESP8266 and ESP32) to receive data that was then sent to Cloud (Firebase), allowing users to analyze, track data and forecast the energy consumption of the cold room with reporting the efficiency of the system (sCOP) in real-time.

**Keywords:** IoTs, cold room, off-season flowering of *Plumeria*, send value to cloud storage from sensors

<sup>1</sup> ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

<sup>2</sup> ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

<sup>1</sup> Mechanical Department, Faculty of Engineer Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Rd., Latyao, Chatuchak, Bangkok 10900.

<sup>2</sup> Horticulture Department, Faculty of Agriculture Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Rd., Latyao, Chatuchak, Bangkok 10900.

\* ติดต่อ: taweedej.s@ku.th , agrcw@ku.ac.th

### บทนำ

เกษตรกรรมถือเป็นรากฐานที่สำคัญของประเทศไทยมาอย่างยาวนาน และเป็นจุดแข็งของประเทศไทยในทางเศรษฐกิจ อีกทั้งในปัจจุบันนโยบาย Thailand 4.0 ของรัฐบาลได้มีการกล่าวถึงการเปลี่ยนเกษตรกรรมแบบดั้งเดิมเป็นเกษตรกรรมที่ทันสมัย (Smart Farming) ซึ่งมียุทธศาสตร์สำคัญคือ การพัฒนาเกษตรดิจิทัล ส่งเสริม Internet of Things ให้เกิดขึ้นในภาคการเกษตร<sup>1</sup>

ทางคณะผู้จัดทำจึงเกิดแนวคิดการประยุกต์ใช้ Internet of Things ช่วยในการปลูกพืชเพื่อให้เกษตรกรสามารถทำการเพาะปลูกให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและมีจำนวนเพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งพืชที่คณะผู้จัดทำสนใจในโครงการนี้ คือ มะยงชิด

มะยงชิด เป็นไม้ผลที่มีศักยภาพเป็นที่ต้องการของตลาด ในปี 2554 มีพื้นที่ปลูกมะยงชิดประมาณ 8,272 ไร่ ผลผลิต 2,500 ตัน มูลค่ารวม 375 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) ราคาขายสูงกิโลกรัมละ 200-400 บาท<sup>3</sup> แต่ในช่วงปีที่ผ่านมาผลผลิตของมะยงชิดน้อยลงอย่างมาก เพราะอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมบริเวณที่เพาะปลูกสูงเกินไปไม่เหมาะสมต่อการออกดอก ต้นไม้จึงไม่สามารถออกผลได้ คณะผู้จัดทำจึงต้องการแก้ไขปัญหาโดยใช้ห้องเย็นเคลื่อนที่ ที่ออกแบบมาเฉพาะ ทำการควบคุมอุณหภูมิให้แก่ต้นมะยงชิด และสร้างชุดอุปกรณ์ติดตามสถานะในห้องเย็นด้วย Node MCU และ เซนเซอร์ DHT22

โดยเปิดการทำงานของห้องเย็นในช่วงเวลาตั้งแต่ 04.00 – 08.00 น. มีการปรับอุณหภูมิให้อยู่ต่ำกว่า 19 องศาเซลเซียสเพื่อให้เหมาะต่อการออกดอก และมีการใช้ Thermoscan มาช่วยในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสภาวะต่างๆ ในห้องเย็นอีกด้วย

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### ลักษณะทั่วไปของมะยงชิด

มะยงชิดเป็นพืชที่จัดอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae (Cashew family) มีชื่อสามัญว่า Marian plum และ Plum mango ลักษณะทั่วไปเป็นผลไม้ลักษณะคล้ายกับมะปราง เป็นผลไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ เป็นทรงพุ่มทึบ ผลมีลักษณะรูปทรงไข่กลมรี โคนมนปลายรี ผิวเปลือกเกลี้ยงเป็นมันหนากว่ามะปราง ไม่มียาง ผลสุกมีสีเหลืองอมส้ม มีรสชาติหวานอมเปรี้ยว มีกลิ่นหอม มีเมล็ดแข็งทรงรี สีขาวนวลหรือสีม่วงอมชมพูอยู่ข้างในเนื้อ มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีการปลูกในหลายประเทศที่มีอากาศร้อน เป็นผลไม้ท้องถิ่นของไทย<sup>7</sup>

### ความสัมพันธ์ของการออกดอกของมะยงชิดกับสภาพอากาศ

จากรายงานโครงการแก้ปัญหามะยงชิด-มะปรางหวานออกดอกติดผลน้อยจังหวัดนครนายกของ ดร.ชินวัฒน์ ยี่พัวฒนพันธ์ ซึ่งศึกษาโดยการติดตั้ง เครื่องตรวจวัดสภาพอากาศ ในสวนมะยงชิดและมะปรางหวาน สรุปได้ว่า ปัจจัยเดียวที่ทำให้มะยงชิดออกดอกคือ อุณหภูมิ มะยงชิดต้องการอุณหภูมิต่ำกว่า 19 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งติดต่อกันเป็นเวลา 3 วัน แล้วหลังจากนั้นเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงกว่า 19 องศาเซลเซียส มะยงชิดจะออกดอกหลังจากวันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 19 องศาเซลเซียส 5 วัน ปัจจัยความชื้นดินไม่ได้มีผลต่อการออกดอกของมะยงชิดแต่อย่างใด เช่นเดียวกับปริมาณฝน ความชื้นสัมพัทธ์ ช่วงแสง และความเร็วลม<sup>9</sup>

#### หลักการทำงานของระบบทำความเย็น

ระบบปรับอากาศถือเป็นหนึ่งในระบบทำความเย็นแบบหนึ่งซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้เป็นระบบแบบอัดไอ โดยจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้

เครื่องอัดไอ (Compressor) ทำหน้าที่อัดสารทำความเย็นเพื่อให้มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง

คอยล์ร้อน (Condenser) ทำหน้าที่ในการระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็นเพื่อให้ควบแน่น

วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) ทำหน้าที่ลดความดันสารทำความเย็นเพื่อให้สามารถเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำ

คอยล์เย็น (Evaporator) ทำหน้าที่ดูดความร้อนจากอากาศภายในห้องทำให้สารทำความเย็นเดือดกลายเป็นไอ<sup>5</sup>

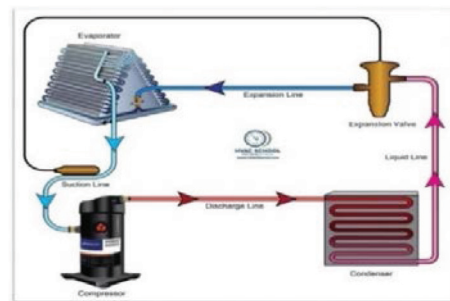


Figure 1 Compressed air cooling system

#### Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) คือ แนวคิดในการสร้างระบบ เครือข่ายของอุปกรณ์ต่าง ๆ ทางกายภาพ เช่น ตัวส่งการ ตัววัดค่า เซ็นเซอร์ต่าง ๆ ตัวส่งสัญญาณ หน่วยประมวลผล และหน่วยส่งข้อมูลโดยจะเชื่อมต่อกัน ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้สามารถส่งผ่านข้อมูลถึงกันได้ รวมถึงการนำส่งข้อมูลขึ้นระบบอินเทอร์เน็ตผ่าน Cloud Service<sup>4</sup>

**Cloud Service**

Cloud Service คือ บริการที่ผู้ให้บริการเปิดให้ผู้ใช้ นำเอากำลังประมวลผล หน่วยจัดเก็บข้อมูล และระบบออนไลน์ต่าง ๆ ไปใช้เพื่อลดความยุ่งยากในการติดตั้ง ดูแลระบบ และลดต้นทุนในการสร้างระบบคอมพิวเตอร์และเครือข่ายเอง<sup>6</sup> ซึ่งในโครงการนี้ใช้ Cloud Service ชื่อ Firebase ซึ่งเป็นบริการที่รวมเอาระบบโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชันมารวมไว้เพื่อให้ นักพัฒนาสามารถนำไปใช้งานโดยไม่ต้องพัฒนาโครงสร้างขึ้นมาใหม่ทุกครั้ง โดยงานวิจัยนี้ได้ให้นำเอาส่วน Realtime Database ของ Firebase มาใช้เป็นตัวกลางในการจัดเก็บข้อมูลจาก Node MCU หรือ Micro Controller ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นชุดควบคุมขนาดเล็กที่สามารถเชื่อมต่อ เพื่อสั่งการเครื่องมือนี้อิเล็กทรอนิกส์ผ่านอินเทอร์เน็ตได้ ถือเป็นหนึ่งในอุปกรณ์สำคัญของแนวคิด Internet of Things โดยผู้ใช้สามารถโปรแกรมคำสั่งให้แก่ Node MCU ผ่านทางโปรแกรม Opensource (Arduino IDE) ในส่วนของอุปกรณ์วัดทางผู้วิจัยได้ใช้ DHT 22 ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 25 °C

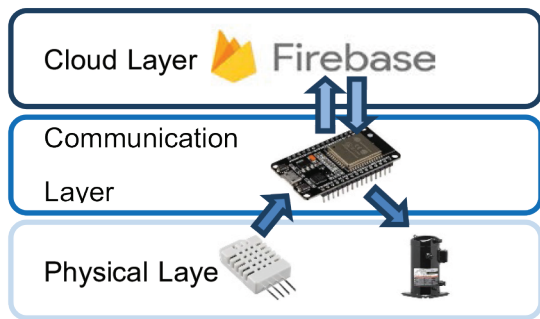


Figure 2 Cloud System operation diagram

**วิธีการดำเนินงาน**

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบวงจรไฟฟ้าของระบบติดตามอุณหภูมิเพื่อเห็นยวนำการออกดอกของต้นมะยงชิดด้วยโปรแกรม Fritzing โดยใช้ Node MCE ESP32 และ DHT22 เป็น Sensor ในการวัดอุณหภูมิรวมไปถึงความชื้นสัมพัทธ์ดัง Figure 4 ในส่วนของการดำเนินงานมีการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยก่อนที่ผู้วิจัยจะลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลนั้นได้รับความร่วมมือจากทางคณะเกษตรในการทดลองมาก่อนแล้ว โดยอาศัยห้องเย็นควบคุมอุณหภูมิในลักษณะที่ประตูปิดสนิทและปิดช่องว่างบริเวณโคนต้นไม้ด้วยผ้าใบ ซึ่งยังไม่สามารถเห็นยวนำให้ต้นมะยงชิดออกดอกได้ ทางคณะผู้จัดทำจึงมีการเสนอแนวคิดการทดลองต่าง ๆ เพื่อเห็นยวนำต้นมะยงชิดให้ออกดอกโดยการทดลองแต่ละครั้ง ทดลองด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน

**การทำงานของ Node MCU**

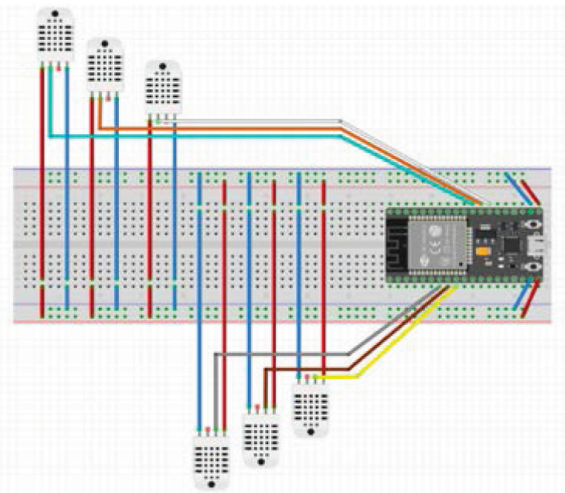


Figure 3 Connecting DHT22 with ESP 32

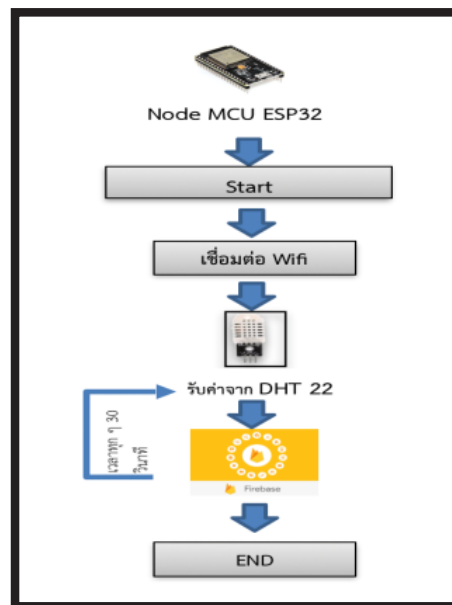


Figure 4 Flow chart of ESP 32 operation

**การติดตั้งห้องเย็นและเซ็นเซอร์**



Figure 5 Freezer containers at the experiment location

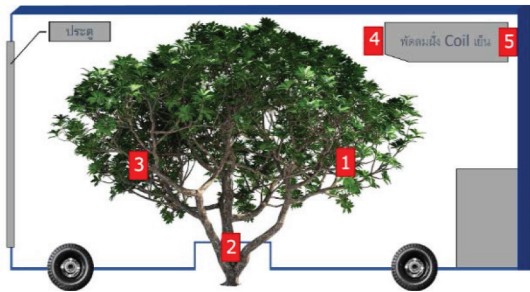


Figure 6 Sensor installation map

ผู้วิจัยได้ทำการจัดหาห้องเย็นเคลื่อนที่เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายออกในตอนกลางวันเพื่อรับแสงแดด และเลื่อนเข้าเพื่อครอบต้นไม้ในเวลาที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ โดยแปลงต้นมะยมชนิดที่ใช้ในการทดลองตั้งอยู่ที่จังหวัดนครนายก โดยทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (DHT 22) py'ตำแหน่งต่าง ๆ 6 ตำแหน่ง ดังแสดงใน Figure 6 ได้แก่

1. บริเวณกิ่งไม้ด้านใกล้คอยล์เย็น (temp1, humid1)
2. บริเวณโคนต้นไม้ (temp2, humid2)
3. บริเวณกิ่งไม้ด้านไกลคอยล์เย็น (temp3, humid3)
4. บริเวณช่องลมส่ง (temp4, humid4)
5. บริเวณช่องลมกลับ (temp5, humid5)
6. บรรยากาศภายนอก (temp6, humid6)

**ผลการออกแบบระบบติดตามอุณหภูมิ**

**กราฟข้อมูลที่ได้จากห้องเย็น**

กราฟแสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลในวันที่ 30-31 มีนาคม 2562 ซึ่งเป็นการลงพื้นที่เป็นครั้งที่สามวันที่ 30 มีนาคม 2562 ดำเนินการโดยเปิดเครื่องปรับอากาศตั้งแต่เวลา 04.29 น.-07.29 น. โดยตั้งค่าเครื่องปรับอากาศให้อยู่ที่ 15 องศาเซลเซียส

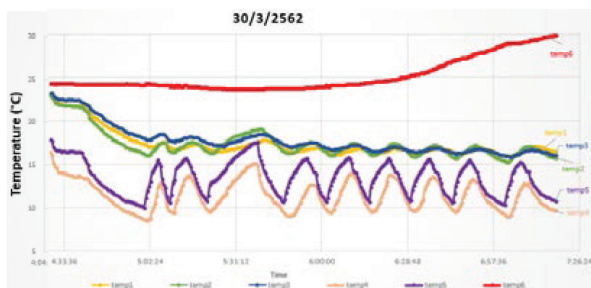


Figure 7 Temperature data on the 30<sup>th</sup> March 2019

จากข้อมูลพบว่า อุณหภูมิที่ช่องลมกลับซึ่งสามารถบ่งบอกอุณหภูมิภายในห้องโดยรวมได้มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 13.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิบริเวณต้นไม้ ได้แก่ ด้านใกล้คอยล์เย็นโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 17.4 องศาเซลเซียส ด้านที่ไกลคอยล์เย็นโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 17.4 องศาเซลเซียส บริเวณโคนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 17.8 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่า 19 องศาเซลเซียสแล้ว เนื่องจากตั้งอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศไว้ที่ 15 องศาเซลเซียส และมีการใช้ผ้าใบคลุมรอบห้องเย็น ในส่วนของความชื้นสัมพัทธ์ยังคงมีค่าสูงมากเนื่องจากการคายน้ำของต้นไม้ แต่ปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อการออกดอก<sup>8</sup>

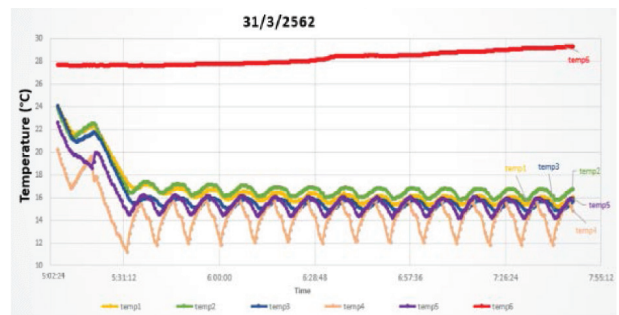
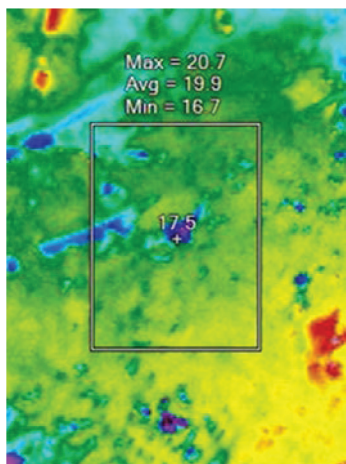


Figure 8 Temperature data on the 31<sup>st</sup> March 2019

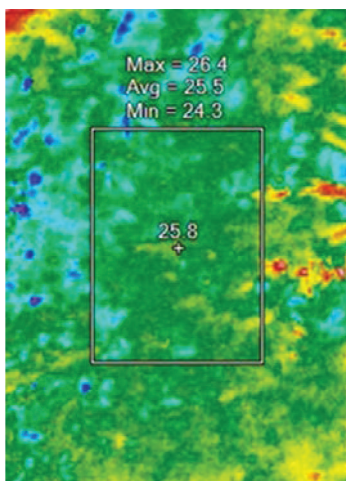
วันที่ 31 มีนาคม 2562 ดำเนินการเปิดเครื่องปรับอากาศตั้งแต่เวลา 05.11 น.-07.47 น. โดยตั้งค่าเครื่องปรับอากาศให้อยู่ที่ 15 องศาเซลเซียส จากข้อมูลพบว่า อุณหภูมิที่ช่องลมกลับซึ่งสามารถใช้บ่งบอกอุณหภูมิภายในห้องโดยรวมได้มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 15.9 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิบริเวณต้นไม้ ได้แก่ ด้านที่ใกล้คอยล์เย็น โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 16.8 องศาเซลเซียส ด้านที่ไกลคอยล์เย็นโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 16.2 องศาเซลเซียส บริเวณโคน โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 17.2 องศาเซลเซียส ในส่วนของความชื้นสัมพัทธ์ยังคงมีค่าสูงมากเนื่องจากการคายน้ำของต้นไม้

**รูปภาพจาก Thermo scan**

เพื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จากระบบติดตามอุณหภูมิ ผู้วิจัยจึงได้ทำการใช้ เครื่องตรวจจับภาพความร้อน หรือ Thermoscan ในการวัดอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอกห้องเย็นเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากระบบติดตามอุณหภูมิที่ได้ทำการออกแบบขึ้น



**Figure 9** Thermo scan measured the temperature inside the mobile freezer container on the 30<sup>th</sup> March 2019



**Figure 10** Thermo scan measured the temperature outside the mobile freezer container on the 30<sup>th</sup> March 2019

**สรุปและวิจารณ์ผล**

**ผลการดำเนินงาน**

1. งานวิจัยนี้สามารถสร้างชุดอุปกรณ์ติดตามอุณหภูมิและความชื้นภายในและภายนอกห้องเย็น เพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำการออกดอกของต้นมะยมชิตได้
2. ชุดอุปกรณ์สามารถเก็บค่าอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการออกดอกของต้นมะยมชิต โดยอาศัยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ DHT22 และอัปโหลดข้อมูลเข้าสู่บริการคลาวด์ Firebase โดย Node MCU ทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบการทำงานของระบบทำความเย็นได้ตลอดเวลา อีกทั้งยังสามารถใช้พิจารณาปัญหาเกิดขึ้นจากความผิดปกติต่าง ๆ ของระบบทำความเย็น

3. ข้อมูลจากเซนเซอร์แสดงให้เห็นว่าระบบทำความเย็นของห้องเย็นเคลื่อนที่สามารถทำความเย็นได้ตามที่ตั้งไว้ได้ เหมาะสมต่อการนำมาควบคุมอุณหภูมิเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำการออกดอกของต้นมะยมชิต

4. จากการทดลองแม้จะควบคุมอุณหภูมิภายในห้องเย็นให้อยู่ในช่วง 18 - 20 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่าแต่ยังไม่สามารถเหนี่ยวนำให้ต้นมะยมชิตออกดอกได้ ซึ่งอาจต้องมีการศึกษาช่วงอุณหภูมิอื่น ๆ ที่เหมาะสม หรือ ปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม

**กิตติกรรมประกาศ**

โครงการวิศวกรรมเครื่องกลเรื่อง การออกแบบระบบติดตามอุณหภูมิเพื่อเหนี่ยวนำการออกดอกของต้นมะยมชิตสำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาจาก ดร.ชินวัฒน์ ยัปวัฒน์พันธ์ อาจารย์ประจำคณะเกษตรภาควิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, นายปรภากร รัตนประภา, ห้องวิจัย PID ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำและสนับสนุนช่วยเหลือเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องตลอดโครงการงานจนเสร็จสมบูรณ์ และ นายอุทัย บำรุงจิตต์ เจ้าของสวนมะยมชิตที่ใช้ในการทดลองที่ให้ความกรุณา และเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ตลอดการทำงาน ขอขอบพระคุณ

**เอกสารอ้างอิง**

1. กองบริหารงานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา. (2560). Thailand 4.0 โมเดลขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน. ค้นเมื่อ 12 สิงหาคม 2561. <http://www.libarts.up.ac.th/v2/img/Thailand-4.0.pdf>
2. นาย ทองอินทร์ ถือมัน. (2560). โครงการส่งเสริมพัฒนาการผลิตมะปรางหวาน มะยมชิต อำเภอปากพลี จังหวัดนครนายก ปี 2553. ค้นเมื่อ 12 สิงหาคม 2561. <http://www.research.doae.go.th/webphp/webmaster/file-workres/1347258059006.pdf>
3. <https://www.dailynews.co.th/agriculture/635276>. ค้นเมื่อ 12 สิงหาคม 2561.
4. [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web\\_display/web-sample/Commercial\(PDF\)/Bay39%20Air%20Conditioning\\_Rev1.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/web-sample/Commercial(PDF)/Bay39%20Air%20Conditioning_Rev1.pdf). ค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2561.
5. <https://ienergyguru.com/2015/01/เครื่องปรับอากาศแบบsplit-type/หลักการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ>. ค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2561.
6. <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/how-to-build-an-arduino-energy->

monitor-measuring-current-only. คั้นเมื่อ 4 กันยายน  
2561.

7. ดร.ชินวัฒน์ ยัพัฒน์พันธ์. “โครงการแก้ปัญหามะยงชิด  
มะปรางหวานออกดอกติดผลน้อยจังหวัดนครนายก.”  
เอกสารวิจัยส่วนบุคคลคณะเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,  
2560.
8. ธนฤต มงคลกิจงาม. ห้องเย็นจากแอร์บ้านราคาประหยัด  
(ระบบตรวจวัดประสิทธิภาพการทำงาน). ปริญญาธิพนธ์  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2559;1(1):1-82
9. Chinawat Yapwattanaphun , Vusie L. Mavuso. Effect  
of environmental conditions on flower induction of  
marian plum (*Bouea burmanica* Griff), *Agriculture and  
Natural Resources* 51 (2017) 243-246

# โปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟuzzy

## Machine Health Condition using Multi data based on Neuro-Fuzzy system

วรกันต์ สัมฤทธิ์เดชขจร<sup>1</sup>, หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ<sup>2</sup>

Worakan Sumriddetkhajorn<sup>1</sup>, Hataitep Wongsuwarn<sup>2</sup>

Received: 12 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้และสร้างโปรแกรมตรวจสอบเครื่องจักร จากข้อมูลผสมที่ผู้ใช้สนใจ อาทิเช่น กระแสไฟมอเตอร์, การสั่นสะเทือน และ อุณหภูมิในน้ำมัน นั้นสามารถบ่งบอกถึงลักษณะความเสียหาย เพื่อทำนายสถานะภาพของเครื่องจักร เพื่อให้วิศวกรสามารถนำไปตรวจสอบและวางแผนซ่อมบำรุงอย่างถูกต้อง โดยการดูค่าความเร็วรอบและขนาดตามมาตรฐานสากล (ISO) ในแต่ละรูปแบบซึ่งจะเป็นประโยชน์แก่อุตสาหกรรมหลากหลายประเภท อาทิเช่น เครื่องบิน โรงไฟฟ้า เป็นต้น โดยการทดลองนั้นใช้วิธีการเก็บค่าจากการที่นำไปโปรแกรมและเครื่องมือรวมถึงตัวตรวจรู้ นำไปทดสอบกับเครื่องจักรจำลองซึ่งในการทดลอง มีการปรับรอบการเดินเครื่องของมอเตอร์ของเครื่องจักรและมีการเพิ่มมวลบนแกนของมอเตอร์เพื่อสังเกตและเปรียบเทียบค่าที่แตกต่างระหว่างรอบการหมุนของมอเตอร์และสังเกตการแสดงผลผ่านหน้าต่างของโปรแกรม ในบทความนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดในการตรวจสอบในการตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรระหว่าง ระบบฟuzzyลอจิก และ ระบบนิวโรฟuzzyลอจิก บนโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ของข้อผิดพลาดจาก ระบบฟuzzyลอจิก พบว่ามีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 70% ถึง 140% ซึ่งพบว่ามีค่าความผิดพลาดที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบนิวโรฟuzzyลอจิก ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 3% ถึง 37% เนื่องจากระบบนิวโรฟuzzyลอจิก ได้เรียนรู้จากข้อมูลจริงแต่ในทางกลับกันระบบฟuzzyลอจิก เรียนรู้จากการออกแบบและถูกอ้างอิงตามข้อมูลจากค่ามาตรฐานสากล (ISO)

**คำสำคัญ:** ระบบนิวโรฟuzzy, ข้อมูลผสม, ซ่อมบำรุงเครื่องจักร.

### Abstract

This paper reports the development of hybrid monitoring and analysis software for those who are interested in hybrid analysis. When the machines were operating, the situations that made motor current, vibration and oil could demonstrate the characteristics of machinery status. Somehow, to provide engineers could detect and make maintenance plans by observing and collecting the data as speed and magnitude to compare with ISO standards. This may be of benefit in many industries such as aerospace and industrial power plant etc.

In the experiment, the software may collect the data from a sensor through NI hardware. To experiment the project for testing by using the virtual machine, the experiment has gone through the motor rotation and add the mass on shaft to compare the data and distinguish the status that shows upon interface the program. In this paper, the performance was analysed based on the RMSE between fuzzy logic and Neuro-fuzzy systems on MATLAB. The result errors obtained from fuzzy logic of 70% to 140% were relatively higher if compared to Neuro-fuzzy systems of 3% to 37% due to Neuro-fuzzy training from real hybrid data but fuzzy systems designed reference follow ISO standard.

**Keywords:** Neuro-fuzzy system, Hybrid data, Machine Health.

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท, <sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

<sup>1</sup> Master degree student, <sup>2</sup>Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand

\* Corresponding author; Hataitep Wongsuwarn, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand. fenghtw@ku.ac.th



**บทนำ**

เนื่องจากการวิเคราะห์แบบข้อมูลผสมถูกนำมาใช้ในการวินิจฉัยความผิดปกติของเครื่องจักรหมุนด้วยระบบนิวโรฟัซซีลอจิก เมื่อเครื่องจักรทำงานจะเกิดกระแสไฟมอเตอร์, อนุภาคในน้ำมัน และการสั่นสะเทือน นั้นสามารถบ่งบอกลักษณะความเสียหายเพื่อทำนายสถานะภาพของเครื่องจักรโดยการวัดและวิเคราะห์ข้อมูลผสมของเครื่องจักรที่เป็นไปได้ในลักษณะและความรุนแรงของสิ่งผิดปกติ ด้วยเหตุนี้การทำนายอายุการใช้งานก่อนเครื่องจักรจะเสียหาย<sup>1,2</sup> อย่างไรก็ตามเพื่อให้วิศวกรสามารถตรวจสอบและวางแผนการซ่อมบำรุงโดยจากการสังเกตและรวบรวมข้อมูลเป็นความเร็วยวและขนาดมาตรฐาน ISO จากการพัฒนาแปลงฟูเรียร์ (FFT) ในปี 1965<sup>3</sup> ทำให้พัฒนาเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบเรียลไทม์ในเชิงพาณิชย์ เมื่อการใช้เครื่องมือวิเคราะห์เหล่านี้แพร่หลายมากขึ้นจึงเป็นที่มาของผู้เขียนอธิบายถึงผลกระทบความผิดปกติของเครื่องจักรต่างๆ จากข้อมูลผสมและแสดงวิธีการวินิจฉัยเหล่านี้โดยการใช้การวิเคราะห์จากข้อมูลผสม<sup>4,6</sup>

จากปัญหาที่ขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญจึงเป็นที่มาของการวิเคราะห์โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์หรือ AI อย่างฟัซซีลอจิก และนิวโรฟัซซีลอจิก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ โดยนำข้อมูลการสั่นสะเทือน, กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ และ อนุภาคในน้ำมัน มาใช้กับระบบนิวโรฟัซซีลอจิก เนื่องจากเทคนิคอย่างนิวโรฟัซซีลอจิก สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า จากการใช้โครงสร้าง Feed-Forward Neural Network<sup>7</sup>

จึงมีการปรับแต่งสมาชิกให้เหมาะสมและถูกต้องที่สุด โดยจำลองการทดสอบบนโปรแกรม MATLAB จึงเป็นที่มาของบทความฉบับนี้ไปพัฒนาในการออกแบบโปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก และถ้ามีระบบโปรแกรมตรวจสอบอัจฉริยะนี้ สามารถเข้ามาแทนที่คนและช่วยเหลือโรงงานที่ขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญต่อไปได้

**วัตถุประสงค์**

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพจากค่าความผิดพลาดจากการตัดสินใจระหว่าง ระบบฟัซซีลอจิก และ ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก ด้วยข้อมูลผสมเพื่อนำการศึกษานี้ไปพัฒนาในการออกแบบโปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก และสามารถเข้ามาแทนที่คนและช่วยเหลือโรงงานที่ขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญต่อไปได้

**วิธีการวิจัย**

**Fuzzy Logic**

เริ่มต้นแนวคิดของชุดฟัซซีลอจิกคือชุดที่ไม่มีขอบเขตและขอบเขตชัดเจนมีองค์ประกอบอย่างชุดสมาชิกฟัซซี นิยามเป็นสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากความชันมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 (ซึ่งมีความยาว 0 หรือมากกว่า) และความชันที่ต่ำลงและสามารถกำหนดฟังก์ชัน sigmoid<sup>8</sup> กรณีทั่วไปหนึ่งกรณีคือฟังก์ชัน logistic ตามที่กำหนดไว้

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{1}$$

ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

$$S(x) + S(-x) = 1 \tag{2}$$

สมการดังกล่าว

$$(S(x) + S(-x)) \cdot (S(y) + S(-y)) \cdot (S(z) + S(-z)) = 1 \tag{3}$$

**กฎ IF-THEN อินพุตหรือคำนวณค่าความเป็นจริงถึงค่าเอาต์พุตที่เป็นจริง**

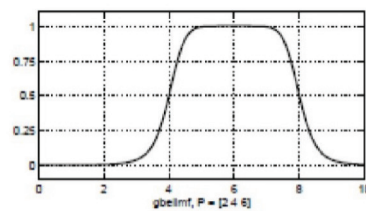
If x is A then y is B.

ฟัซซีเซตฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ( Fuzzy Set Membership Function ) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งานโดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความ ไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซีเพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหาโดยฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้ ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ที่ใช้งานในบทความฉบับนี้คือ

ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped Membership Function)

ฟังก์ชันระฆังคว่ำมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่าคือ {a, b, c}

$$gbellmf(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}}$$



gbellmf

Figures 1. Bell-shaped Membership Function.

**ANFIS Structure**

พิจารณาจากชนิด Sugeno ของระบบ fuzzy มีพื้นฐานจากกฎ

1. if x is  $A_1$  and y is  $B_1$ , then  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$ .
2. if x is  $A_2$  and y is  $B_2$ , then  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ .

ให้ฟังก์ชันสมาชิกของชุดฟuzzy  $A_i, B_i, i=1,2$ , be  $m_{A_i}, m_{B_i}$

ในการคำนวณค่าของกฎ เลือกผล T-norm<sup>9</sup>

1. ผลของกฎ

$$W_i = m_{A_i}(x)m_{B_i}(y), i=1,2. \tag{4}$$

2. ผลที่ตามมาของกฎ

$$f(x,y) = \frac{w_1(x,y)f_1(x,y) + w_2(x,y)f_2(x,y)}{w_1(x,y) + w_2(x,y)} \tag{5}$$

หรือจากการพิสูจน์

$$f = \frac{w_1f_1 + w_2f_2}{w_1 + w_2} \tag{6}$$

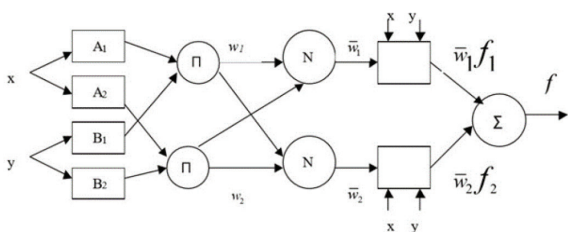
สามารถแยกจากสมการหลักได้คือ

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \tag{7}$$

และ f สามารถเขียนในรูปสมการ

$$f = \bar{w}_1f_1 + \bar{w}_2f_2 \tag{8}$$

การคำนวณสามารถเขียนในรูปไดอะแกรม<sup>9</sup>



**Figures 2.** Neuro-fuzzy diagram form.

**Root Mean Square Error**

สมมติว่ามี n ตัวอย่างของแบบจำลองที่คำนวณผิดพลาด ( $e_i, i = 1,2,\dots,n$ )<sup>10</sup> ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดหรือวิธีการใช้เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองและข้อมูลที่ไม่ถูกพิจารณา นอกจากนี้ค่ายังไม่เบี่ยงเบน จึงสามารถสมมติชุดตัวอย่างค่าความผิดพลาด RMSE ถูกคำนวณในชุด

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \tag{9}$$

**วิธีการออกแบบสมาชิกฟuzzyลอจิกบน MATLAB**

การแก้ไขสมาชิกเป็นเครื่องมือที่แสดงและแก้ไขฟังก์ชันสมาชิกทั้งหมดที่เกี่ยวข้องจากข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุตของระบบฟuzzyลอจิก การแก้ไขสมาชิกขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบแสดงในตารางและหัวข้อดังต่อไปนี้

**การออกแบบสมาชิกฟuzzyลอจิกสำหรับค่าการสั่นสะเทือนและอุณหภูมิ**

การออกแบบอินพุต 2 อินพุตแบบ “gbellmf” แต่ละอินพุตสร้าง 3 สมาชิก ของฟuzzyลอจิกโดยนำช่วงอินพุตจากค่ามาตรฐานจาก Table 1-2. การสั่นสะเทือนที่เป็นค่าความเร็ว มีหน่วยเป็น mm/sec ตามเกณฑ์มาตรฐานสากลอย่าง ISO10816-3 และอุณหภูมิในหน่วย °C ซึ่งผลลัพธ์ของเอาต์พุตแสดงเป็นสีเขียว, สีส้ม และสีแดงตามลำดับความรุนแรงจากน้อยไปมาก

**Table 1.** Vibration (RMS) ISO10816-3 for design membership Fuzzy Logic.

Input 1 Vibration (mm/sec)	Output
0-4.5	Good
4.5-11.2	Caution
> 11.2	Waring

**Table 2.** Temp for design membership Fuzzy Logic.

Input 2 Temp (°C)	Output
0-80	Good
80-90	Caution
> 90	Waring

**การออกแบบสมาชิกฟuzzyลอจิกสำหรับจำนวนอนุภาคในน้ำมันและความหนืดของน้ำมัน**

การออกแบบอินพุต 4 อินพุตแบบ “gbellmf” แต่ละอินพุตสร้าง 3 สมาชิก ของฟuzzyลอจิกโดยนำช่วงอินพุตจากค่ามาตรฐานจาก Table 3-6. จำนวนอนุภาคในน้ำมันโดยแบ่งเป็น 4 ไมครอน, 6 ไมครอนและ 14 ไมครอนมีหน่วยเป็น จำนวนอนุภาค/100มล. ตามเกณฑ์มาตรฐานสากลอย่าง ISO4406 และค่าความหนืดของน้ำมันในหน่วย mm<sup>2</sup>/s ซึ่งผลลัพธ์ของเอาต์พุตแสดงเป็นสีเขียว, สีส้ม และสีแดงตามลำดับความรุนแรงจากน้อยไปมาก

**Table 3.** Oil 4 microns ISO4406 for design membership Fuzzy Logic.

Number of Particles 4 Microns	Input 1 Scale number	Output
0-5000	0-19	Good
5000-20000	20-21	Caution
20000-160000	22-24	Waring

**Table 4.** Oil 6 microns ISO4406 for design membership Fuzzy Logic.

Number of Particles 6 Microns	Input 2 Scale number	Output
0-1300	0-17	Good
1300-5000	18-19	Caution
5000-160000	20-24	Waring

**Table 5.** Oil 14 microns ISO4406 for design membership Fuzzy Logic.

Number of Particles 14 Microns	Input 3 Scale number	Output
0-160	0-14	Good
160-640	15-16	Caution
640-160000	17-24	Waring

**Table 6.** Oil Viscosity for design membership Fuzzy Logic.

Range Viscosity (mm <sup>2</sup> /s)	Input 4 Viscosity Class	Output
1.98-7.48	VG2-VG7	Good
9-11	VG10	Caution
> 11	> VG10	Waring

การออกแบบสมาชิกฟัซซีลอจิกสำหรับค่าไฟฟ้า การออกแบบอินพุต 7 อินพุตแบบ "gbellmf" แต่ละ อินพุตสร้าง 3 สมาชิก ของฟัซซีลอจิกโดยนำช่วงอินพุตจาก ค่ามาตรฐานจากตารางที่ 7-13. อย่าง Current Imbalance, Current Imp. Imbalance โดยค่าเป็น % และ Fp Amplitude, Peak One, Peak Two, Peak Three และ Peak Four โดยค่า เป็น dB ซึ่งผลลัพธ์ของเอาต์พุตแสดงเป็นสถานะสีเขียว, สีส้ม และสีแดงตามลำดับความรุนแรงจากน้อยไปมาก

**Table 7.** Current Imbalance (%) for design membership Fuzzy Logic.

Input 1 Imbalance (%)	Output
0-6	Good
6-10	Caution
10-20	Waring

**Table 8.** Current Imp. Imbalance (%) for design membership Fuzzy Logic.

Input 2 Imp. Imbalance (%)	Output
0-7	Good
7-12	Caution
>12	Waring

**Table 9.** Current F<sub>p</sub> Amplitude (dB) for design membership Fuzzy Logic.

Input 3 Fp Amplitude (Delta dB)	Output
>48	Good
36-48	Caution
<36	Waring

**Table 10.** Current Peak One (dB) for design membership Fuzzy Logic.

Input 4 Peak One (Delta dB)	Output
0-10	Good
10-20	Caution
> 20	Waring

**Table 11.** Current Peak Two (dB) for design membership Fuzzy Logic.

Input 5 Peak Two (Delta dB)	Output
0-10	Good
10-20	Caution
> 20	Waring

**Table 12.** Current Peak Three (dB) for design membership Fuzzy Logic.

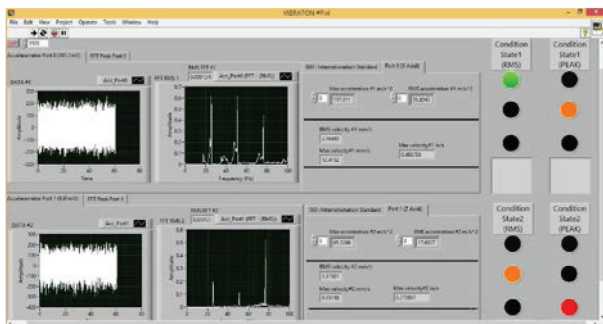
Input 6 Peak Three (Delta dB)	Output
0-10	Good
10-20	Caution
> 20	Warning

**Table 13.** Current Peak Four (dB) for design membership Fuzzy Logic.

Input 7 Peak Four (Delta dB)	Output
0-10	Good
10-20	Caution
> 20	Warning

**การนำไปใช้**

เพื่อสร้างโปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิเวศฟัซซีลอจิกให้ถูกต้องและแม่นยำขึ้น จากหน้าต่างโปรแกรมดังแสดง Figure 3. ในส่วนด้านขวาของโปรแกรม แสดงถึงสถานะเครื่องจักรด้วยหลอดไฟทั้งหมด 3 สถานะ คือ เขียว, ส้ม และ แดง ตามลำดับ ความรุนแรงจากน้อยไปมาก เพื่อสำหรับผู้ใช้ในการวางแผนการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) และทราบถึงปัญหาจากขนาดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ที่ใช้ในอุตสาหกรรมตามมาตรฐานสากล ISO ส่วนหน้าต่างโปรแกรมด้านซ้ายแสดงกราฟเชิงความถี่ สำหรับผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์อุปกรณ์ในเครื่องจักรที่เสียหาย

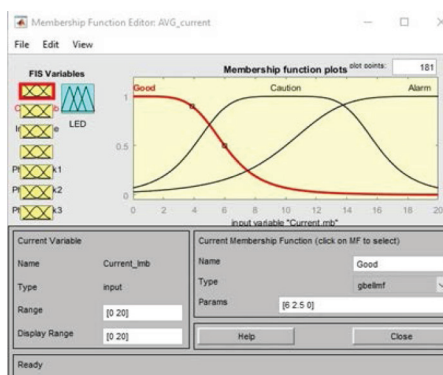


**Figures 3.** Vibration diagnostic systems based on Fuzzy logic Follow ISO 10816-3 Type G2/4 Rigid Speed 1500 RPM.

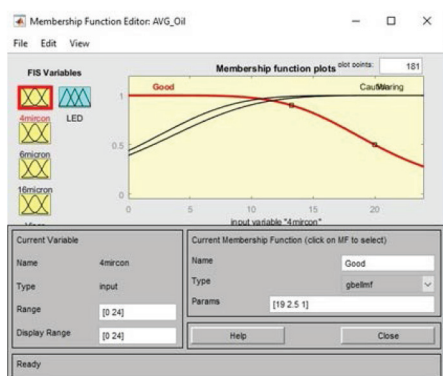
**การทดลอง**

**การออกแบบระบบ Fuzzy Logic ด้วยข้อมูลผสม**

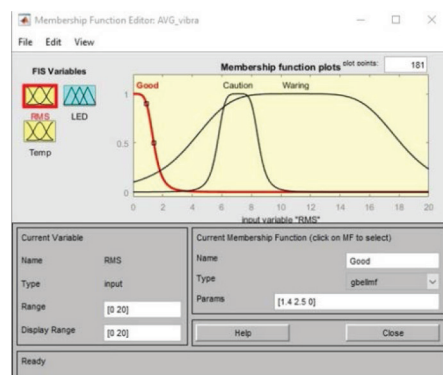
ในส่วนนี้ได้ถูกกล่าวไว้ตอนต้นสำหรับการออกแบบสมาชิกฟัซซีลอจิก เพื่อสร้างฟังก์ชันสมาชิกของมาตรฐาน ISO ของข้อมูลอินพุตอย่างกระแสไฟมอเตอร์, อนุภาคในน้ำมัน และการสั่นสะเทือน จาก 0 ถึง 200 , 0 ถึง 24 และ 0 ถึง 20 ในการกำหนดช่วงข้อมูลเอาต์พุต กำหนดช่วงที่ 1 ถึง 3 กำหนดฟังก์ชันสมาชิกแบบ “gbellmf” ดังแสดงใน Figure 4-6



**Figures 4.** Membership of Input for Current Analysis.



**Figures 5.** Membership of Input for Oil Analysis.



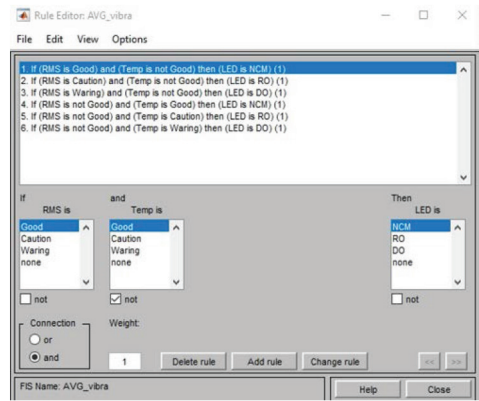
**Figures 6.** Membership of Input for Vibration Analysis.

การสร้างกฎโดยใช้กราฟิกในการแก้ไขกฎเพื่อให้ชัดเจน ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตขึ้นอยู่กับการกำหนดด้วยตนเองจากการออกแบบแบบฟัชซีลอจิก ทำให้สร้างกฎได้โดยอัตโนมัติ

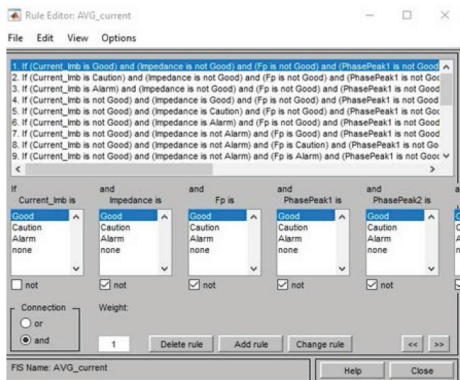
ตัวอย่างสร้างกฎข้อมูลของการวิเคราะห์หอนุภาคในน้ำมัน :

1.If (4 microns is good) and (6 microns is not good) and (14 microns is not good) then (LED is NCM) (1)

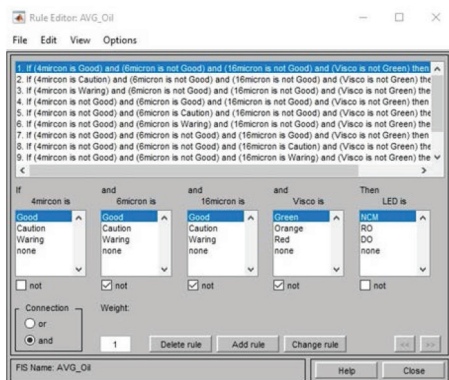
ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงน้ำหนักที่สามารถใช้กับกฎแต่ละข้อและกำหนดได้โดยใส่ตัวเลขที่ต้องการระหว่าง 0 ถึง 1: การตั้งค่า ถ้าไม่ได้รับบอกราคาคือ 1 ดังแสดงใน Figure 7-9



Figures 9. Total 6 rules of Vibration Analysis.



Figures 7. Total 21 rules of Current Analysis.



Figures 8. Total 12 rules of Oil Analysis.

การออกแบบระบบ Neuro-Fuzzy Logic ด้วย

ข้อมูลผสม

ในส่วนนี้แสดงวิธีการใช้งานของ ANFIS ทั้งหมด 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1.นำข้อมูลอินพุต 2.ตั้งค่า FIS 3. เรียนรู้ข้อมูล FIS 4.ทดสอบข้อมูล FIS<sup>11</sup>. ดัง Figure 10. เป็นตัวอย่างจากข้อมูลผสมอย่างข้อมูลอย่างกระแสไฟมอเตอร์, อุณหภูมิในน้ำมัน และ การสั่นสะเทือน ผลจากการเรียนรู้ข้อมูลแต่ละชนิดอยู่ที่ 150 ข้อมูลและสุ่มข้อมูลจากแต่ละชนิด 10% ดังแสดงใน Table 14-16

Table 14. Motor Current Data for Test.

Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Input 5	Input 6	Input 7	Output
0.3	0.4	62	4.5	-9.8	-8.3	-4.4	1
0.6	2.2	63	26	43	30	10	1

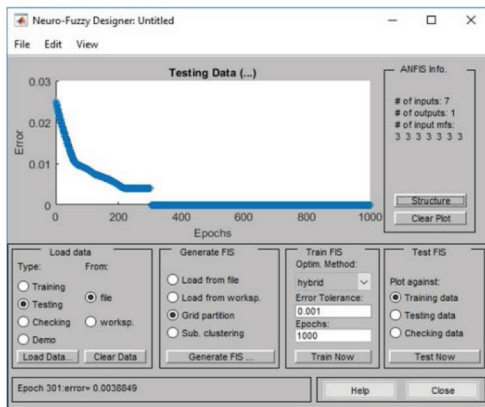
Table 15. Oil Data for Test.

Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Output
65.68	21227.8	6724.7	412.9	3
65.5	10751.7	3131.1	203.7	2

Table 16. Vibration Data for Test.

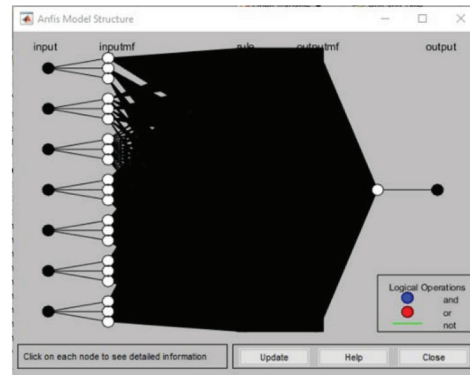
Input 1	Input 2	Output
30	0.64	1
50	2.03	2

เพื่อนำมาทดสอบและออกแบบสมาชิกแต่ละต้นแบบๆ ละ 3 สมาชิก กำหนดชนิดสมาชิกแบบ “gbellmf” การคำนวณค่าความผิดพลาดเกิดหลังจากการทดสอบข้อมูลข้อมูลผสมซึ่งค่าที่ยอมรับได้คือ 0 แต่ในทางปฏิบัติจริงไม่สามารถทำเช่นนั้นได้ ดังนั้นจึงกำหนดอยู่ที่ 0.001 และ Epochs บอกถึงจำนวนรอบของการเรียนรู้ข้อมูลผสม ตั้งนั้รอบที่ตั้งไว้ 1000 รอบ



Figures 10. The testing data appears in the slope down plot in the y-axis of the GUI.

หลังจากสร้าง FIS สามารถดูโครงสร้างหลังจากนำข้อมูลการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟเข้าทดสอบตาม Figure 11



Figures 11. The model structure ANFIS of Current Analysis.

### วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

Table 17. RMSE estimation performances compared among different Fuzzy Logic models and Neuro-Fuzzy Logic models.

Type Data	RMSE Test Fuzzy	RMSE Test Neuro-Fuzzy
Current Average	0.9487	0.003885
Current Maximum	0.8367	0.032672
Oil Average	1.4142	0.37357
Oil Maximum	0.7746	0.37688
Vibration Average	0.5477	0.31682
Vibration Maximum	0.7071	0.32356

ในบทความวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพจากค่าความผิดพลาดระหว่าง ระบบฟัซซีลอจิก และ ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก จากการประเมินความสามารถเพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคอย่างนิวโรฟัซซีลอจิก และ ฟัซซีลอจิก ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเทคนิคอย่างนิวโรฟัซซีลอจิก สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยทดสอบบนโปรแกรม MATLAB จากการทดสอบพบว่าผลของค่าความผิดพลาดที่ได้ของฟัซซีลอจิกอยู่ที่ 70% ถึง 140% ซึ่งมีค่าความผิดพลาดที่สูงถ้าเทียบกับระบบนิวโรฟัซซีลอจิก

ดังแสดง Figure 17. เนื่องจากค่าความผิดพลาดนิวโรฟัซซีลอจิกอยู่ที่ 3% ถึง 37% เนื่องจากเรียนรู้จากข้อมูลผสมจริง แต่ฟัซซีลอจิกถูกออกแบบโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน (ISO) จากตารางดังกล่าว สามารถอธิบายถึงค่าที่ผิดพลาดของฟัซซีลอจิกที่เกิน 0.5 ตัวอย่างเช่น ค่าเอาท์พุทที่ได้จากการตัดสินใจของฟัซซีลอจิกคือ 1.55 ค่าเอาท์พุทจะถูกทำให้เป็น 2 หรือสถานะแจ้งจากปลอดภัยจะถูกเปลี่ยนเป็นสถานะเริ่มแสดงอาการความเสียหายของเครื่องจักรแต่ในทางกลับกัน จากค่าที่

ผิดพลาดของนิวโรฟัซซีลอจิกที่ไม่เกิน 0.5 จะทำให้ค่าเอาท์พุทที่ได้คือ 1.37 ค่าเอาท์พุทจะถูกทำให้เป็น 1 ซึ่งมีความแม่นยำใกล้เคียงกับผู้เชี่ยวชาญจึงเป็นที่มาของบทความวิจัยฉบับนี้เพื่อนำบทความวิจัยฉบับนี้ไปพัฒนาในการออกแบบโปรแกรมตรวจสอบความเสียหายเครื่องจักรด้วยข้อมูลผสมโดยใช้ระบบนิวโรฟัซซีลอจิก และถ้ามีระบบโปรแกรมตรวจสอบอัจฉริยะนี้สามารถเข้ามาแทนที่คนและช่วยเหลือโรงงานที่ขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญต่อไปได้

### กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผศ.ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิจัย ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษาความรู้ความเข้าใจ แนวทางการทำงาน และ อุปกรณ์ต่างๆ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล และศูนย์พัฒนานวัตกรรมแมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์(IMERs) คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

### เอกสารอ้างอิง

1. R. F. M. Marcal, M. Negreiros, A. A. Susin, J.L.Kovaleski. Detecting faults in rotating machines. *Instrumentation&Measurement*. 2000; 3(4):24-26.
2. P. A. Laggan. Vibration monitoring. *IEE Colloquium on Understanding your Condition Monitoring*. 1999;1-11.
3. J. W. Cooley, J. W. Tukey. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computing*. 1965;19:297-301.
4. H. Minns, R. M. Stewart. An introduction to condition monitoring with special reference to rotating machinery. *Workshop In On-Condition Maintenance, Section 8, Institute of Sound And Vibration Research, University of South Ampton*, 1972.
5. N. S. Swansson, Application of vibration signal analysis techniques to signal monitoring. *Conference on Friction and Wear In Engineering, Institution of Engineers, Australia*. 1980;262-267.
6. S. Farokhzad, H. Ahmadi, A. Jaefari, M.R.AsadiAsad Abad, M. Ranjbar Kohan. Artificial neural network based classification of faults in centrifugal water pump. *Vibroengineering*. 2012;14(4):1734-1734.
7. S. M. Yang, Y. J. Tung, Y. C. Liu. A NEURO-FUZZY SYSTEM DESIGN METHODOLOGY FOR VIBRATION CONTROL. *Asian Journal of Control*, 2005 Dec ;7(4):393-400.
8. Wierman, Mark J. *An Introduction to the Mathematics of Uncertainty: including Set Theory, Logic, Probability, Fuzzy Sets, Rough Sets, Evidence Theory*. Creighton University. 2012 July 30.
9. Li-Xin Wang. *A Course in Fuzzy Systems and Control*. The Hong Kong University of Science and Technology.
10. T. Chai<sup>1,2</sup>, R. R. Draxler<sup>1</sup>. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? –Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geosci* 2014;7:1247–1250.
11. Lotfi A. Zadeh, Berkeley. *Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB*. CA; January 10. P. 112-123 (vol. 2).

## การวิเคราะห์การผสมกันของพอลิแอลแล็กไทด์และพอลิดีแล็กไทด์ด้วยวิธีการหล่อฟิล์ม Characterization of Poly(L-lactide) and Poly(D-lactide) blends by solution casting process

ทิพย์ธิดา อัครกะประสา<sup>1</sup>, ยศฐา ศรีเทพ<sup>2</sup>

Thiptida Akkaprasa<sup>1</sup>, Yottha Srithep<sup>2</sup>

Received: 12 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

### บทคัดย่อ

พอลิแล็กไทด์เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่นิยมใช้มากที่สุด การเพิ่มเสถียรทางความร้อนและสมบัติทางกลของพอลิแล็กไทด์ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานทางอุตสาหกรรมได้หลากหลายขึ้น พอลิแล็กไทด์มีสองไอโซเมอร์คือ พอลิแอลแล็กไทด์ (PLLA) และพอลิดีแล็กไทด์ (PDLA) การผสมของ PLLA และ PDLA ทำให้เกิดสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 220-230°C สูงกว่า PLLA หรือ PDLA มากกว่า 50°C ในการทดลองนี้ PLLA และ PDLA ถูกผสมเข้าด้วยกัน ด้วยวิธีการหล่อฟิล์ม ซึ่งมีไคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย โดยมีอัตราส่วน PLLA:PDLA ที่ 100:0, 90:10, 70:30, 50:50, 30:70, 10:90 และ 0:100 ฟิล์มที่ได้จากการผสม ถูกทดสอบสมบัติทางกลด้วยวิธีการดึง การวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อน และจุดหลอมเหลว จากผลการทดลองพบว่า การผสม PLLA:PDLA ที่ 50:50 ทำให้จุดหลอมเหลวมีค่าประมาณ 225°C ในขณะที่จุดหลอมเหลวของ PLLA และ PDLA มีค่าประมาณ 172-175°C นอกจากนี้วัสดุผสมยังมีค่าความเค้นสูงสุดสูงกว่า PLLA หรือ PDLA มากกว่า 55% รวมทั้งเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PLLA และ PDLA

**คำสำคัญ:** ฟิล์ม พอลิแอลแล็กไทด์ พอลิดีแล็กไทด์ สเตอริโอคอมเพล็กซ์

### Abstract

Poly lactide is the most widely used biodegradable polymer. The high thermal stability and mechanical properties of poly lactide makes permit a wide range of industrial applications. Poly lactide has two isomers; Poly (L-lactide) (PLLA) and Poly (D-lactide) (PDLA). Blended PLLA and PDLA forms in a stereocomplex have melting points around 220-230°C higher than pure PLLA or PDLA 50°C. In this experiment, PLLA and PDLA were blended by a solution casting process using dichloromethane as solvent. The ratios of PLLA:PDLA were 100:0, 90:10, 70:30, 50:50, 30:70, 10:90 and 0:100. The blended films were then tested for their mechanical properties and thermal stability. The results showed that PLLA:PDLA at 50:50 had only one melting point around 225°C while the melting temperatures of neat PLLA and PDLA were about 172-175°C. Moreover, the blend materials also had higher tensile strength than pure PLLA or PDLA 55% as well as higher thermal stability than pure PLLA or PDLA.

**Keywords:** Film, Polylactide, Poly(L-lactide), Poly (D-lactide), Stereocomplex

### บทนำ

พอลิแล็กไทด์เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้มาจากการผลิตทางการเกษตร เช่น อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง<sup>1</sup> พอลิแล็กไทด์มีข้อดีอยู่หลายประการ ทำให้พอลิแล็กไทด์กำลังได้รับความนิยมอย่างมากในทางวิจัยและอุตสาหกรรมในปัจจุบัน มีข้อดีคือมีสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซ

น้ำหนักเบา ไม่เป็นพิษ และราคาถูก สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติเมื่อออกสู่สภาพแวดล้อม โดยใช้เวลานับวันเร็ว<sup>2</sup> เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น Polystyrene และ Polyethylene โดยพลาสติกเหล่านี้มีปริมาณการตกค้างของพลาสติกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถึงแม้ว่าการกำจัดจะสามารถทำได้โดยการรีไซเคิล

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

\* E-mail: yottha.s@msu.ac.th



หรือนำกลับมาใช้ใหม่ การฝังกลบ หรือการเผา แต่กระบวนการกำจัดพอลิเมอร์ที่มาจากปิโตรเคมีล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น

พอลิแล็กไทด์ผลิตจากวัสดุชีวภาพซึ่งจะถูกนำมาหมักเพื่อให้ได้กรดแลคติก สำหรับใช้เป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยนิยมเปลี่ยนโครงสร้างกรดแลคติกให้เป็นโครงสร้างวงแหวนที่เรียกว่าแล็กไทด์ ก่อนที่จะนำไปสังเคราะห์ PLA ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงแหวน พอลิแล็กไทด์มีสองไอโซเมอร์คือ พอลิแอลแล็กไทด์ (PLLA) และพอลิดีแล็กไทด์ (PDLA) ซึ่งสามารถผลิตได้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนมอนอเมอร์ พอลิแล็กไทด์ที่มีแอลแล็กไทด์เป็นสัดส่วนโดยมาก จะมีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีดีแล็กไทด์เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้นจะเป็นพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ความเป็นผลึกลดลงและเป็นพอลิเมอร์ไม่มีรูปร่างหรือไม่มีรูปร่างที่แน่นอน (Amorphous) สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันในสายโซ่พอลิเมอร์<sup>3</sup> ทำให้พอลิแล็กไทด์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติได้หลากหลาย จึงสามารถปรับ เปลี่ยนแปลงหรือขึ้นรูปให้มีรูปร่างและขนาดตามความต้องการใช้งานได้กว้างขึ้น

อย่างไรก็ตามพอลิแล็กไทด์ทนความร้อนได้น้อย จึงเกิดงานวิจัยที่ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อเพิ่มความสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในด้านบรรจุภัณฑ์ การแพทย์ และอุตสาหกรรม<sup>4</sup> คุณสมบัติของพอลิแล็กไทด์ที่ควรปรับปรุงเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย โดยงานวิจัยก่อนหน้านีพบว่า พอลิแอลแล็กไทด์ และพอลิดีแล็กไทด์สามารถผสมด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูปเกิดเป็นโครงสร้างสเตอริโอคอมเพล็กซ์ (Stereo-complex) โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ค่อนข้างสูงประมาณ 220-230 °C<sup>5</sup> จึงเกิดงานวิจัยนี้ขึ้นโดยมีความต้องการที่จะศึกษาการผสมกันของพอลิแอลแล็กไทด์และพอลิดีแล็กไทด์ที่อัตราส่วนต่างๆด้วยวิธีการหล่อฟิล์ม เพื่อปรับปรุงการเพิ่มเสถียรทางความร้อนและสมบัติทางกล และทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ โดยการทดสอบสมบัติทางกลด้วยวิธีการดึง การวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry

**วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย**

การเตรียมวัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ เม็ดพอลิแลคติกแอซิดเกรด L175 และ D070 ซื้อมาจากบริษัท Corbion โดยข้อมูลจากผู้ผลิตถูกแสดงใน Table 1 จากนั้นนำเม็ด PLLA และ PDLA ผสมกัน

ในอัตราส่วน PLLA:PDLA 100:0, 90:10, 70:30, 50:50, 30:70, 10:90 และ 0:100 มาละลายในไดคลอโรมีเทน ที่อัตราส่วนไดคลอโรมีเทนต่อเม็ดพลาสติก 80:10 จากนั้นนำไปเข้าเครื่องกวนสารละลายโดยใช้เครื่อง Hotplate Stirrer รุ่น MS300 magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนเห็นสารละลายใสเป็นเนื้อเดียวกัน

**Table 1** PLA resin properties by Total Corbion PLA<sup>6</sup>

Resin	%isomer	T <sub>m</sub> (°C)	MFI (210°C/2.16kg)
PLLA L175	>99%L	175	6
PDLA D070	>99%D	175	>75

**การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล**

ทำการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของเม็ดพลาสติกด้วยเทคนิค GPC (Gel Permeation Chromatography) โดยมีขั้นตอนดังนี้ ละลาย PLLA และ PDLA ปริมาณ 7.5 มิลลิกรัม ด้วย Tetrahydrofuran (THF) ปริมาณ 3 มิลลิลิตร ด้วยการคนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิประมาณ 60°C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง สารละลายที่ได้จะถูกกรองผ่าน 0.2µm PTFE membrane หลังจากนั้นสารละลายประมาณ 100 มิลลิลิตร จะถูกฉีดเข้าไปในเครื่อง GPC (Agilent Technologies, 1260 Infinity II) ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ระบบได้รับการสอบเทียบโดยใช้มาตรฐานพอลิสไตรีน

**การผลิตแผ่นฟิล์ม**

สารละลายที่ได้จะถูกนำมาผลิตเป็นแผ่นฟิล์ม โดยการบรรจุในหลอดฉีดยาให้ได้ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ฉีดลงในจานเพาะเชื้อแบบแก้ว (petri dish) ขนาด 5x5 เซนติเมตร และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง<sup>7</sup>

**การทดสอบสมบัติทางกล**

การวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุ โดยทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น TA.XT Plus บริษัท Stable Micro System ทำการทดสอบกับเนื้อสัมผัส (Texture analyser) โดยตัดชิ้นงานขนาดประมาณ 1.5 x 4.5 เซนติเมตร จำนวนตัวอย่างละ 3 ชิ้น ใช้ความเร็วในการดึงคงที่ 2 มิลลิเมตรต่อนาทีอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน แล้วตรวจสอบพฤติกรรมการยืดตัวของแผ่นฟิล์ม ผลที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการดึงและระยะยืด

**การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน**

การเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบโดยเครื่อง Thermo Gravimetric Analysis (TGA) รุ่น TGA-4000 บริษัท PerkinElmer (สหรัฐอเมริกา) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ความร้อน ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณหลักการพื้นฐานของเทคนิค TGA คือการวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปตามอุณหภูมิที่คงที่ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีการควบคุม จากนั้นจึงทำการบันทึกผลพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลา ใช้ชิ้นงานแผ่นฟิล์ม น้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม โดยการให้ความร้อนจากอุณหภูมิคงที่คือ 320 องศาเซลเซียส

**การทดสอบสมบัติทางความร้อน**

ศึกษาการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์โดยทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนจำเพาะของการหลอมเหลวและอุณหภูมิของการหลอมเหลวของผลึกพอลิเมอร์ (Crystalline Melting Point Temperature:  $T_m$ ) โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น Pyris Diamond DSC 4000 จากบริษัท Perkin Elmer Instruments (สหรัฐอเมริกา) โดยการนำแผ่นฟิล์มขนาด 3 ถึง 5 มิลลิกรัม ใส่ในถาดอลูมิเนียม และอีกถาดเป็นถาดเปล่าซึ่งใช้เป็นถาดอ้างอิง (Reference Pan) ทำการทดสอบด้วยการให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเริ่มจากการให้ความร้อนแรกจากอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความร้อน

**ผลการวิจัย**

**ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล**

ค่า  $M_n$   $M_w$  และ PDI ของเม็ดพอลิเมอร์ PLLA และ PDLA ที่ชื่อมาจากผู้ผลิตถูกตรวจสอบโดยเทคนิค GPC ผลการทดสอบของ GPC แสดงใน Table 2

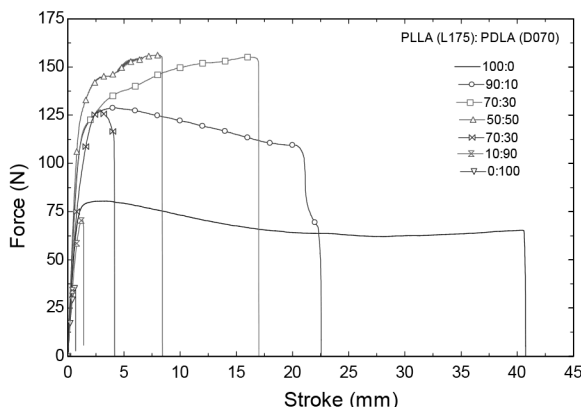
**Table 2** Molecular Weight of PLLA and PDLA

Samples	$M_n$ (g/mol)	$M_w$ (g/mol)	PDI
L175	114,000	210,000	1.84
D070	48,000	73,000	1.52

**ผลการทดสอบแรงดึง**

ตัวแทนเส้นแรงดึงและระยะยืดของการผสม L175 และ D70 แสดงใน Figure 1 โดย Table 3 เป็นตารางสรุปค่าแรงดึงสูงสุด (maximum force) และระยะยืดขาด (elongation

at break) ของชิ้นงาน จาก Figure 1 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานชิ้นงาน L175 สามารถทนแรงดึงสูงสุดได้ที่ประมาณ 79 N ในขณะที่ D070 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถทนแรงดึงสูงสุดได้ 33 N การผสม L175 และ D070 ทำให้เกิด stereocomplex ขึ้นโดยเกิด stereocomplex สูงสุดที่สัดส่วนการผสม 50:50 และมีค่าการทนแรงดึงสูงสุดที่ประมาณ 156 N ซึ่งมากกว่า L175 ประมาณ 2 เท่า



**Figure 1** Maximum force and elongation at break of PLLA/PDLA

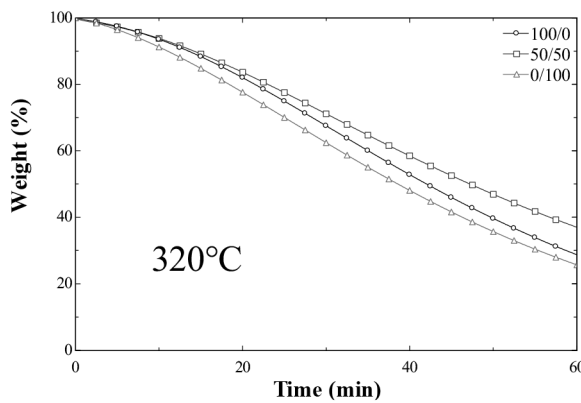
นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการผสม PLLA และ PDLA ที่สัดส่วนต่างๆให้ค่าแรงดึงสูงสุดมากกว่า PLLA และ PDLA ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การเกิด stereocomplex ส่งผลให้ PLA ทนแรงดึงสูงสุดได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของ PLLA และ PDLA อยู่ใกล้ชิดเข้าด้วยกันและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงขึ้น

**Table 3** Maximum force and elongation at break of PLLA/PDLA

Samples L175:D070	Average Maximum Force (N)	Average Elongation at break (mm)
100:0	79	41
90:10	128	22
70:30	155	17
50:50	156	8
30:70	125	4
10:90	71	1.3
0:100	33	0.5

**ผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน**

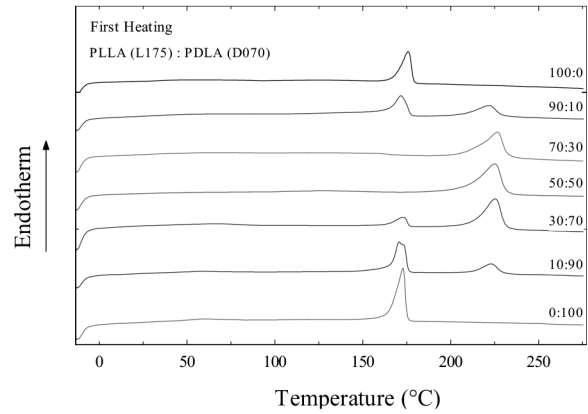
จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิคงที่ 320 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง TGA ดัง Figure 2 พบว่ามีความเสถียรทางความร้อนของ PLLA 100% ที่ต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ในการผสม PDLA ที่อัตราส่วน PLLA:PDLA ที่ 50:50 โดยมีการลดลงของน้ำหนัก (%) ชั่วที่สุด โดยที่เวลา 60 นาที PLLA มีน้ำหนักเหลืออยู่ประมาณ 25% ในขณะที่การผสมของ PLLA: PDLA 50:50 มีน้ำหนักของวัสดุเหลืออยู่เกือบ 40% และนอกจากนี้ใน PDLA 100% ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุดดังแสดงใน Table 1 มีความเสถียรทางความร้อนน้อยที่สุด



**Figure 2** TGA thermograms of PLLA PDLA and the PLLA/PDLA at 50/50

**ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน**

จากการทดสอบด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ดัง Figure 3 และ Table 4 โดยการให้ความร้อนจากอุณหภูมิ -10°C จนถึง 280°C จะเห็นได้ว่า PLLA มีอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_{m1}$ ) ประมาณ 175°C และมีพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_{m1}$ ) ประมาณ 33 J/g การผสม PDLA เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนต่าง ๆ ทำให้พลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_{m1}$ ) ลดลง และเกิดจุดหลอมเหลวแบบ stereocomplex เพิ่มขึ้น โดยที่การผสม PLLA:PDLA 50:50 เกิดสเตอริโอคอมเพล็กซ์แบบสมบูรณ์ มีค่า  $T_{m2}$  สูงสุดคือ 224.99°C และมีพลังงานในการหลอม  $\Delta H_{m2}$  ประมาณ 60 J/g



**Figure 3** DSC thermograms of PLLA/PDLA

**Table 4** Heating Thermal properties of PLLA PDLA and PLLA/PDLA

Sample PLLA:PDLA	Melting1		Melting2	
	$T_{m1}$ (°C)	$\Delta H_{m1}$ (J/g)	$T_{m2}$ (°C)	$\Delta H_{m2}$ (J/g)
100:0	175.77	33.3669	-	-
90:10	171.68	24.9566	222.20	17.7986
70:30			226.71	41.8208
50:50			224.99	60.1242
30:70	173.15	10.4911	225.29	46.0676
10:90	170.60	34.3511	223.14	12.5192
0:100	172.84	43.8078		

**ข้อสรุปและเสนอแนะ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์การผสมกันของพอลิแลคติกไทด์และพอลิติแลคติกไทด์ด้วยวิธีการหล่อฟิล์ม แบบสารละลาย เพื่อนำไปใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม และผลการศึกษาที่ได้ช่วยประหยัดเวลา และวัสดุในการทดลองครั้งต่อไป โดยจากการศึกษาทดลองจะพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิติแลคติกไทด์ในพอลิแลคติกไทด์ทำให้การผสม PLLA:PDLA ที่ 50:50 ทำให้จุดหลอมเหลวมีค่า 225°C ในขณะที่ PLLA หรือ PDLA มีจุดหลอมเหลวประมาณ 170-175°C และที่อัตราส่วน 50:50 มีค่าความเค้นสูงสุด สูงกว่า PLLA หรือ PDLA มากกว่า 55% รวมทั้งมีค่าเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PLLA และ PDLA ในขณะเดียวกัน PDLA มีค่าเสถียรภาพทางความร้อนต่ำสุดเมื่อทดสอบด้วยอุณหภูมิคงที่ในเวลาเท่ากัน

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

## เอกสารอ้างอิง

1. อมรัตน์ เลิศวรสิริกุล. พอลิแลกติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้. วิศวกรรมสารมก 2554;77:99-110.
2. Datta R, Henry M. Lactic acid:recent advances in products, processes and technologies. J. Chem. Technol Biotechnology 2006;81:1119-1129.
3. กลุ่มส่งเสริมอุตสาหกรรมชีวภาพของอุตสาหกรรมอ้อยน้ำตาลทราย และอุตสาหกรรมต่อเนื่อง. พลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ : Polylactic acid (PLA) 2525. สืบค้นจาก <http://www.ocsb.go.th>, เข้าดูเมื่อวันที่ 08/11/2561
4. จันทิมา ดีประเสริฐกุล. การเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ, โครงการ SUT7-710-54-12-01 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2555
5. Srithep Y, Pholharn D, Turng LS, Veangin O. Injection and characterization of polylactide stereocomplex. Polym. Degrad. Stabil 2515;120:290-299.
6. สืบค้นจาก <https://www.total-corbion.com> เข้าดูเมื่อวันที่ 15/11/2561
7. Sriwirat Y, Tanta K. Formulation development for biodegradable packaging: Polybutylene succinate and cellulose acetate butyrate blends. Naresuan Phayao J 2015;8:174-177.

# การตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัสดุทางการเกษตรในสกรูลำเลียงโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง

## Investigation of agriculture seed flow in screw conveyors using discrete element method

สถาพร วังฉาย<sup>1</sup>, ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี<sup>2</sup>, พรชัย จงจิตร์ไพศาล<sup>3</sup>

Sathaphon Wangchai<sup>1</sup>, Supachai Tragoonsubtavee<sup>2</sup>, Pornchai Chongchitpaisan<sup>3</sup>

Received: 15 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

### บทคัดย่อ

สกรูลำเลียงใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการลำเลียงวัสดุในอุตสาหกรรมทางการเกษตร อุตสาหกรรมการผลิตในแนวระดับหรือแนวเอียง ประสิทธิภาพของสกรูลำเลียงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างทั้งการออกแบบ ฟังก์ชันการทำงาน คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเช่นรูปร่าง ขนาดของวัสดุ อิทธิพลจากแรงเสียดทานระหว่างแต่ละอนุภาคและระหว่างอนุภาคและผนังของอุปกรณ์ ความเร็วในการหมุนของใบสกรู มุมเอียงการทำงานของสกรูลำเลียง การออกแบบใบสกรู ปริมาณการป้อนวัสดุที่เหมาะสม การศึกษาครั้งนี้เป็นการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัสดุภายในสกรูลำเลียงโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงระหว่าง 300 – 700 รอบต่อนาที มุมเอียงการทำงานที่ 0 – 15 องศาและลักษณะของใบสกรูลำเลียง (อัตราส่วนระยะพิชิต (P) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)) ที่ 0.5P/D, 1.0P/D และ 1.5P/D เมื่อกำหนดอัตราการป้อนวัสดุผ่านใบสกรูลำเลียงที่ 12 kg/s ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณวัสดุสะสมกอนหาแนที่ความเร็วต่ำและที่อัตราส่วน P/D ต่ำเช่นเดียวกันและการสะสมของอนุภาคจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วสูงขึ้นหรือปรับอัตราส่วน P/D สูงขึ้นตามลำดับ

**คำสำคัญ:** สกรูลำเลียง วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) อัตราการไหลเชิงมวล วัสดุเม็ด

### Abstract

Screw conveyors are widely used in conveying processes in agriculture and manufacturing industries for transporting granular materials. The performance of a screw conveyor can be affected by many factors, such as shape and size of the granular materials, influence of the friction between each particle and between particle-walls, rotational speed and geometries of screw, inclination of the screw conveyor, screw conveyor design and mass flow rate. In this study we examine the movement of materials within the screw conveyor using the Discrete Element Method (DEM) to simulate granular flow and investigate performance in terms of variations of particle speeds (300 – 700 rpm), incline of a screw conveyor (0 – 15 degree) and the characteristics of the pitch (P) to diameter (D) of screw conveyor 0.5P/D, 1.0P/D and 1.5P/D. The results show that the amount of material is accumulated at low speed and the ratio of P/D is low. The amount of material will decrease as the speed increases or the ratio of P/D is adjusted accordingly.

**Keywords:** Screw conveyor, Discrete Element Method (DEM), Mass flow rate, granular materials

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, <sup>2,3</sup> รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 10800,

<sup>1</sup> Assistant Professor., <sup>2,3</sup> Associate Professor., Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 10800, Thailand

\* Corresponding author: Sathaphon Wangchai, Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 10800 Thailand, sathaphon.w@eng.kmutnb.ac.th

## บทนำ

วัสดุปริมาณมวลหรือวัสดุชนิดเม็ดทางการเกษตรที่นำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องมีการจัดการลำเลียงที่ถูกต้องเหมาะสมกับสภาพการทำงาน สกรูลำเลียงเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมเกษตร การแปรรูป การบรรจุภัณฑ์ เพื่อลำเลียงวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการ การลำเลียงอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุเช่นการแตกหักของเม็ดวัสดุเป็นส่วนย่อยๆ หรืออัตราการลำเลียงไม่เป็นไปตามที่ต้องการ การศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุประเภทเม็ดเล็กที่สภาวะต่างๆ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับวัสดุหรือเกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับผิวผนัง รวมถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุ จะช่วยให้มีความเข้าใจมากขึ้นในการออกแบบเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีอัตราการลำเลียงที่สม่ำเสมอ ลดการติดขัด (ไม่เคลื่อนที่) ของอนุภาควัสดุและยังเป็นประโยชน์สามารถประเมินค่าของพลังงานที่นำมาใช้ ลดความเสียหายของวัสดุ (การแตกหักของวัสดุ) และการสึกหรอของอุปกรณ์ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ Discrete element modelling (DEM) วิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุชนิดเม็ดหรือวัสดุชนิดผงด้วยอุปกรณ์ลำเลียงที่สามารถมองเห็นภาพการเคลื่อนที่ของวัสดุภายในขบวนการผลิตหรือการลำเลียงวัสดุ โดยหลักการของ DEM คือการติดตาม (track) ทุกๆ การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคของเม็ดวัสดุเพื่อประเมินตำแหน่ง ค่ามวลแรงกระทำ ความเร็ว การสัมผัส แรงกระทำ การชน การโคจรของแต่ละอนุภาคภายในระบบที่ตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละขั้นตอนการคำนวณในแต่ละช่วงของเวลา มีการคำนวณการมีปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างแต่ละอนุภาควัสดุและระหว่างอนุภาควัสดุกับสิ่งแวดล้อม (ผนังและอนุภาคอื่น) ในกรณีวัสดุมีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถลหรือแบบหมุนกลิ้งโดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตันและกฎการเคลื่อนที่ ณ จุดสัมผัสกันของแต่ละอนุภาคตลอดการคำนวณ ดังนั้น DEM จึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการคำนวณหาค่าต่างๆ วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัสดุที่ไม่สามารถหาได้ในห้องปฏิบัติการโดยการทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่มีลักษณะเหมือนกับการทดลอง ดังนั้นจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุ คุณสมบัติต่างๆ จะมีความสำคัญต่อการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์ เพื่อให้มีความเหมาะสมที่สุดต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ลำเลียงประกอบด้วย bulk density, solid density, shear modulus, Poisson's ratio, coefficient of restitution,

coefficient of static friction และ coefficient of rolling friction มีการศึกษามากมายที่กล่าวถึงวิธีการทดสอบ<sup>1</sup> รวมถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุตัวอย่าง

บทความนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุภายในสกรูลำเลียงที่มีความยาว 2.5 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.152 เมตร (6 นิ้ว) เมื่อกำหนดระยะพิสัย (P) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของใบสกรู 3 ขนาด (0.5P/D, 1.0P/D และ 1.5P/D) ปรับเปลี่ยนความเร็วในช่วงระหว่าง 300 ถึง 700 รอบต่อนาที ทำงานที่มุมเอียงเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 15 องศา กำหนดอัตราการป้อนวัสดุคงที่ 12 kg/s พร้อมด้วยนำเสนอวิธีการทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (DEM) มาช่วยวิเคราะห์พฤติกรรมของอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง ผลจากการใช้วิธีการ DEM จะช่วยให้ผู้ออกแบบทราบถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการออกแบบเครื่องอุปกรณ์ สามารถกำหนดรูปแบบการลำเลียงที่เหมาะสมกับวัสดุ ลดการสร้างชิ้นงานต้นแบบ เพื่อให้อุตสาหกรรมนำวิธีการที่ได้จากการศึกษานี้ไปพัฒนาอุปกรณ์ลำเลียงชนิดอื่นต่อไป

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วิธีองค์ประกอบที่ไม่ต่อเนื่องเป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงตัวเลขใช้ในการจำลอง วิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุโดยการติดตามการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคภายในอุปกรณ์หรือระบบที่ต้องการ DEM จะช่วยอธิบายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุแบบไดนามิกส์ (dynamic motion) การหมุน แรงกระทำ ความเร็ว การสัมผัสกันที่เกิดขึ้นของแต่ละอนุภาควัสดุและความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละอนุภาควัสดุ (interaction) ที่เกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและระหว่างอนุภาคกับผิวผนังชิ้นงาน (สกรูลำเลียง) มีการอธิบายโดย Cundall and Strack<sup>2</sup> การหมุนและการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุจะพิจารณาที่เวลาต่างๆ อธิบายได้ด้วยกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law of motion)<sup>3</sup> ดังนี้

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (F_{ij}^n + F_{ij}^s) + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (R_i \times F_{ij}^s - \mu_r R_i |F_{ij}^n| \hat{\omega}_i) \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้, และ คือมวล, แรงเฉื่อย, ความเร็วเชิงเส้นและความเร็วการหมุนของอนุภาค ตามลำดับ และ คือแรงสัมผัสตั้งฉาก (normal contact forces) และแรงสัมผัสแบบเฉือน (tangential contact forces) กระทำโดยอนุภาค บน

อนุภาค และ คือแรงโน้มถ่วงของอนุภาค สำหรับ คือจำนวนของอนุภาคที่มีการสัมผัสกันและ คือขนาดของเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของอนุภาคถึงผิวที่มีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค โดยที่ คือสัมประสิทธิ์การกลิ้งของอนุภาค (rolling friction) และ คือหน่วยของเวกเตอร์ที่มีค่าเท่ากับ หารด้วยขนาด

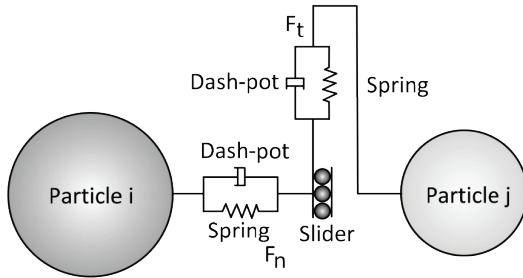


Figure 1 Spring-dashpot contact model.

การศึกษาใช้โมเดลการสัมผัสกันระหว่างแต่ละอนุภาควัสดุ (Figure 1) และการสัมผัสกันระหว่างอนุภาควัสดุกับพื้นผิวผนังของเครื่องทดสอบพิจารณาแบบ spring-dashpot model และ Hertz-Mindlin no-slip model<sup>4</sup> ที่สามารถใช้ประเมินคาดการณ์ถึงประสิทธิภาพของการออกแบบอุปกรณ์ลำเลียง พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียง พิจารณาขนาดของแรงกระทำตั้งฉากกับผิวสัมผัสระหว่างแต่ละอนุภาคของวัสดุและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 อนุภาควัสดุ ดังนี้

$$F_n = -k_n \Delta x + C_n v_n \tag{3}$$

$$F_t = \min [\mu F_n, k_t \int v_t dt + C_t v_t] \tag{4}$$

เมื่อกำหนดให้  $k_n$  และ  $k_t$  คือสติฟเนสแนวตั้งฉากและสติฟเนสแนวเฉือนตามลำดับ  $\Delta x$  คือระยะการทับซ้อนกันของสองอนุภาค สำหรับ  $v_n$  และ  $v_t$  คือความเร็วในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสและความเร็วในแนวขนานกับแนวสัมผัสตามลำดับ ในส่วนของ  $C_n$  และ  $C_t$  คือสัมประสิทธิ์การหน่วงในแนวตั้งฉาก (normal damping coefficient) และสัมประสิทธิ์การหน่วงในแนวเฉือน (tangential damping coefficient) ตามลำดับ สำหรับค่า จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการคืนตัว (coefficient of restitution,  $e$ ) ของอนุภาควัสดุ สามารถกำหนด

ได้จากอัตราส่วนระหว่างความเร็วหลังจากการชนกันของอนุภาคต่อความเร็วที่เกิดขึ้นก่อนการชนกันของอนุภาคในแนวตั้งฉากกับระนาบที่พิจารณา สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$C_n = -2 \ln(e) \frac{\sqrt{m_i m_j k_n}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(e)}} \tag{5}$$

$$m_{ij} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \tag{6}$$

เมื่อ  $m_{ij}$  คือมวลที่เปลี่ยนแปลงลดลงของอนุภาค

### การจำลองด้วยวิธี DEM (DEM SIMULATIONS)

รูปทรงทางเรขาคณิต (3 มิติ) สำหรับสกรูลำเลียงถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม CAD และนำเข้าสู่โปรแกรม EDEM Simulation กำหนดช่องทางป้อนวัสดุเข้าที่ด้านหนึ่งของสกรูลำเลียงและเชื่อมต่อกับฮอปเปอร์สามารถจ่ายวัสดุได้ที่ 12 กิโลกรัมต่อวินาที ขนาดของใบสกรูแสดงใน Table 1 ใบสกรูมีความยาว 2.5 เมตร และกำหนดช่องทางจ่ายวัสดุออกอีกด้านหนึ่งของสกรูลำเลียง สำหรับอนุภาควัสดุในการจำลองจะสร้างเป็นทรงรีมีลักษณะคล้ายวัสดุจริง ซึ่งมาจากหลายทรงกลมประกอบรวมกัน (Figure 2) การตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงที่เงื่อนไขขอบเขตต่างกัน โดยกำหนดให้ใบสกรูให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 0.152 เมตร (6 นิ้ว) และมีระยะพิตช์ (P) 3 ขนาดประกอบด้วย 0.5P/D, 1.0P/D และ 1.5P/D ดังแสดงใน Figure 3 และกำหนดการทำงานที่ทำมุมเอียง 4 ระดับประกอบด้วย แนวนอน 0 องศา และแนวเอียง 5, 10 และ 15 องศา และกำหนดการลำเลียงวัสดุที่ความเร็วรอบ 5 ระดับประกอบด้วย 300, 400, 500, 600 และ 700 รอบต่อนาที (สำหรับแบบจำลองในการศึกษาที่ความเร็วต่ำกว่า 300 รอบต่อนาทีและมุมเอียงสูงกว่า 15 องศา ส่งผลให้วัสดุเกิดการกองสะสมมากเกินจนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้) เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุ อัตราการไหลที่เกิดขึ้น ความเร็วการเคลื่อนที่ แรงกระทำที่เกิดขึ้นกับวัสดุ จากการกำหนดระยะห่างระหว่างใบสกรู (P/D) ระดับความเอียงการลำเลียง และความเร็วในการหมุนของใบสกรูจะมีผลต่ออัตราการลำเลียงที่เกิดขึ้นอย่างไร

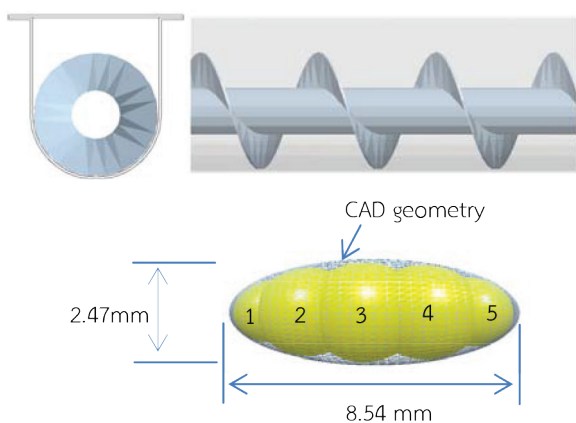


Figure 2 Geometry of screw and shape of particle.

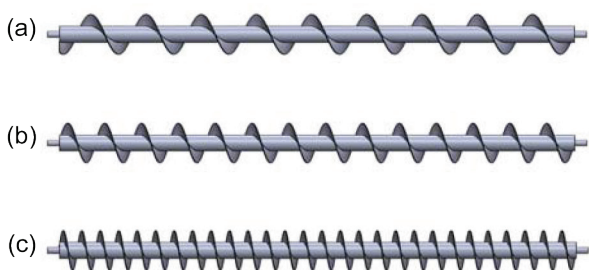


Figure 3 Ratio of pitch (P) and diameter (D) of screw (a) 1.5, (b) 1.0 and (c) 0.5.

การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีองค์ประกอบที่ไม่ต่อเนื่อง (DEM) ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป EDEM simulations version 2018 ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ HP Z240 I7 มีหน่วยความจำ 16GB เวลาคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ 60s ใช้เวลาในการประมวลผลทั้งหมด 10 – 24 ชั่วโมงซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละเงื่อนไขของการจำลอง ผลเฉลยจะมีความถูกต้องแม่นยำเพียงใดขึ้นอยู่กับความถูกต้องแม่นยำของตัวแปรประกอบการจำลองที่ได้จากการทดสอบและคุณสมบัติวัสดุเพื่อกำหนดให้กับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

Table 1 Dimension of screw conveyor

เส้นผ่านศูนย์กลางนอก (D) (mm)	152.4
เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเพลลา (d) (mm)	60
ระยะพิทช์ (P) (mm)	152.4
ระยะห่างระหว่างใบสกรูและราง (c) (mm)	1.25

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือคุณสมบัติของข้าวเปลือกแห้งชนิดยาว โดยมีขนาดรูปร่างและค่าความเป็นทรงกลมที่ทำการวัดโดยใช้เวอเนียร์คาลิเปอร์โดยมีความยาว (L=8.54 มิลลิเมตร) ความกว้าง (W=2.47 มิลลิเมตร) และความหนา

(T=1.83 มิลลิเมตร) จากวัสดุทดสอบจำนวน 30 เม็ดและคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม (effective diameter ( $D_e$ =3.38 มิลลิเมตร)) โดยวัสดุมีมวลและปริมาตร (Mass and volume) อยู่ที่ 2.26 กรัม จากการคิดค่าเฉลี่ย 100 เม็ดและนำวัสดุจำนวน 100 เม็ดแทนที่ในน้ำพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำที่เกิดขึ้นและคิดค่าเฉลี่ยต่อหน่วยวัสดุแต่ละเม็ดอยู่ที่ 0.14 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในส่วนของความหนาแน่นจริง (Solid density) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุที่ไม่รวมช่องว่างระหว่างอนุภาควัสดุ โดยการนำวัสดุที่ทราบน้ำหนักแทนที่ในน้ำที่ทราบปริมาตรแล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร สำหรับกรณีความหนาแน่นรวม (Bulk density) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุที่พิจารณาช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุรวมด้วยหาได้จาก การนำวัสดุเทลงในหลอดแก้วที่มีขนาด 1,000 มิลลิเมตรให้ล้นออกมาจากขอบปากแก้วและใช้ไม้บรรทัดค่อยๆ ปาดเอาส่วนเกินออกจากขอบปากแก้วโดยไม่ให้อนุภาคส่วนบนที่ทำการปาดออกไปกดอัดอนุภาคส่วนล่างและนำวัสดุในหลอดแก้วนั้นไปชั่งหาน้ำหนักบันทึกค่าและคำนวณได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรที่เกิดขึ้นทำการทดลองจำนวน 5 ครั้งแล้วพิจารณาจากค่าเฉลี่ยได้ 471.16 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

มุมกองวัสดุ (Angle of repose) พิจารณาโดยการนำวัสดุเทในหลอดแก้วทรงกระบอกจนเต็ม (ขนาดทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตรและสูง 250 มิลลิเมตร) แล้วเคลื่อนที่หลอดแก้วขึ้นในแนวตั้งด้วยความเร็วคงที่ โดยให้วัสดุเคลื่อนที่ตามธรรมชาติและกองบนพื้นระนาบที่กำหนด (ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 180 มิลลิเมตร) มุมกองของวัสดุได้จากการวัดความกว้างของฐานกองวัสดุและความสูงของกองวัสดุ<sup>6,7</sup> สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (Coefficient of Static Friction,  $\mu_s$ ) คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นสัมผัสกันพิจารณาโดยการนำวัสดุวางบนระนาบของพื้นผิวทดสอบและทำการปรับมุมโดยการหมุนของแผ่นระนาบเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งวัสดุเริ่มมีการหมุนหรือเริ่มมีการเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างทำการจดบันทึกค่ามุมนั้น<sup>6,7</sup> จากนั้นคำนวณโดยใช้สมการ  $\mu_s = \tan(\theta)$  เมื่อกำหนดให้  $\theta$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและ คือกมุมที่ทำให้วัสดุเริ่มเคลื่อนที่หรือมีการไหลเกิดขึ้น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution (e)) คืออัตราส่วนรากที่สองของความสูงระหว่างความสูงของวัสดุหลังจากตกกระทบพื้นแล้วกระดอนขึ้นในแนวตั้ง ( $h_r$ ) และความสูงเริ่มต้นของวัสดุก่อนตกกระทบพื้น ( $h_i$ )<sup>6</sup> พิจารณาได้จากสมการ  $e = \sqrt{h_r/h_i}$  (ในที่นี้ไม่นำมุมที่เกิดขึ้นจากการกระดอนของวัสดุที่มีค่า



มากกว่า 10 องศากับแนวตั้งมาพิจารณา) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้ง (Coefficient of rolling friction,  $\mu_r$ ) คือความสัมพันธ์การกลิ้งของวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับวัสดุหรือระหว่างวัสดุกับพื้นผิวผนัง ในที่นี้ได้จากการประมาณค่าจากการจำลองด้วย DEM และเปรียบเทียบผลลักษณะการก้องของวัสดุที่สอดคล้องกับผลการทดลอง (trial and error)<sup>6</sup> พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงใน Table 2

รูปร่างและขนาดของเม็ดข้าวเปลือกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะมีลักษณะที่สม่ำเสมอและนำมาใช้กำหนดเป็นแบบจำลองข้าวเปลือกที่มีรูปทรงกลมจำนวน 5 ทรงกลมวางซ้อนเชื่อมต่อกัน (Figure 2) เพื่อให้ให้ออกมารูปทรงเหมือนกับเม็ดวัสดุจริง และกำหนดให้มีปริมาตรและน้ำหนักเท่ากับวัสดุจริงและมีค่ามุมก้องวัสดุเป็น 35.83°

**Table 2** Materials Properties

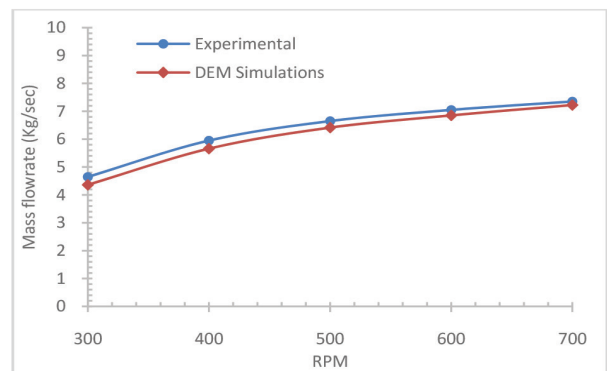
Object properties	paddy	steel
Particle density (kg/m <sup>3</sup> ), ( $\rho_s$ )	1193	8000
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.45	0.29
Shear modulus (Pa), ( $G$ )	1e+7	7.75e+10
coefficient of restitution, ( $e$ )	0.2	0.5
coefficient of static friction, ( $\mu_s$ )	0.3	0.5
coefficient of rolling friction, ( $\mu_r$ )	0.1	0.1
time step (sec)	1e-5	

เพื่อยืนยันความถูกต้องสำหรับรูปร่างของแบบจำลองอนุภาคโดยทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยที่ขนาดและรูปร่างรวมถึงพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดในการจำลองแสดงใน Table 2 จะต้องมีความถูกต้องที่เหมือนกันกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ วิธีการทั้งหมดอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา<sup>7</sup> กระบวนการนี้จะทำซ้ำจนกว่าผลจะสอดคล้องกัน ซึ่งวิธีการทั้งหมดนี้จะต้องมีความสอดคล้องกับนักวิจัยหลายคน<sup>6,7,8,9</sup>

**เปรียบเทียบผลการทดลอง (validation)**

การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุในสกรูลำเลียงด้วยวิธี DEM นั้นได้ดำเนินการตรวจสอบความแม่นยำของพารามิเตอร์ รูปร่างและขนาดของอนุภาคที่ใช้ในแบบจำลองก่อน เพื่อยืนยันความถูกต้องของการสร้างจำลอง DEM และสามารถนำไปคำนวณปัญหาต่างๆ ที่มีความซับซ้อนได้ เวลาที่ใช้อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณแต่ละครั้ง จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ (DEM) โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

ที่มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมือนกัน แสดงผลในรูปแบบของอัตราการลำเลียงวัสดุที่ได้ (กิโลกรัมต่อวินาที) ดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของผลลัพธ์และยอมรับได้ทั้งหมด 5 ระดับความเร็วประกอบด้วย 300, 400, 500, 600 และ 700 รอบต่อนาที จาก Figure 4 ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วการหมุนเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการลำเลียงที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ และความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุจะสูงตามเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งป้อนวัสดุเข้าจนกระทั่งจ่ายวัสดุออก สำหรับการศึกษานี้ที่ความเร็วต่ำกว่า 300 รอบต่อนาทีวัสดุจะกองหนาแน่นมากที่ตำแหน่งป้อนวัสดุเข้าและเคลื่อนที่เต็มหน้าตัดของใบสกรูอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงช่องจ่ายวัสดุออกที่สำคัญคือต้องใช้กำลังงานในการขับเคลื่อนวัสดุให้ไหลไปข้างหน้าสูงขึ้น สำหรับกรณีความเร็วสูงกว่า 700 รอบต่อนาทีส่งผลให้อัตราการจ่ายวัสดุออกจะเริ่มลดลงเนื่องจากอัตราการป้อนวัสดุเข้าสกรูลำเลียงมีอัตราคงที่และปริมาณของวัสดุที่ป้อนเข้าใบสกรูนั้นไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับความเร็วที่กำหนด



**Figure 4** Comparison of DEM and Experimental Results

**ผลการทดลอง**

การศึกษาพฤติกรรมต่างๆ และการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคซึ่งยากมากสำหรับการตรวจสอบที่ได้จากการทดสอบ ดังนั้นจึงทำการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงเพื่อตรวจสอบอัตราการลำเลียงของวัสดุ แรงกระทำ ความเร็วของอนุภาคจากการลำเลียงวัสดุด้วยสกรูลำเลียงผ่านวิธีการทางคอมพิวเตอร์

ปริมาณการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงที่อัตราส่วนระยะพิท (P) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ระดับต่างๆ ดังแสดงใน Figure 5 ที่ความเร็วการทำงาน 500 รอบต่อนาที (ความเร็วอื่นๆ ไม่ได้แสดงในที่นี้) อัตราส่วน P/D และความเร็วการทำงานจะส่งผลต่อปริมาณวัสดุที่ได้จากการลำเลียง พบว่าอัตราส่วน P/D สูงจะส่งผลให้

ได้ปริมาณมวลของวัสดุน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสกรูลำเลียงที่มีอัตราส่วน P/D ต่ำ เนื่องจากในแต่ละช่วงพิตจะมีช่องว่างเกิดจากอัตราการบินวัสดุเข้าสู่สกรูไม่ทันเมื่อเทียบกับความเร็วที่กำหนด (500 รอบต่อนาที) และในทางกลับกันกรณีอัตราส่วน P/D ต่ำๆ ปริมาณมวลของวัสดุจะหนาแน่นและเคลื่อนที่เต็มหน้าตัดตลอดความยาวสกรูลำเลียงกรณีเพิ่มความเร็วให้สูงขึ้น ปริมาณของวัสดุในแต่ละช่วงพิตของใบสกรูจะลดต่ำลงตามลำดับเช่นกันและในทางกลับกันหากลดความเร็วต่ำลงจะทำให้ปริมาณมวลของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากอัตราวัสดุที่ป้อนเข้าสู่สกรูลำเลียงเต็มหน้าตัดและเคลื่อนที่ออกอย่างช้าๆ ทำให้ในแต่ละช่วงพิตของใบสกรูเต็มไปด้วยวัสดุ (ดู Figure 9 ประกอบ) กรณีอัตราส่วน P/D = 1.5 นั้นพบว่าปริมาณมวลของวัสดุที่กองอยู่ในแต่ละช่วงพิตมีปริมาณน้อยกว่า P/D = 1 อยู่ประมาณ 50% และมีการเคลื่อนที่ออกจากใบสกรูเร็วกว่าเพียงเล็กน้อย สำหรับกรณี P/D = 0.5 ระยะเวลาในการจ่ายวัสดุออกจากสกรูลำเลียงจะนานกว่าถึงสองเท่าและมีปริมาณมวลวัสดุกองอยู่ระหว่างช่วงพิตของใบสกรูสูงถึง 2 เท่าเช่นกัน เมื่อพิจารณาเทียบกับอัตราส่วน P/D = 1.0

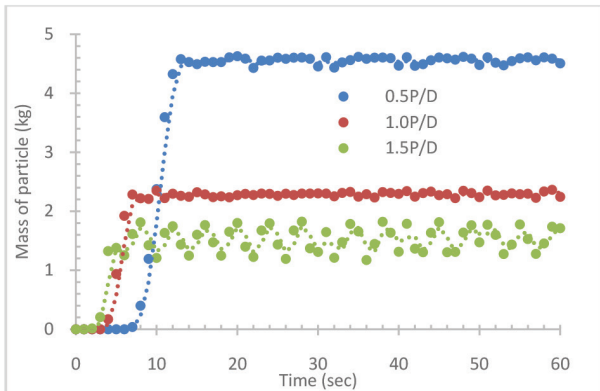


Figure 5 Mass of particle in a horizontal level with the ratio 0.5P/D, 1.0P/D and 1.5P/D.

Figure 6 แสดงปริมาณมวลของวัสดุที่ได้จากการลำเลียงด้วยสกรูลำเลียงที่ความเร็วในการทำงานใบสกรูหมุนที่ 500 รอบต่อนาทีและอัตราส่วน P/D = 1.0 และทำมุมในช่วงที่กำหนดระหว่าง 0 – 15 องศา กับแนวระนาบ พบว่าการลำเลียงวัสดุแต่ละระดับของมุมเอียงจะมีผลกระทบต่อปริมาณมวลของวัสดุที่ได้จากการลำเลียงแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับอัตราป้อนวัสดุที่ระดับดังกล่าว (12 กิโลกรัมต่อนาที) กรณีเพิ่มความเร็วสูงขึ้นจะส่งผลให้ได้ปริมาณของวัสดุเพิ่มขึ้นตามและจะลดลงเมื่อทำงานที่ความเร็วลดต่ำลงตามลำดับ ใน

ทางกลับกันกรณีปรับระยะพิตต่ำลง (P/D = 0.5) จะทำให้ได้ปริมาณมวลของวัสดุเพิ่มขึ้นและจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปรับระยะพิตไปที่อัตราส่วน P/D = 1.5

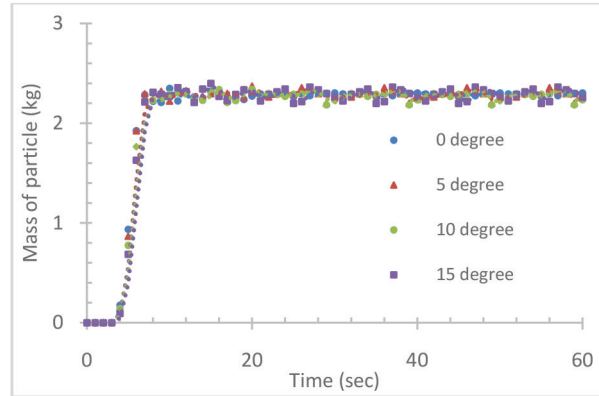
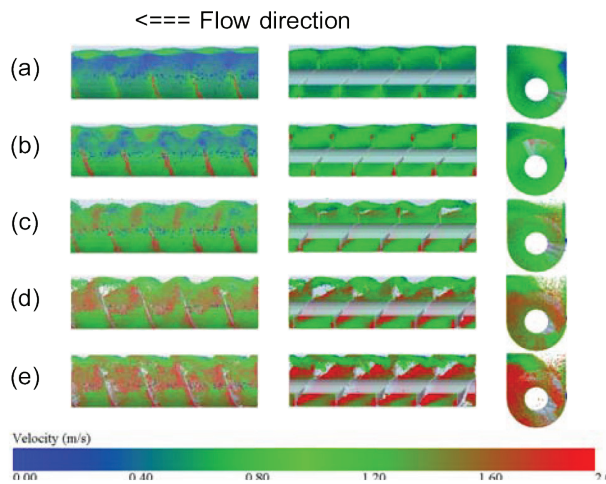


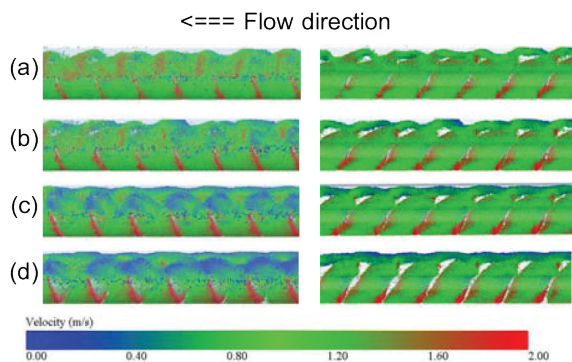
Figure 6 Mass of particle in the horizontal level (P/D = 1.0) with 0, 5, 10 and 15 degree

Figure 7 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงในช่วงความเร็วการหมุนของใบสกรูระหว่าง 300 – 700 รอบต่อนาที จะเห็นได้จากการจำลอง DEM พบว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุตลอดความยาวของสกรูลำเลียง ปริมาณมวลของวัสดุในแต่ละช่วงพิตจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วการหมุนของใบสกรูสูงขึ้น พิจารณาที่ความเร็วต่ำ (300 รอบต่อนาที) ปริมาณวัสดุจะหนาแน่นและเต็มหน้าตัดตลอดความยาวของใบสกรู (Figure 7a) และความหนาแน่นของวัสดุจะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้นเป็น 500 รอบต่อนาที วัสดุส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ด้วยแรงเหวี่ยงลอยสู่ช่องว่างเหนือใบสกรูลำเลียงและเคลื่อนที่ไปอยู่ในช่วงว่างด้านหลังของใบสกรูนั้นและความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัสดุจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งติดกับใบสกรูลำเลียง (Figure 7c) และเมื่อเพิ่มความเร็วในการทำงานสูงขึ้นจนกระทั่งความเร็วสูงสุด (700 รอบต่อนาที) ความหนาแน่นของวัสดุจะเบาบางและเกิดช่องว่างสูงบริเวณด้านบนของใบสกรูและด้านหลังใบสกรูลำเลียง สำหรับความเร็วของอนุภาควัสดุในแนวแกนจะมีการเคลื่อนที่ต่ำบริเวณส่วนบนของใบสกรูลำเลียง และในทำนองเดียวกันความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณที่วัสดุสัมผัสกับใบสกรูลำเลียง (Figure 7e) ความเร็วของวัสดุในแนวแกนการเคลื่อนที่ของใบสกรูลำเลียงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อการหมุนของใบสกรูเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ



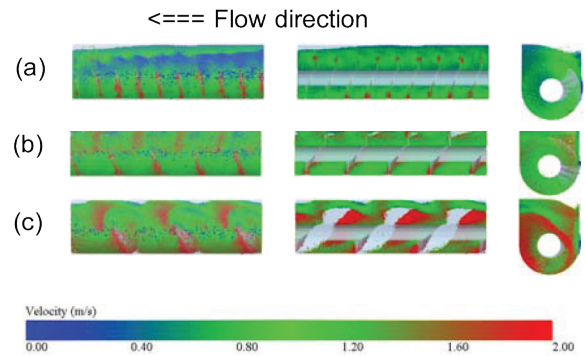
**Figure 7** Particle dispersion for various rotation speeds View from left to right: side view, section long view, cross-sectional view. (a) 300, (b) 400, (c) 500, (d) 600 and (e) 700 rpm

Figure 8 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงที่หมุนด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราส่วน P/D = 1.0 (กรณีอื่นไม่ได้แสดงผลในที่นี้) สำหรับการลำเลียงวัสดุในแนวเอียงทำมุมจาก 0 องศา (แนวระนาบ) ถึง 15 องศา กับแนวระนาบ จะเห็นการกระจายตัวของอนุภาควัสดุพบว่าปริมาณอนุภาควัสดุจะลดลงเมื่อมุมเอียงการทำงานเพิ่มสูงขึ้นจากตำแหน่งแนวนอนเป็นตำแหน่งแนวตั้งอย่างเห็นได้ชัดจากการจำลอง DEM มีลักษณะเดียวกับกรณีเพิ่มความเร็วจาก 300 ไปเป็น 700 รอบต่อนาที จะทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ และยังพบว่าความเร็วการหมุนเฉลี่ยของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนและความเร็วการหมุนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลจากกอนวัสดุผ่านใบ สกรู



**Figure 8** Particle dispersion for various rotation speeds View from left to right: side view, section long view, cross-sectional view. (a) 0, (b) 5, (c) 10, and (d) 15 degree.

Figure 9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุในแนวระนาบตลอดความยาวของสกรูลำเลียงทำงานที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที โดยกำหนดอัตราส่วนระยะพิต (P) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 (กรณีอื่นไม่ได้แสดงผลในที่นี้) การกระจายตัวของอนุภาควัสดุมองเห็นชัดเจนจากการจำลอง DEM เมื่ออัตราส่วน (P/D) เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 ปริมาณวัสดุในแต่ละช่วงพิตจะลดลงและเคลื่อนที่ติดกับใบเกลียวสกรูและความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในทางกลับกันกรณีลดอัตราส่วน P/D ลงเป็น 0.5 ปริมาณมวลของวัสดุจะหนาแน่นและเต็มหน้าตัดใบสกรูลำเลียงและความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะลดลงตลอดความยาวของ สกรูลำเลียงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอัตราส่วน P/D ที่ 1.0 การกระจายตัวของอนุภาคมีความสม่ำเสมอตลอดการทำงานตั้งแต่จุดเริ่มต้นป้อนวัสดุเข้าจนกระทั่งจ่ายวัสดุออกจากสกรูลำเลียง มุมกอนไดนามิกส์สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุปริมาณมวลจะลดลงเมื่ออัตราส่วน P/D เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ



**Figure 9** Particle dispersion for various rotation speeds View from left to right: side view, section long view, cross-sectional view. (a) 0.5, (b) 1.0 and (c) 1.5.

**อภิปรายและสรุปผล**

การจำลองด้วยวิธี DEM เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาควัสดุเริ่มต้นตั้งแต่ป้อนวัสดุเข้าสู่สกรูลำเลียงจนกระทั่งอนุภาควัสดุเคลื่อนที่ออกจากสกรูลำเลียงที่ช่องจ่ายวัสดุออก การเปรียบเทียบผลจะเป็นรูปแบบปริมาณการลำเลียงของวัสดุ และรูปภาพแสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุภายในสกรูลำเลียง ที่ความเร็ว หมุนเอียง ระยะพิตต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน ความถูกต้องแม่นยำของการจำลองด้วยวิธี DEM นั้นจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของตัวแปรที่นำมาสร้างแบบจำลองรวมถึงขนาดและ

### รูปร่างของวัสดุจำลอง

ปริมาณของวัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่สกรูลำเลียงด้วยอัตรา 12 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาณวัสดุจะมีการกองหนาแน่นมากที่ความเร็วต่ำ มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการกำหนดระยะ P/D ต่างๆ และปริมาณของอนุภาคจะค่อยๆ กระจายลดลงตามความยาวของใบสกรูลำเลียงและเมื่อเพิ่มความเร็วสูงขึ้นปริมาณการกองของอนุภาควัสดุจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดช่องว่างหลังใบสกรูลำเลียงและมีลักษณะเช่นเดียวกับการกำหนดระยะ P/D สูงๆ การเพิ่มระยะพิตของใบสกรูจะเพิ่มปริมาณอนุภาควัสดุในแต่ละช่วงพิตมากขึ้นสำหรับกรณีความเร็วต่ำ พิจารณาภาพจาก DEM simulation จะสังเกตเห็นว่าอนุภาควัสดุด้านบนจะมันลงด้านล่าง อนุภาควัสดุมีการกระโดดข้ามใบสกรูลำเลียงหรือเคลื่อนที่บนอนุภาคอื่นๆ การจำลอง DEM แสดงให้เห็นพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของอนุภาคตลอดเวลา

ในที่สุดก็สามารถสรุปได้ว่าการคำนวณทางคณิตศาสตร์สำหรับพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดด้วยวิธี DEM สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การทำงานหรือตรวจสอบการออกแบบเครื่องมือลำเลียงก่อนจะลงมือสร้างจริง

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ได้ให้การสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ (วท.) ประจำปี 2560

### เอกสารอ้างอิง

- González-Montellano C, Llana DF, Fuentes JM, Ayuga F. Determination of the mechanical properties of corn grains and olive fruits required in DEM simulations. in 2011 Louisville, Kentucky, 2011 Aug 7-10, American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2011. P. 1
- Cundall PA, Strack OD. A discrete numerical model for granular assemblies. *geotechnique*. 1979 Mar 1;29(1):47-65.
- Yang RY, Yu AB, McElroy L, Bao J. Numerical simulation of particle dynamics in different flow regimes in a rotating drum. *Powder Technology*. 2008 Dec 20;188(2):170-7.
- Cundall PA. Computer simulations of dense sphere assemblies. In *Studies in Applied Mechanics*. 1988 Jan 1; 1988(20):113-123
- Cleary PW, Morrisson R, Morrell S. Comparison of DEM and experiment for a scale model SAG mill. *International Journal of Mineral Processing*. 2003 Jan 1;68(1-4):129-165.
- Wangchai S, Hastie DB, and Wypych PW. The Simulation of Particle Flow Mechanisms in Dustiness Testers. in 11th International Conference on Bulk Materials Storage Handling and Transportation; 2013 July 2-4; University of Newcastle, Australia; 2013.
- สถาพร ว่างฉาย, และศุภชัย ตระกูลทรัพย์วิทย์, การศึกษาประสิทธิภาพของกระพ้อลำเลียงชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยวิธี DEM; ในการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 31; 4-7 กรกฎาคม 2560; นครนายก, ประเทศไทย; 2560
- Karababa E. Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering*. 2006 Jan 1;72(1):100-107.
- Boac JM, Casada ME, Maghirang RG, Harner III JP. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*. 2010;53(4):1201-1216.

# การศึกษาแบบจำลองทางความร้อนในบรรจุภัณฑ์ไอซีโดยการใช้โปรแกรมแอนซิส

## Thermal Modeling of IC Packages by Using ANSYS Simulation

แสงดาว เชื้อยงฉิน<sup>1</sup>, ยศกร ประทุมวัลย์<sup>2</sup>, แคทลียา ปัทมพรหม<sup>3\*</sup>

Saengdaow Seangchin<sup>1</sup>, Yotsakorn Pratumwal<sup>2</sup>, Cattaleeya Pattamaprom<sup>3\*</sup>

Received: 18 July 2019; Revised: 19 August 2019; Accepted: 10 September 2019

### บทคัดย่อ

การออกแบบ IC package ต้องมีการนำไปทดสอบเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิที่ผิวของ chip ว่ามีค่าไม่เกิน temperature limit ที่ถูกกำหนดไว้ ซึ่งการตรวจสอบนั้นต้องใช้เวลา นาน, มีค่าใช้จ่ายสูง และมีความยุ่งยากซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อสามารถประเมินอุณหภูมิที่ผิว chip ได้อย่างรวดเร็วและเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการระบายความร้อน โดย IC package ที่เลือกใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ คือประเภท TQFP-EP ซึ่งนิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ จากผลการศึกษาพบว่าการใช้โปรแกรม ANSYS สามารถจำลองอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวหน้าของ chip ได้ดีโดยมีความใกล้เคียงความจริงในระดับ  $\pm 1\%$  และพบว่าประสิทธิภาพการระบายความร้อนของ IC package จะเพิ่มขึ้นในกรณีต่อไปนี้ คือ 1) เพิ่มขนาดขององค์ประกอบใน IC package อันได้แก่ ขนาดของ IC package, ขนาดของ chip, ความหนาของ chip, ขนาดของช่อง exposed pad และจำนวนขา lead frame 2) เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของ die attached (DA) และ mold compound 3) เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่ผิวของ IC package และ PCB 4) เพิ่มขนาดของ PCB และการเลือกใช้ชนิดของ PCB ที่มี thermal vias

**คำสำคัญ:** โปรแกรมแอนซิส, บรรจุภัณฑ์ไอซี, อุณหภูมิผิวชิพ, แบบจำลองทางความร้อน

### Abstract

For the design of an IC package, one of the primary concerns is the critical temperature limit, where the chip surface temperature of the designed package has to be below the critical temperature limit. The current testing method requires a long testing time, high cost and complex procedures. Therefore, this research is interested in applying the finite element method by using ANSYS simulation software to quickly evaluate the chip surface temperature and to investigate the effects of different parameters on heat transfer out of the package. The IC package used in this study is the TQFP-EP package, which is widely used in the automotive industry. It was found that the ANSYS simulation could predict the chip temperature accurately within  $\pm 1\%$  error. It was also found that the heat transfer efficiency could be improved by many approaches. The first approach is by increasing the dimensions of the IC package components including the package size, chip size, chip thickness, exposed pad size, and the number of package legs of the lead frame. The second approach is by increasing the thermal conductivities of the die bonding material and the mold compound. The third approach is by increasing the convection heat transfer coefficients around the surface of the IC package surface and the PCB. The last is achieved by increasing the size of the PCB and by choosing the type of PCB with thermal vias.

**Keywords:** ANSYS simulation, IC package, chip surface temperature, thermal modeling.

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท, <sup>2</sup>รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ถ.พหลโยธิน อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

<sup>2</sup> วิศวกรอาวุโส, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ถ.พหลโยธิน อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

<sup>1</sup> Master degree student, <sup>3</sup>Associate Professor Faculty of Engineering, Thammasat University, Phahonyothin Road, Khlongluang, Pathumthani 12120

<sup>2</sup> Senior Engineer, National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Phahonyothin Road, Khlongluang, Pathumthani 12120

\* Corresponding author; Cattaleeya Pattamaprom, Faculty of engineering, Thammasat University, Phahonyothin Road, Khlongluang, Pathumthani 12120, Thailand. cattalee@engr.tu.ac.th

**บทนำ**

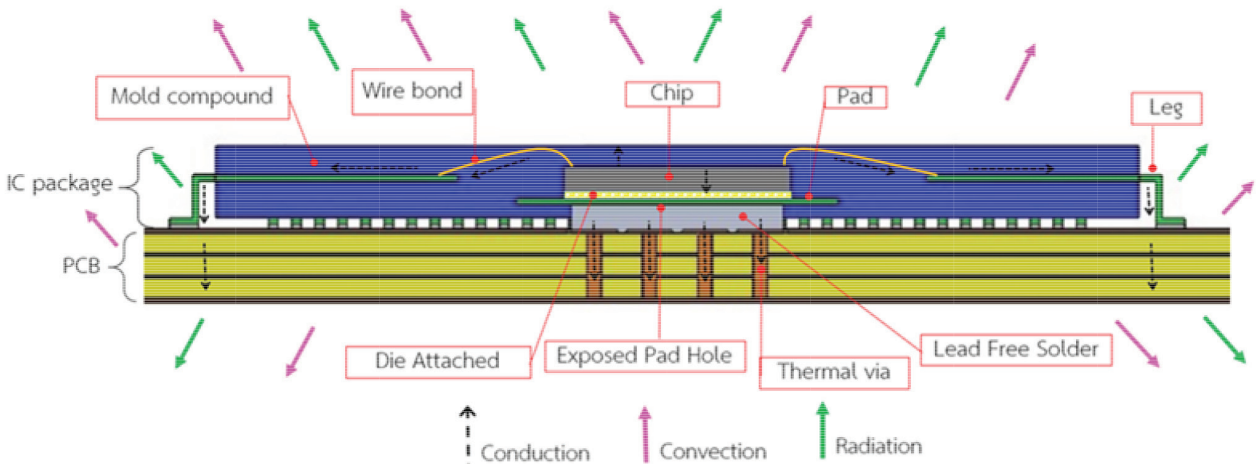
วงจรรวม (Integrated circuit) หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปในชื่อว่า ไอซี (I.C.) หรือ ชิพ (Chip)<sup>1</sup> จะถูกนำไปประกอบเป็นบรรจุภัณฑ์ไอซี (IC package) ด้วยการปิดทับด้วยวัสดุโพลีเมอร์ (Mold compound) เพื่อป้องกันการกระแทกหรือแรงจากภายนอก ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีที่พัฒนาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างรวดเร็วนี้ทำให้การออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ มีขนาดเล็กกะทัดรัด IC package และ chip จึงมีขนาดเล็กลง บางลงในขณะที่ฟังก์ชันการทำงานของ chip มีความซับซ้อนมากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานไฟฟ้าใน chip ที่สูงขึ้น ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อ chip และทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ สั้นลง<sup>2</sup> ดังนั้น การระบายความร้อนจึงเป็นส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ IC package<sup>3</sup> ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธีตั้งแต่โครงสร้างของ IC package เอง เช่น การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของซิลิกอน โดยการเพิ่มแผ่นซิลิกอนหรือ dummy chip<sup>4</sup> การเพิ่มชั้น substrate ใต้ chip หรือที่เรียกว่า ชั้น interposer<sup>5</sup> หรือการปรับปรุงการระบายความร้อนของ IC package ด้วยการติดแผ่นระบายความร้อนและการเพิ่มค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ติดแผ่นระบายความร้อนเข้ากับ IC package หรือที่เรียกว่า joint layer<sup>6</sup> ท้ายที่สุดคือการนำ IC package ไปประยุกต์ใช้งาน โดยปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายความร้อนของ PCB<sup>7</sup> และการเพิ่มพัดลมระบายอากาศ<sup>2,8</sup> แต่เนื่องจากการออกแบบ IC package นั้นจำเป็นต้องทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิที่ผิว chip ว่ามีค่าไม่เกิน temperature limit ที่ถูกกำหนดไว้<sup>2,9</sup> ซึ่งการทดสอบนั้นต้องใช้เวลานาน, มีค่าใช้จ่ายสูงและมีความยุ่งยากซับซ้อนเป็นอย่างมาก

ดังนั้น จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะสามารถประเมินอุณหภูมิที่ผิว chip ได้อย่างรวดเร็วด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการใช้โปรแกรม ANSYS Workbench โดย IC package ที่เลือกใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ คือประเภท TQFP-EP (Thin quad flat package-exposed pad) แบบมีขา 4 แถวซึ่งนิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการระบายความร้อนของ IC package และศึกษาแนวทางในการพัฒนาการระบายความร้อนของ IC package เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดของตัวบรรจุภัณฑ์ต่อไป

**วิธีการศึกษา**

**ศึกษาโครงสร้างของ TQFP-EP และการระบายความร้อน**

จาก Figure 1 chip จะประกอบอยู่บน lead frame ตรงตำแหน่ง pad โดยยึดติดกันด้วยกาวประสาน (die attached) มีการเชื่อมต่อวงจรระหว่าง chip กับขาของ lead frame ด้วยเส้นลวดทองคำ (wire bond) และขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์ที่เรียกว่า เรซิน โดยเครื่องจะทำการหลอมละลายเรซินแล้วฉีดเข้าไปในโมลด์เข้าไปปกคลุมในส่วนชิพและ lead frame ลักษณะเด่นของ TQFP-EP คือจะมีจำนวนขา 4 แถว มีขนาดเล็กและบาง มีช่องด้านล่างระหว่าง pad กับ package ที่ถูกเปิดออก (exposed pad hole) เพื่อช่วยในการระบายความร้อน เมื่อนำตัว package ไปประกอบลงบน PCB จะต้องทำการบัดกรี (soldering) โดยใช้โลหะบัดกรีชนิดไม่มีตะกั่ว (lead free solder) เข้าไปเติมเต็มในส่วนช่องว่างของ exposed pad กับ PCB เพื่อช่วยระบายความร้อนจากข้างในตัว package ลงไปสู่ PCBด้านล่างได้ดีขึ้น



**Figure 1** Cross section and heat flow paths of TQFP-EP

ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิว chip เกิดจากพลังงานไฟฟ้า ในขณะที่ใช้งาน โดยการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นใน IC package จะเกิดขึ้นใน 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสี ซึ่งการพาความร้อนและการแผ่รังสี จะเกิดขึ้นที่ผิวของ IC package และผิวของ PCB ส่วนการนำความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งผ่านทางวัสดุที่เป็นของแข็งชนิดต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างของ IC package ซึ่งอัตราการส่งผ่านความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดและพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ จากกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์จะได้ว่า

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \tag{1}$$

โดย  $\dot{Q}$  คือ อัตราการไหลของความร้อน (W)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน (m<sup>2</sup>)  
 $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/m.°C)

**การวิเคราะห์อุณหภูมิสูงสุดที่ผิว chip ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**

เริ่มจากการสร้างแบบจำลองแบบ 3 มิติ โดยการใช้โปรแกรม solidworks ในงานวิจัยนี้ได้เลือก IC package ประเภท TQFP-EP มา 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด 16x16 mm 20x20 mm และ 24x24 mm แสดงรายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบดัง Table 1 จากนั้นนำแบบจำลอง 3 มิติมาทำการสมมาตรแบบ ¼ ดังแสดงใน Figure 2 และถ่ายโอนแบบจำลองดังกล่าวเข้าสู่โปรแกรม ANSYS workbench ทำการวิเคราะห์แบบจำลองภายใต้สภาวะคงตัว (steady state) เพื่อหาลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในแบบจำลอง รวมถึงอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิว chip โดยจะต้องมีการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุลงในโปรแกรม ได้แก่ ค่า k ของวัสดุต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของ TQFP-EP โดยค่า k ของแต่ละส่วนประกอบแสดงดัง Table 2

**Table 1** Dimensions of components of TQFP-EP

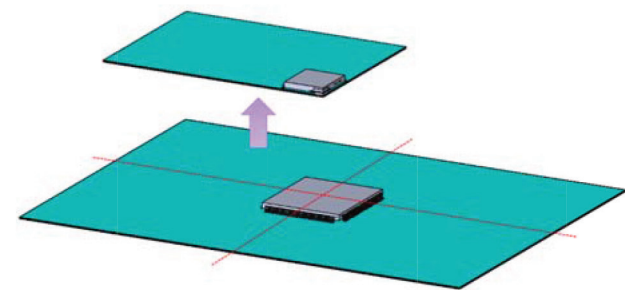
Structure name	Type		
	TQFP-EP no.1	TQFP-EP no.2	TQFP-EP no.3
Package size	16x16 mm	20x20 mm	24x24 mm
Leg	144	144	176
Lead frame pitch	0.4 mm	0.5 mm	0.5 mm
Chip size	5.09x4.92x0.675 mm	5.09x4.92x0.675mm	6x6x0.675 mm
Exposed pad hole size	4.6x4.6 mm	4.6x4.6 mm	4.4x4.4 mm
PCB size	101.5x114.5 mm	101.5x114.5 mm	101.5x114.5 mm

**Table 2** Thermal conductivities of components of TQFP-EP

Component	Material	Thermal conductivity
Chip	Silicon	146.44 W/m.°C
Die Attached	Adhesive	1.5 W/m.°C
Mold Compound	Plastic	0.84 W/m.°C
Lead Free Solder	Sn-Ag-Cu	50 W/m.°C
Pad	Cu	391 W/m.°C
PCB	FR4	0.18 W/m.°C

\*FR4 (FR=Flame Retardant) is a glass fiber epoxy laminate

ทำการสร้างเมชและปรับเมชเพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมของ TQFP-EP แต่ละขนาด ได้จำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองประมาณ 114,751 เอลิเมนต์ ประกอบด้วยจุดต่อทั้งหมดประมาณ 349,924 จุดต่อ



**Figure 2** A 3D model of TQFP-EP symmetry 1/4

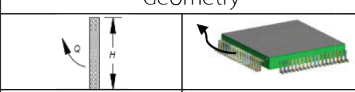

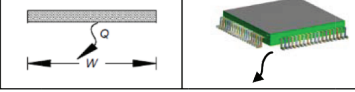
**กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์**

1. กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น  
กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ตำแหน่งต่างๆ บนแบบจำลอง 3 มิติเท่ากับ 25 °C

2. กำหนด Heat Source  
กำหนดปริมาณความร้อนของ chip ที่เกิดจาก power ขณะใช้งานจริงของ TQFP-EP ทั้ง 3 ขนาด เท่ากับ 1.38 W, 1.37 W และ 1.09 W ตามลำดับ

3. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการพาความร้อน  
ที่ผิวด้านนอกของ IC package มีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) แบบธรรมชาติของชิ้นงานแผ่นเรียบขนาดเล็กที่ได้มาจากการทดลองของ Ellison<sup>10</sup> ดังแสดงใน Table 3 และกำหนดค่า h ในส่วนของผิว PCB เท่ากับ 5 W/m<sup>2</sup>.°C<sup>11</sup>

**Table 3** Summary of simplified small device, flat plate heat transfer coefficient formulae

h (W/m <sup>2</sup> .°C)	Geometry
$h = 0.0022 \left( \frac{\Delta T}{P} \right)^{0.35}$	
$h = 0.0018 \left( \frac{\Delta T}{P} \right)^{0.33}$	
$h = 0.0009 \left( \frac{\Delta T}{P} \right)^{0.33}$	

vertical plate: P=H [in.]; horizontal plate: P=WL/[2(W+L)].

**4. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการแผ่รังสี**

มีการกำหนดค่าสภาพการเปล่งรังสี (emissivity, ε) ที่ผิวของวัสดุ โดยที่ผิวของ IC package เท่ากับ 0.8, ที่ผิวของ PCB ในส่วนที่เป็น FR4 และที่ผิวของ PCB ในส่วนที่เป็น copper เท่ากับ 0.8 และ 0.03 ตามลำดับ<sup>11</sup>

การตรวจสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง (Validation) ของค่า  $\theta_{JA}$  ระหว่างการวัดจริงและการสร้างแบบจำลองทางความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

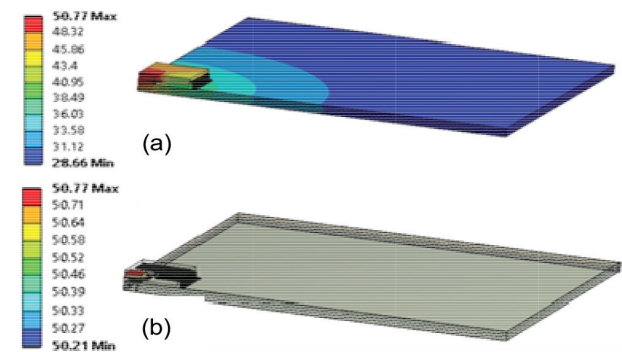
$\theta_{JA}$  คือค่าความต้านทานความร้อนจากที่ผิว chip ถึงอุณหภูมิรอบนอก (thermal resistance from junction-to-ambient, °C/W) มีนิยามดังสมการที่ 2

$$\theta_{JA} = \frac{(T_J - T_A)}{P_H} \tag{2}$$

โดย  $T_J$  = อุณหภูมิที่ผิว chip เมื่อ IC package อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) หลังจากการให้  $P_H$  (°C)  
 $T_A$  = อุณหภูมิรอบนอก (Ambient temperature, °C)  
 $P_H$  = พลังงานไฟฟ้า (W)

โดยทั่วไปวิธีการวัดเพื่อหาค่า  $\theta_{JA}$  ในการพาความร้อนแบบธรรมชาติ จะอ้างอิงตามมาตรฐานของ JEDEC เดียวกัน โดยจุดประสงค์ของการวัดค่า  $\theta_{JA}$  ใช้สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแต่ละ IC package ในสภาพแวดล้อมที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน<sup>9</sup>

จาก Figure 3 (a) แสดงตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิของ TQFP-EP no.1 และ (b) แสดงตัวอย่างการกระจายอุณหภูมิที่ chip ของ TQFP-EP no.1 โดยอุณหภูมิที่ผิว chip ที่ได้จากการ simulation ของ TQFP-EP ทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ 50.77 °C, 49.70 °C และ 42.6 °C ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า  $\theta_{JA}$  ได้จากสมการที่ (2)



**Figure 3** (a) Package and PCB temperature distribution of TQFP-EP no.1 and (b) Chip temperature distribution of TQFP-EP no.1

Table 4 แสดงผลการ validation ของ TQFP-EP ทั้ง 3 ขนาดจะได้ค่า error ระหว่างการวัดจริงและการทำ simulation เท่ากับ -0.11%, 0.16% และ 0.3% ตามลำดับ แสดงถึงความน่าเชื่อถือของการจำลองการถ่ายโอนความร้อนด้วยโปรแกรม ANSYS



**Table 4** Validation result of TQFP-EP

	Type		
	TQFP-EP no.1	TQFP-EP no.2	TQFP-EP no.3
Power	1.38 W	1.37 W	1.09 W
$\theta_{JA}$ measurement	18.69 °C/W	18.00 °C/W	16.10 °C/W
$\theta_{JA}$ simulation	18.67 °C/W	18.03 °C/W	16.15 °C/W
<b>Error</b>	<b>-0.11%</b>	<b>0.16%</b>	<b>0.3%</b>

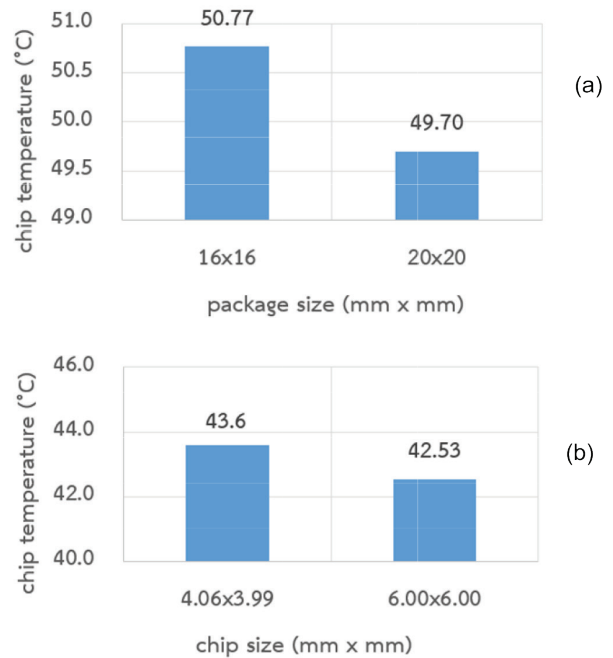
**ผลการศึกษาและการอภิปรายผล**

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของค่าอุณหภูมิที่ผิว chip ของ IC package ประเภท TQFP-EP ทั้ง 3 ขนาด โดยวิธีการทาง finite element ด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อนำมาศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ดังนี้

**ขนาดของ IC package**

ในการเลือกขนาด package เพื่อใช้งานนั้น อาจถูกจำกัดโดยตัวแปรต่างๆ ทั้งในเรื่องของจำนวนขาของ package ที่นำไปใช้งาน ระบบวงจรและพื้นที่ PCB ของลูกค้า ซึ่งขนาดของ package ที่เล็กลง จะทำให้อุณหภูมิที่ผิว chip เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Figure 4 (a) เนื่องจากพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสู่อากาศด้วยการพาความร้อนและการแผ่รังสีลดลง

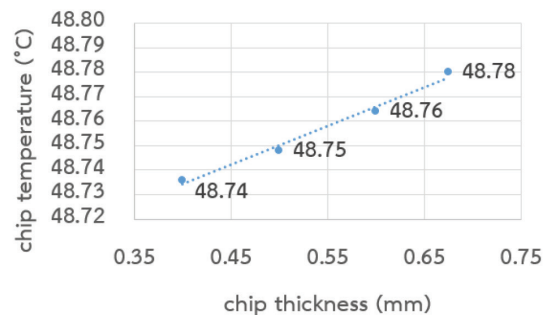
ส่วนขนาดของ chip ได้ถูกกำหนดมาตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ chip ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงขนาดของ chip จึงไม่สามารถทำได้ในขั้นตอนการออกแบบ IC package แต่ในบางครั้งการคาดเดาแนวโน้มอุณหภูมิที่ผิว chip โดยเปรียบเทียบกับ package เดียวกัน ที่ขนาด chip ต่างๆ กันอาจเป็นประโยชน์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ เช่น chip ที่มีขนาดเล็กอาจจะมีความจำเป็นที่ต้องเพิ่มขนาด exposed Pad หรือเลือก DA ที่มีค่า k ที่สูงขึ้น ซึ่งผลจากแบบจำลองทาง finite element ดังแสดงใน Figure 4 (b) พบว่าขนาดของ chip ที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิที่ผิว chip มีค่าลดลง เนื่องจากอัตราการถ่ายโอนพลังงานความร้อนต่อพื้นที่ (heat flux) มีค่าลดลง



**Figure 4** (a) Relation of the chip temperature versus the package size (b) Relation of the chip temperature versus the chip size

**ความหนาของ chip**

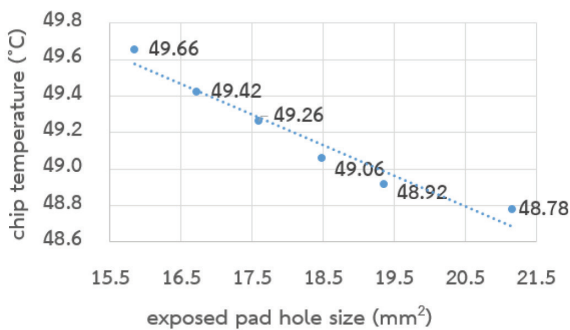
ผลจากแบบจำลองทาง finite element ดังแสดงใน Figure 5 เนื่องจากความหนาของ chip ที่เพิ่มขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผิว chip ลงสู่ PCB ได้น้อยลง แต่การเพิ่มความหนาของ chip จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิว chip เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



**Figure 5** Relation of the chip temperature versus the chip thickness

**ขนาดของช่อง exposed pad**

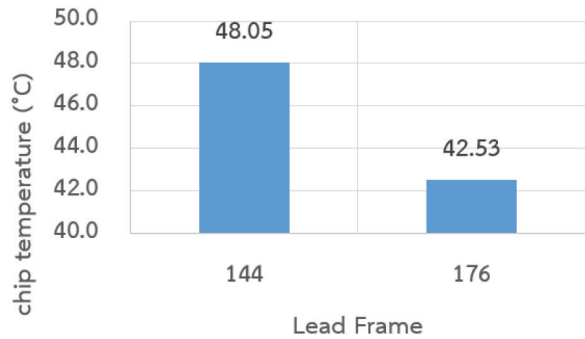
ช่อง exposed pad คือช่องด้านล่างระหว่าง pad กับ package ที่ถูกเปิดออก ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งเป็นข้อดีของ IC package ประเภท TQFP-EP เมื่อเปรียบเทียบกับ IC package แบบที่มีขาประเภทอื่นๆ แล้วนอกจากจะสามารถระบายความร้อนจากตัว package ลงสู่ PCB ทางขาของ lead frame แล้วยังสามารถระบายความร้อนโดยตรงสู่ PCB ทางช่อง exposed pad ได้อีกด้วย ดังนั้นขนาดของช่อง exposed pad จึงมีความสำคัญต่อการระบายความร้อนจาก package ลงสู่ PCB เป็นอย่างมาก โดยจะเห็นได้จากผลของแบบจำลองทาง finite element ซึ่งเมื่อขนาดของช่อง exposed pad เพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ผิว chip จะลดลง ดังแสดงใน Figure 6 เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจาก package ลงสู่ PCB ดีขึ้น



**Figure 6** Relation of the chip temperature versus the exposed pad hole size

**จำนวนขา lead frame**

จำนวนขา lead frame โดยส่วนใหญ่แล้วจะถูกกำหนดมาจากความต้องการช่องทางสัญญาณไฟฟ้าของตัว package ซึ่งจำนวนขา lead frame ที่มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิผิว chip ลดลง ดังแสดงใน Figure 7 เนื่องจากจำนวนขาที่เพิ่มขึ้นหมายถึงโลหะทองแดงที่มากขึ้น ซึ่งทองแดงมีค่า k ที่สูง ทำให้การถ่ายเทความร้อนภายใน package สามารถลงสู่ PCB ได้ดีขึ้น เปรียบเทียบจำนวนขาของ lead frame จำนวน 144 ขา และ 176 ขา พบว่าอุณหภูมิที่ผิว chip สามารถลดลงได้ถึง 5.52 °C

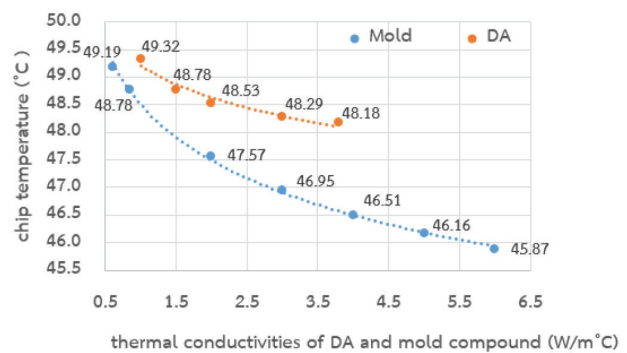


**Figure 7** Relation of the chip temperature versus the number of package legs of the lead frame

**สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของ DA (die attached) และ mold compound**

DA นอกจากจะมีความสำคัญในการยึดตัว chip เข้ากับ lead frame แล้วยังเป็นส่วนสำคัญในการถ่ายเทความร้อนจาก chip ลงสู่ lead frame โดยตรงอีกด้วย ดังนั้นเมื่อค่า k ของ DA เพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ผิว chip จะลดลง ดังแสดงใน Figure 8 เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากผิว chip ลงสู่ lead frame และ PCB ได้ดีขึ้น

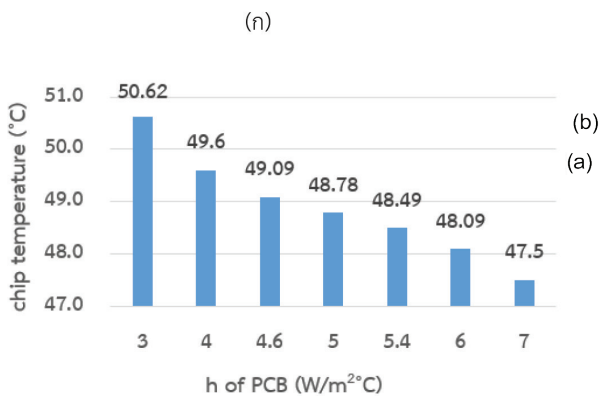
ส่วน mold compound เป็นวัสดุที่ใช้ห่อหุ้มตัว IC package ทั้งหมด ดังนั้นการเพิ่มค่า k ของ mold compound จึงทำให้อุณหภูมิที่ผิว chip มีค่าลดลง เนื่องจากการนำความร้อนโดยรวมของ package มากขึ้น ดังแสดงใน Figure 8



**Figure 8** Relation of the chip temperature versus thermal conductivities of DA and mold compound

**สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่ผิวของ IC package และผิวของ PCB**

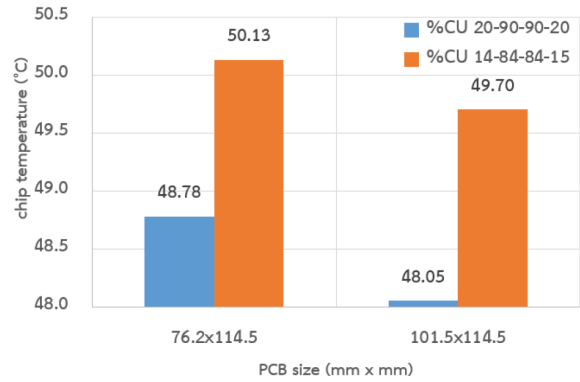
การศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยโหมดการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) ซึ่งในบางครั้งอุปกรณ์ที่นำ IC package ไปประยุกต์ใช้งานอาจมีค่า h ที่เพิ่มขึ้นหรือน้อยลง เช่น การติดตั้งลมระบายความร้อนให้แก่อุปกรณ์ หรือการติดตั้งระบายความร้อนบนตัว IC package โดยเมื่อค่า h ที่ผิว IC package เพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิที่ผิว chip มีค่าลดลง ดังแสดงใน Figure 9 (a) เช่นเดียวกับที่ผิวของ PCB โดยเมื่อค่า h ที่ผิวของ PCB เพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิที่ผิว chip มีค่าลดลง ดังแสดงใน Figure 9 (b)



**Figure 9** (a) Relation of the chip temperature versus convection heat transfer coefficients around the surface of the IC package (b) PCB

**ขนาดของ PCB และเปอร์เซ็นต์ของ Copper (%Cu) ใน PCB**

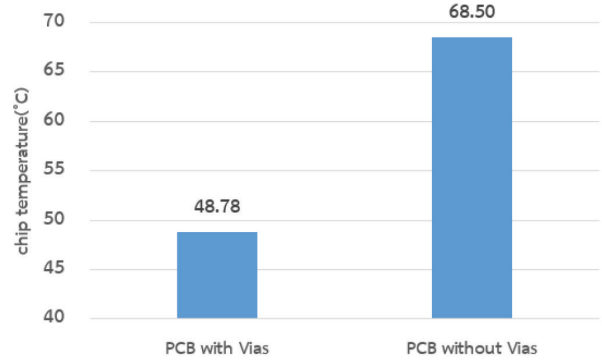
ตามมาตรฐาน JEDEC ได้กำหนดขนาดของ PCB และ %Cu ในแต่ละชั้นของ PCB ไว้เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกันในการออกแบบ IC package<sup>13</sup> แต่ในการนำ IC package ไปประยุกต์ใช้งานนั้น ขนาดของ PCB และ %Cu ในแต่ละชั้นของ PCB จะขึ้นอยู่กับระบบวงจรและขนาดของอุปกรณ์ที่นำ IC package ไปใช้งาน ซึ่งในบางครั้งขนาด PCB อาจจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่กว่าที่มาตรฐาน JEDEC ได้กำหนดไว้ โดยขนาด PCB ที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิว chip ลดลง เช่นเดียวกับ %Cu นั่นคือเมื่อ %Cu ในชั้น PCB เพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ผิว chip จะลดลง ดังแสดงใน Figure 10 โดยมีการเปรียบเทียบขนาดของ PCB ที่มี %Cu ต่างกัน 2 ค่า คือ %Cu มาก (20-90-90-20) และ %Cu น้อย (14-84-84-15) โดยค่าตัวเลขในวงเล็บแสดงถึง %Cu ในชั้นทั้งสี่ของ PCB



**Figure 10** Relation of the chip temperature versus PCB size and %Cu in each layer

**PCB ที่มี thermal vias และไม่มี thermal vias**

Thermal vias คือรูทองแดงที่เชื่อมต่อ PCB ในแต่ละชั้นเพื่อช่วยนำความร้อนลงสู่ PCB ด้านล่าง ดังแสดงใน Figure 1 ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ผิว chip ระหว่าง PCB ที่ไม่มี thermal vias และ PCB ที่มี thermal vias ของ TQFP-EP โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ thermal vias เท่ากับ 0.3 mm มีจำนวน 16 แห่งที่อยู่ใน PCB จากผลการวิเคราะห์พบว่า PCB ที่มี thermal vias นั้นจะทำให้ อุณหภูมิที่ผิว chip ของ TQFP-EP ลดลงถึง 19.72 °C ดังแสดงใน Figure 11



**Figure 11** Relation of the chip temperature versus PCB with thermal vias and without thermal vias

**สรุปผลการศึกษา**

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่ามีหลายวิธีที่ช่วยลดอุณหภูมิที่ผิว chip ขณะใช้งาน ตั้งแต่การเพิ่มขนาดและลดความหนาของ chip หรือในส่วนของตัว IC package เอง ได้แก่ การเพิ่มขนาด, เพิ่มจำนวนขาและเพิ่มขนาดของช่อง exposed pad หรือการเลือกใช้ DA และ mold compound ที่มีค่า k ที่สูงขึ้น รวมถึงการนำ IC package ไปใช้งานบน PCB ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือ

%Cu ใน PCB ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ PCB ที่มี thermal vias รวมถึงการเพิ่มค่า h บน IC package และ PCB ด้วยการติดพัดลมระบายความร้อนหรือติดแผ่นระบายความร้อน ซึ่งข้อได้เปรียบของ IC package ประเภท TQFP-EP คือการที่มีช่อง exposed pad ดังนั้น การที่มี thermal vias อยู่ใน PCB จะสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิว chip ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

### เอกสารอ้างอิง

1. เทคโนโลยีการผลิตและออกแบบวงจรรวม, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา [https://cuir.car.chula.ac.th/dspace/bitstream/123456789/.../4/Chalermchai\\_kok\\_ch3.pdf](https://cuir.car.chula.ac.th/dspace/bitstream/123456789/.../4/Chalermchai_kok_ch3.pdf), เข้าดูเมื่อวันที่ 05/02/2562.
2. Raja, B., Praveenkumar, V., Leelaprasad, M. and Manigandan, P. (2015). Thermal simulations of an electronic system using Ansys Icepak, *Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 5(11), November 2015, pp. 57-68.
3. ไพศาล นามผล (2558). การถ่ายเทความร้อนและการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, กรุงเทพฯ: บริษัท ทริปเพิ้ล กรุ๊ป จำกัด.
4. Ma, Y.Y., Chong, D.Y.R., Wang, C.K. and Sun, A.Y.S. (2005). Development of Ball Grid Array Packages with Improved Thermal Performance, paper presented in the 7<sup>th</sup> *Electronics Packaging Technology Conference 2005*, Singapore.
5. Chen, M., Tang, Y. and Wang B. (2010). Dependence of IGBT Junction-Case Steady State Thermal Resistance on Heating Current, paper presented in the 3<sup>rd</sup> *International Conference on Computer and Electrical Engineering 2010*, Singapore.
6. Ishizaki, T., Yanase, M., Kuno, A., Satoh, T., Usui, M., Osawa, F. and Yamada, Y. (2015). Thermal simulation of joints with high thermal conductivities for power electronic devices, *Microelectronics Reliability*, vol. 55(7), June 2015, pp. 1060-1066.
7. Osone, Y. (2006). Thermal Design of Power Semiconductor Modules for Mobile Communication Systems, paper presented in the *THERMINIC 2006*, Nice, France.
8. Zhao, Z. (2003). Thermal design of broadband communication system with detailed modeling of TBGA packages, *Microelectronics Reliability*, vol. 43(5), May 2003, pp. 785-793.
9. JESD51-2A, *Integrated circuits thermal test method environmental conditions-natural convection (still air)*, JEDEC Standard, January 2008.
10. Ellison, G.N. (2011). *Thermal Computations for Electronics: conductive, radiative and convective air cooling*, CRC Press, New York.
11. Tummala R.R. (2001). *Fundamentals of Microsystems Packaging*, McGraw-Hill Professional.
12. Ross R.J. (2011). *Microelectronics Failure Analysis*, 6<sup>th</sup> edition, ASM International.
13. JESD51-7, *High effective thermal conductivity test board for leaded surface mount packages*, EIA/JEDEC Standard, February 1999.

## การจับความรู้สึกของคนจากใบหน้าด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์

### Classification of human facial expression using artificial intelligence techniques

ศศิชา บุญเก่า<sup>1</sup>, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย<sup>2\*</sup>

Sasicha Boonkao<sup>1</sup>, Withit Chatlatanagulchai<sup>2\*</sup>

Received: 18 July 2019; Revised: 19 August 2019; Accepted: 10 September 2019

#### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการนำเครื่องจักรไปใช้ในการทำงานที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆในสังคม จึงนำไปสู่ความหลากหลายของงานรวมถึงสิ่งที่ซับซ้อนมาก ดังนั้นการรับรู้ของเครื่องจักรจึงต้องการให้เครื่องเข้าใจเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมและความเข้าใจของคู่สนทนา โดยในบทความนี้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเรียนรู้ของเครื่องจักรที่ตระหนักถึงอารมณ์ที่แสดงออกทางใบหน้าของมนุษย์ โดยการพัฒนาในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ผสมผสานกันระหว่างการจำแนกอารมณ์และการเรียนรู้เชิงลึกโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันที่ถูกฝึกมาแล้วรวมกับการเรียนรู้แบบถ่ายโอนเพื่อระบุอารมณ์ความรู้สึกที่สำคัญของมนุษย์ ทั้งเจ็ดอารมณ์ ได้แก่ ความโกรธ ความรังเกียจ ความกลัว ความสุข ความเศร้า ความประหลาดใจและความเป็นกลาง โดยเราสามารถใช้ประโยชน์จากชุดเครื่องมือและถ่ายโอนเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกนี้ เช่น การตระหนักถึงอารมณ์ที่แสดงออกทางใบหน้าของผู้สูงอายุที่แสดงออกว่าต้องการความช่วยเหลือเมื่อใด โดยผลการทดลองที่ได้งานวิจัยนี้สามารถตรวจจับอารมณ์ของมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ได้

**คำสำคัญ:** เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ การจำแนกอารมณ์ เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

#### Abstract

Machines are increasingly being used for different work in society for a variety of tasks including very complex things. Therefore, the machine's perception requires that it understands the environment and the interlocutor. This article reports research on machinery that learns to recognize the emotions expressed in human faces. The development of this research uses artificial intelligence techniques, combined with emotional classification and in-depth learning by using an artificial neural network that has been trained together with transfer learning to identify the seven major emotions of human emotions, anger, disgust, fear, happiness, sadness, surprise and neutral. We can take advantage of the tool set and transfer this deep learning technique, such as recognizing the emotions expressed in the face of the elderly that show when they need help. The results of the experiment, show that machines can effectively detect human emotions with precision and can be used to develop into commercial products.

**Keywords:** Artificial intelligence techniques, Emotional classification, deep learning techniques

<sup>1</sup> นิสิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

<sup>2</sup> อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

\* ติดต่อ: fengwtc@ku.ac.th, 0-2797-0999 ต่อ 1858

<sup>1</sup> Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Road, Ladyao Sub-district, Chatuchak District, Bangkok 10900

<sup>2</sup> professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Road, Ladyao Sub-district, Chatuchak District, Bangkok 10900

## บทนำ

อารมณ์คือ ความรู้สึกที่เกิดจากการได้รับการกระทบจากสิ่งเร้า อารมณ์มีได้ทั้งทางบวกและทางลบ เป็นได้ทั้งความพึงพอใจและความรู้สึกไม่สมปรารถนา พฤติกรรมของมนุษย์เราเป็นจำนวนมากอยู่ภายใต้การควบคุมของอารมณ์ อารมณ์จึงมีความสำคัญและเป็นเรื่องที่เราจะต้องเรียนรู้และเข้าใจ

ในปัจจุบันมีการนำเครื่องจักรไปใช้ในการทำงานที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในสังคม จึงนำไปสู่ความหลากหลายของงานรวมถึงสิ่งที่ซับซ้อนมาก ดังนั้นการรับรู้ของเครื่องจักรจึงต้องการให้เครื่องเข้าใจเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมและความเข้าใจของคู่สนทนา โดยการแสดงออกทางสีหน้าของมนุษย์สามารถบ่งบอกถึงอารมณ์และความรู้สึกในขณะนั้นได้เป็นอย่างดี การรับรู้อารมณ์ของมนุษย์จึงสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ด้านการพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถรับรู้การแสดงอารมณ์ของมนุษย์ได้ ด้านการแพทย์ ช่วยให้แพทย์สามารถรับรู้อารมณ์ของผู้ป่วยเพื่อนำไปวินิจฉัย และเลือกวิธีการรักษาได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและใช้เป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ได้ตอบได้อย่างเหมาะสม จึงทำให้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการการรับรู้อารมณ์ของมนุษย์กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งนำไปสู่การใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ในการรู้จำอารมณ์ของมนุษย์โดยส่วนใหญ่จะใช้การรู้จำอารมณ์จากการแสดงออกทางสีหน้า ซึ่งมีรูปแบบของอารมณ์พื้นฐานอยู่เจ็ดอารมณ์ด้วยกัน คือ ความโกรธ(anger), ความรังเกียจ(disgust), ความกลัว(fear), ความสุข(happiness), ความเศร้า(sadness), ความประหลาดใจ(surprise) และความเป็นกลาง(neutral)

## วัตถุประสงค์และขอบเขต

ออกแบบและพัฒนาระบบให้สามารถเรียนรู้อารมณ์ที่แสดงออกอารมณ์ทางใบหน้าของมนุษย์โดยใช้ประโยชน์จากเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์

ใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ผสมผสานกันระหว่างการจำแนกอารมณ์และการเรียนรู้เชิงลึกโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันที่ถูกฝึกมาแล้วร่วมกับการเรียนรู้แบบถ่ายโอน เพื่อระบุอารมณ์ความรู้สึกที่สำคัญของมนุษย์ทั้งเจ็ดอารมณ์ ได้แก่ ความโกรธ ความรังเกียจ ความกลัว ความสุข ความเศร้า ความประหลาดใจ และความเป็นกลาง

## การออกแบบเครือข่ายประสาทเทียม

### 1. เครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (convolutional neural network)

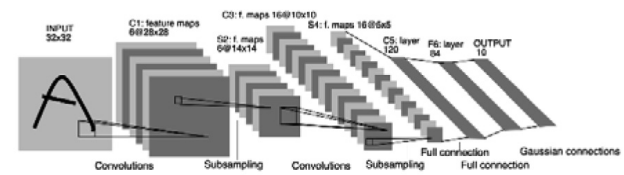


Figure 1 convolutional neural network of LeNet (Sorce: LeCun et al. (1998))

LeNet ประกอบด้วยชั้น (layer) ต่าง ๆ ดังนี้

#### 1.1 Input layer

สำหรับใน Figure 1 input data เป็น matrix ขนาด แต่ละ element ของ matrix มีค่า 0-255 (เลข 8 บิต) โดยเลข 0 แทนสีดำ เลข 255 แทนสีขาว และเลขระหว่างกลางแทนสีเทาที่มีความเข้มแตกต่างกัน (grayscale) หากรูปที่นำมาเป็น input เป็นรูปสี input data จะเป็น matrix ขนาด  $n \times n \times 3$  เมื่อ  $n$  แทนจำนวนจุด (pixel) ของภาพในแต่ละมิติ และ 3 คือความเข้มของแสงในแต่ละแม่สี red, green, blue (RGB)

#### 1.2 Convolution layer ชั้นที่ 1 (C1)

เป็นชั้นที่เป็นที่มาของคำว่าเครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน รูปด้านล่าง แสดงตัวอย่างการทำคอนโวลูชันของ convolution layer โดย input data เป็น matrix ขนาด  $5 \times 5 \times 3$  แทนภาพสี ขนาด  $5 \times 5$  pixels สังเกตว่าในรูปมีการเพิ่มเลข 0 เข้าไปที่ขอบของภาพ โดยมีความหนา 1 pixel เรียกเทคนิคนี้ว่า zero padding เพื่อเป็นการอนุรักษ์ความสำคัญของ pixel ที่อยู่ตรงขอบของภาพ การทำ zero padding ในรูปนี้ ทำให้เกิด input data ขนาด  $7 \times 7 \times 3$  ในรูปมีค่าถ่วงน้ำหนัก 2 ชุดคือ  $w_0$  และ  $w_1$  ทั้งคู่มีขนาด ค่าถ่วงน้ำหนักนี้มักมีอีกชื่อว่า filter หรือ kernel เมื่อนำ filter มา convolute (ในกรณีนี้คือ dot product) กับ input layer matrix โดยขยับ filter matrix ไปทีละ 2 หน่วย (เรียกว่า stride = 2) จะได้ output ของ layer ที่มีขนาด  $3 \times 3 \times 2$  เมื่อ 2 คือจำนวนของค่าถ่วงน้ำหนัก

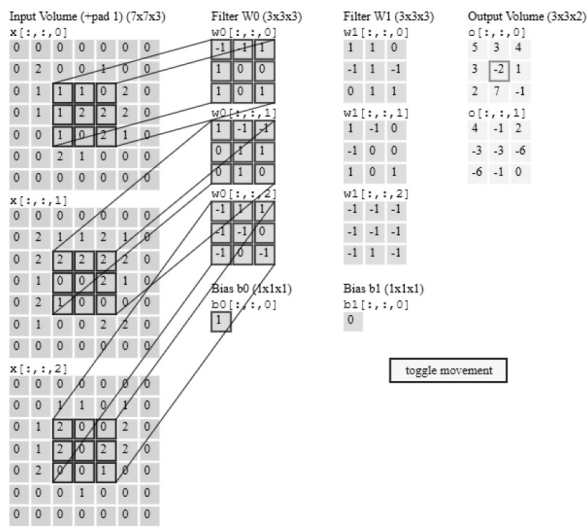


Figure 2 example of convolution layer (Source: <http://cs231n.github.io/>)

1.3 Subsampling layer ชั้นที่ 2 (S2)

รูปที่ 3 แสดงการทำ subsampling แบบ max pool ของ subsampling layer โดยมี filter ขนาด 2x2 หนึ่งตัว และมี stride เท่ากับ 2 subsampling แบบ max pool นี้จะเลือกค่าที่สูงที่สุดออกมา

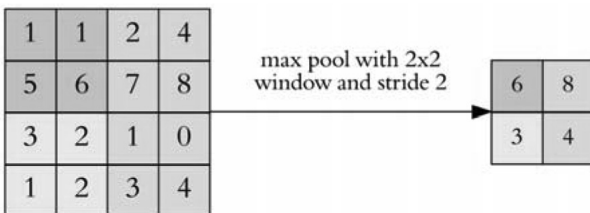


Figure 3 example of subsampling layer (Source: <http://cs231n.github.io/>)

การทำ subsampling เป็นการลด resolution ของ feature map เพื่อลด sensitivity ของเครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน ต่อการขยับและการบิดเบือนของภาพขาเข้ายิ่งขึ้นไปอีก

Subsampling layer ชั้นที่ 2 (S2) ของ LeNet ใน Figure 1 ใช้ filter ทั้งหมด 6 filter แต่ละ filter มีขนาด 2 x 2 มี stride เท่ากับ 2 ดังนั้นจะทำให้เกิด output ทั้งหมด 6 matrix (เรียกว่า feature map) แต่ละ matrix มีขนาด 14 x 14 pixel ใน S2 นี้ 2 x 2 = 4 inputs จะถูกนำมาบวกกัน แล้วคูณด้วย weight ก่อนจะไปนำไปบวกกับค่า bias และเข้าไปสู่ฟังก์ชัน sigmoidal เช่นเดียวกับ Subsampling layer ชั้นที่ 2 (S2) สำหรับ LeNet ใน Figure 1 คือ hidden layer 2 ของเครือข่ายประสาทเทียมทั่วไป โดยมีจำนวน neuron เท่ากับ 6

(เท่ากับจำนวนชุดของ weight) layer นี้มีจำนวน trainable parameter ทั้งหมดเท่ากับ 12 ค่า ((1 weight + 1 bias) x 6 neurons) และมีจำนวน connection ทั้งหมดเท่ากับ 5,880 ครั้ง ((2x2+1) x 14 strides x 14 strides x 6 neurons)

3.1.4 Convolution layer ชั้นที่ 3 (C3)

Convolution layer ชั้นที่ 3 (C3) ของ LeNet ใน Figure 1 ใช้ filter ทั้งหมด 16 filter ด้วยกัน แต่ละ filter มีขนาด 5 x 5 มี stride เท่ากับ 1 จึงทำให้เกิด output ขนาด 10 x 10 pixel ซึ่งข้อแตกต่างของ C3 จาก C1 คือ แต่ละ filter ทำการ convolute กับบาง input feature map เท่านั้นก่อนจะนำผลมารวมกัน ในรูปที่ 4 แต่ละหลัก แสดง input feature map ของ C3 ที่นำมา convolute กับแต่ละ filter การทำเช่นนี้มีเหตุผลสองประการคือ ลดจำนวนการคำนวณของคอมพิวเตอร์ลง และทำให้เกิดการผสมของ feature ทำให้เกิด feature ที่ต่างออกไป

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	X			X	X	X			X	X	X	X		X	X	
1	X	X			X	X	X			X	X	X	X		X	
2	X	X	X			X	X	X			X		X	X	X	
3		X	X	X		X	X	X	X		X		X	X		
4			X	X	X		X	X	X	X		X	X		X	
5				X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	

Figure 4 input feature map of C3 (Source: LeCun et al. (1998))

เช่นเดียวกับ Convolution layer ชั้นที่ 3 (C3) ของ LeNet ใน Figure 1 คือ hidden layer 3 ของเครือข่ายประสาทเทียมทั่วไป โดยมีจำนวน neuron เท่ากับ 16 (เท่ากับจำนวนชุดของ weight) layer นี้มีจำนวน trainable parameter ทั้งหมดเท่ากับ 1,516 ค่า ((5 x 5 weights x 3 input maps x 6 filters) + (5 x 5 weights x 4 input maps x 9 filters) + (5 x 5 weights x 6 input maps x 1 filter) + 16 biases) และมีจำนวน connection ทั้งหมดเท่ากับ 156,000 ครั้ง (((5x5+1)x3x6 + (5x5+1)x4x9 + (5x5+1)x6x1) x 10 strides x 10 strides)

1.5 Subsampling layer ชั้นที่ 4 (S4)

Subsampling layer ชั้นที่ 4 (S4) ของ LeNet ใน Figure 1 ใช้ filter ทั้งหมด 16 filter แต่ละ filter มีขนาด 2 x 2 มี stride เท่ากับ 2 ดังนั้นจะทำให้เกิด output ทั้งหมด 16 matrix (เรียกว่า feature map) แต่ละ matrix มีขนาด 5 x 5 pixel ซึ่งใน S4 นี้ 2 x 2 = 4 inputs จะถูกนำมาบวกกันแล้วคูณด้วย weight ก่อนจะไปนำไปบวกกับค่า bias

และเข้าไปสู่ฟังก์ชัน sigmoidal เช่นเดียวกับชั้น S2

Subsampling layer ชั้นที่ 4 (S4) สำหรับ LeNet ในรูปที่ 1 คือ hidden layer 4 ของเครือข่ายประสาทเทียมทั่วไปโดยมีจำนวน neuron เท่ากับ 16 (เท่ากับจำนวนชุดของ weight) layer นี้มีจำนวน trainable parameter ทั้งหมดเท่ากับ 32 ค่า ((1 weight + 1 bias) x 16 neurons) และมีจำนวน connection ทั้งหมดเท่ากับ 2,000 ครั้ง ((2x2+1) x 5 strides x 5 strides x 16 neurons)

**1.6 Convolution layer ชั้นที่ 5 (C5)**

Convolution layer ชั้นที่ 5 (C5) ของ LeNet ในรูปที่ 1 ใช้ filter ทั้งหมด 120 filter ด้วยกัน แต่ละ filter มีขนาด 5 x 5 โดยแต่ละ filter จะ convolute กับ output ของ layer S4 ทั้ง 16 feature maps หรือที่เรียกว่า fully-connected ทำให้เกิด output ทั้งหมด 120 ค่า แต่ละค่ามีขนาด 1 x 1 เช่นเดียวกับ Convolution layer ชั้นที่ 5 (C5) ของ LeNet ใน Figure 1 คือ hidden layer 5 ของเครือข่ายประสาทเทียมทั่วไป โดยมีจำนวน neuron เท่ากับ 120 (เท่ากับจำนวนชุดของ weight) layer นี้มีจำนวน trainable parameter เท่ากับ จำนวน connection เท่ากับ 48,120 ค่า (5 x 5 weights x 16 input maps x 120 filters + 120 biases)

**1.7 Fully-connected layer ชั้นที่ 6 (F6)**

ชั้นนี้มี 84 neuron ต่อกับ output ทั้ง 120 ค่าจากชั้น C5 แบบ fully connected ชั้นนี้จึงมีจำนวน trainable parameter เท่ากับจำนวน connection เท่ากับ 10,164 ค่า (84 x 120 weights + 84 biases)

**1.8 Output layer**

ชั้นนี้มี 10 output (แทนตัวเลข 0 ถึง 9) และมี 84 input แต่ละ output คือ Euclidean RBF unit มีค่าเท่ากับ

$$y_i = \sum_j (x_j - w_{ij})^2, \tag{1}$$

เมื่อ เป็น index ของ output และ เป็น index ของ input โดย ถูกออกแบบในเบื้องต้น ให้เป็นค่า weight ที่ แทนตัวเลขที่ถูกต้องของ output การปรับค่า weight ทั้งหมดของเครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน ทำด้วยวิธีการ backpropagation โดย minimize loss function ดังนี้

$$E(W) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P y_{D^p}(Z^p, W), \tag{2}$$

เมื่อ แทน output ของ class ที่ถูกต้อง

**2. Pretrained CNN: GoogLeNet**

GoogLeNet ถูกเสนอโดย Szegedy et al.

(2015) เป็นเครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ที่ ถูก pretrain กับรูปภาพใน ImageNet database (www.image-net.org) ในการแข่งขัน ImageNet Large-Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) รูปภาพที่ใช้ในการ pretrain มีจำนวนหนึ่งล้านรูป แบ่งออกเป็น 1000 ประเภท เช่น คีบอร์ด เม้าส์ ดินสอ สัตว์ประเภทต่างๆ

type	patch size/stride	output size	depth	#1x1	#3x3 reduce	#3x3	#5x5 reduce	#5x5	pool	params	ops
convolution	7x7/2	112x112x64	1							2.7K	34M
max pool	3x3/2	56x56x64	0								
convolution	3x3/1	56x56x192	2		64	192				112K	360M
max pool	3x3/2	28x28x192	0								
inception (3a)		28x28x256	2	64	96	128	16	32	32	159K	120M
inception (3b)		28x28x480	2	128	128	192	32	96	64	380K	304M
max pool	3x3/2	14x14x480	0								
inception (4a)		14x14x512	2	192	96	208	16	48	64	394K	73M
inception (4b)		14x14x512	2	160	112	224	24	64	64	437K	88M
inception (4c)		14x14x512	2	128	128	256	24	64	64	463K	100M
inception (4d)		14x14x528	2	112	144	288	32	64	64	580K	119M
inception (4e)		14x14x832	2	256	160	320	32	128	128	840K	170M
max pool	3x3/2	7x7x832	0								
inception (5a)		7x7x832	2	256	160	320	32	128	128	1072K	54M
inception (5b)		7x7x1024	2	384	192	384	48	128	128	1388K	71M
avg pool	7x7/1	1x1x1024	0								
dropout (40%)		1x1x1024	0								
linear		1x1x1000	1							1000K	1M
softmax		1x1x1000	0								

Figure 5 layers of GoogLeNet (Sorce: Szegedy et al. (2015))

**3. Pretrained CNN: Inception-v3**

Inception-v3 ถูกเสนอโดย Szegedy et al. (2016) เป็นเครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ที่ ถูก pretrain กับรูปภาพใน ImageNet database เช่นเดียวกับ GoogLeNet

Inception-v3 ที่เสนอโดย Szegedy et al. (2016) มีชั้นต่างๆ ดังใน Table 1

Type	Patch size/stride or remarks	Input size
Conv	3 x 3/2	299x299x3
Conv	3 x 3/1	149x149x32
Conv padded	3 x 3/1	147x147x32
Pool	3 x 3/2	147x147x64
Conv	3 x 3/1	73x73x64
Conv	3 x 3/2	71x71x80
Conv	3 x 3/1	35x35x192
3 x Inception	As in figure 3	35x35x288
5 x Inception	As in figure 4	17x17x768
2 x Inception	As in figure 6	8x8x1280
Pool	8 x 8	8x8x2048
Linear	Logits	1x1x2048
softmax	Classifier	1x1x1000



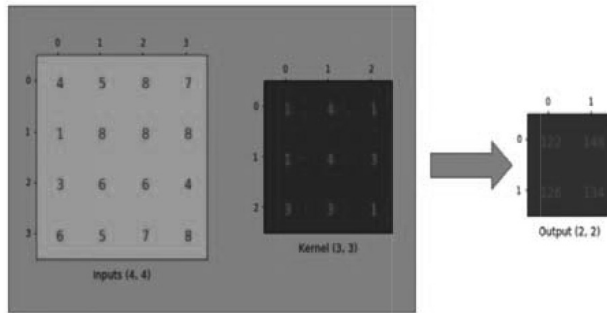


Figure 6 example of convolution (Source: Shibuya (2017))

Figure 6 แสดงให้เห็นว่า Convolution layer ทำการ down-sampling ข้อมูลขาเข้า และสามารถถูกนำมาจัดเรียงใหม่ โดยการเติมศูนย์ในบางตำแหน่ง ให้เป็น matrix ขนาด 4x16 เมื่อนำมาคูณกับ input ที่ทำให้เป็นเวกเตอร์ขนาด 16x1 จะได้ output เป็นเวกเตอร์ขนาด 4x1

4. Pretrained CNN: ResNet50

ResNet50 เป็น deep residual learning network โดยมาจากความคิดที่ว่า deeper network (neural network ที่มีหลายชั้น) ยากที่จะเทรนให้ได้ถึงจุด optimum ดังนั้นแทนที่จะพยายามเรียนรู้ฟังก์ชันที่ต้องการคือ  $H(x)$  network นี้จะเรียนรู้ residual function  $F(x) = H(x) - x$  แทน ดังแสดงใน Figure 7 ResNet50 จึงมีลักษณะเป็น feed-forward network ชนิดหนึ่ง

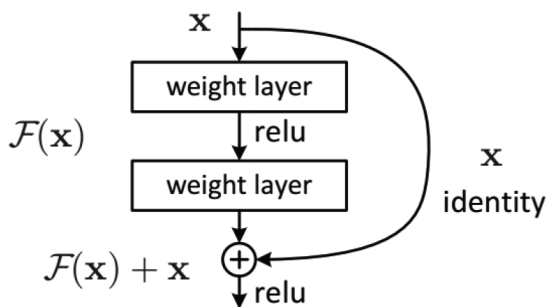


Figure 7 residual function of ResNet50

5. การเรียนรู้แบบถ่ายโอน (transfer learning)

การเรียนรู้แบบถ่ายโอน เป็นการนำ pretrained CNN มาใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับ train CNN เพื่อการทำงานในลักษณะอื่น transfer learning รวดเร็วกว่าการเริ่ม train

CNN ตั้งแต่ต้นและใช้จำนวนภาพสำหรับ training น้อยกว่ามาก ทั้งนี้เนื่องจาก pretrained CNN ได้เรียนรู้ features ต่างๆ ของวัตถุไว้มากแล้ว ตัวอย่างเช่น การเริ่ม train CNN ใหม่ทั้งหมดอาจต้องใช้ภาพเป็นล้านๆภาพ ในขณะที่การใช้ transfer learning อาจใช้ภาพเพียงไม่กี่ร้อยภาพ เป็นต้น

Figure 8 แสดงขั้นตอนการทำ transfer learning โดยทั่วไปสาม layer สุดท้ายได้แก่ fully connected layer; softmax layer; และ classification layer จะเป็นชั้นที่เรียนรู้เฉพาะงาน ในขณะที่ชั้นแรกๆจะเรียน low-level features เช่น ขอบ (edge) หยด (blob) สี (color) การทำ transfer learning จะนำชั้นแรกๆนี้มาใช้ต่อ ในขณะที่เปลี่ยนสาม layer สุดท้ายให้เป็นเฉพาะสำหรับงานใหม่ การ train จะใช้ภาพเพียงไม่กี่ร้อยภาพ เนื่องจากชั้นแรกๆได้เรียนรู้ low-level features ไว้แล้ว

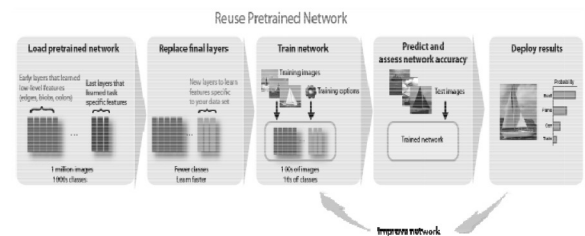


Figure 8 transfer learning (Source: Beale et al. (2018a))

วิธีการดำเนินการวิจัยและผลการทดลอง

1. การหา Dataset

งานวิจัยนี้จำแนกอารมณ์ของคนเป็น 7 อารมณ์ด้วยกันคือ ความโกรธ, ความรังเกียจ, ความกลัว, ความสุข, ความเศร้า, ความประหลาดใจและความเป็นกลาง โดยภาพที่ใช้ในการเทรน CNN มาจากสองแหล่งคือจาก Kaggle dataset ที่ใช้ใน Facial Expression Recognition Challenge และ Karolinska Directed Emotional Faces (KDEF) ซึ่งทั้งสองแหล่งมีภาพรวมกันทั้งหมด 40,787 ภาพ โดยนายแบบและนางแบบ มาจากหลากหลายเชื้อชาติ เผ่าพันธุ์ เพศ และ อายุ และภาพเหล่านี้ถูกถ่ายด้วยมุมมองต่างๆกัน และใช้โปรแกรม Matlab สำหรับการ convert Kaggle dataset และ Karolinska dataset ให้เป็น image files เพื่อทำการ process ในขั้นต่อไป โดยลักษณะการแสดงออกทางอารมณ์ของอวัยวะแต่ละส่วนที่นำมาใช้ในการรู้จำ คือ ตา ปาก และใบหน้า

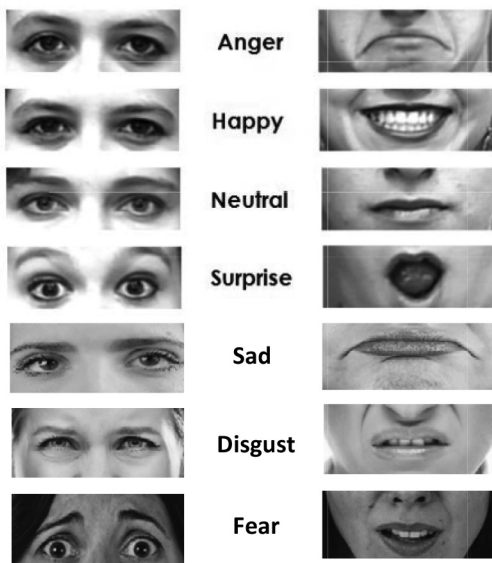


Figure 9 The appearance of the eyes and mouth in an emotional image

2. Pretrained CNN

การ Pretrained CNN สำหรับการจำแนกอารมณ์จากการแสดงออกทางสีหน้าโดยใช้วิธีการ transfer learning ในโปรแกรม matlab จาก pretrained CNN แบบ GoogLeNet, ResNet50 และVGG-19 ดัง Figure 10

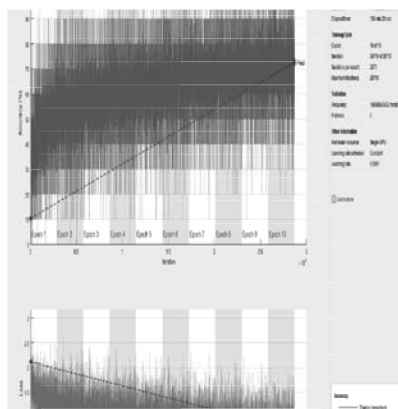


Figure 10 Training progress

3. ผลการทดลอง

ประชากรตัวอย่างจำนวน 30 คน ได้ทำการทดลองใช้โปรแกรมที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้น กล้อง webcam หนึ่งตัวได้ถูกตั้งไว้หน้าคอมพิวเตอร์ ได้ผลลัพธ์ดัง Figure 11 โดยแสดงหน้าผู้วิจัยและอารมณ์ที่จับได้ด้วย AI algorithm ที่เสนอด้วยอารมณ์ประหลาดใจ ในรูปพบว่ามีค่าน่าจะเป็น (probability) ของอารมณ์ประหลาดใจ (surprise) สูงถึง 0.96

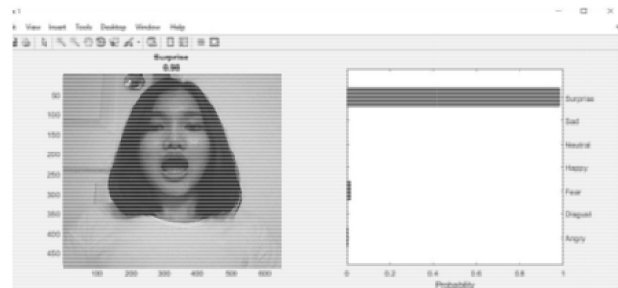


Figure 11 Show the researcher's face and surprise emotion captured by AI algorithm.

ผลการแยกแยะอารมณ์แปลกใจ (surprise) โดยผู้ร่วมทำการทดลองทั้ง 30 คน โดยให้แต่ละคนทำหน้าที่ประหลาดใจหน้ากล้องคนละ 10 ครั้ง และทำหน้าที่ในอารมณ์อื่น 10 ครั้ง เป็นดัง Table 2

Table 2 The results of the surprise experiment

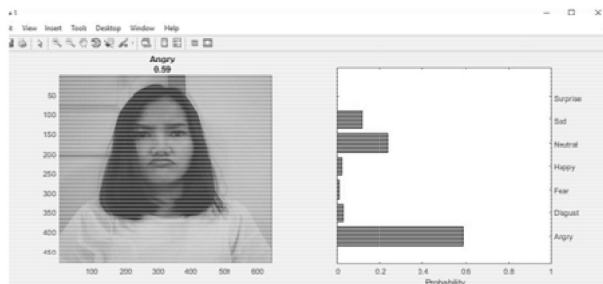
Type of network	Positive accuracy	Probability	Negative accuracy
VGG-19	65%	0.73	75%
ResNet50	80%	0.85	85%
GoogLeNet	91%	0.90	97%

Positive accuracy คือความถูกต้องของ AI algorithm ที่ให้ผลเป็นอารมณ์แปลกใจสูงที่สุด เมื่อผู้ทำการทดลองทำหน้าที่ประหลาดใจ

Probability แสดงความน่าจะเป็นเฉลี่ยของอารมณ์ประหลาดใจ เมื่อผู้ทำการทดลองทำหน้าที่ประหลาดใจ

Negative accuracy คือความถูกต้องของ AI algorithm ที่ให้ผลเป็นอารมณ์อื่นๆสูงที่สุดเมื่อผู้ทำการทดลองทำหน้าที่อารมณ์อื่นๆ

โดยในส่วนของอารมณ์อื่นๆที่ได้ทำการทดสอบพบว่าค่าที่ใกล้เคียงกันไม่ห่างกันมาก แต่ในส่วนของความน่าจะเป็นอารมณ์โกรธซึ่งพิจารณาจะเห็นว่า ลักษณะของปากและตา จะคล้ายคลึงกันมากกับอารมณ์ ปกติ จึงทำให้เกิดความสับสนแต่ค่าที่ความน่าจะเป็นที่แสดงออกมีค่าถึง 0.59 ซึ่งถือมีความน่าจะเป็นว่าเกิน 50%



**Figure 12** Showing the researcher's face and anger captured by AI algorithm

## สรุป

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบตรวจจับอารมณ์ที่แสดงออกทางใบหน้าของมนุษย์ด้วยภาพโดยใช้เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อระบุอารมณ์ความรู้สึกที่สำคัญของมนุษย์ทั้งเจ็ดอารมณ์ ได้แก่ ความโกรธ ความรังเกียจ ความกลัว ความสุข ความเศร้า ความประหลาดใจและความเป็นกลาง ซึ่งได้ผลการทดลองดัง Table 2 จึงสรุปว่าเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ที่เสนอโดยผู้วิจัยสามารถจำแนกอารมณ์ประหลาดใจของคนได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านรองศาสตราจารย์ ดร. วิทิต จัทรรัตน์กุลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่อการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

1. Savoiu, A. and J. Wong, Recognizing Facial Expressions Using Deep Learning 2017.
2. Ko, B.C., A Brief Review of Facial Emotion Recognition Based on Visual Information. Sensors (Basel), 2018. 18(2).
3. Tarnowski, P., et al., Emotion recognition using facial expressions 2017.
4. Yanga, D., et al., An Emotion Recognition Model Based on Facial Recognition in Virtual Learning Environment 2017.
5. Fan, Y., et al., Video-based emotion recognition using CNN-RNN and C3D hybrid networks, in Proceedings of the 18th ACM International Conference on Multimodal Interaction - ICMI 2016. 2016. p. 445-450

## คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม กำหนดพิมพ์ปีละ 6 ฉบับ ฉบับที่ 1 (มกราคม-กุมภาพันธ์) ฉบับที่ 2 (มีนาคม-เมษายน) ฉบับที่ 3 (พฤษภาคม-มิถุนายน) ฉบับที่ 4 (กรกฎาคม-สิงหาคม) ฉบับที่ 5 (กันยายน-ตุลาคม) ฉบับที่ 6 (พฤศจิกายน-ธันวาคม) ผู้พิมพ์ทุกท่านสามารถส่งเรื่องมาพิมพ์ได้โดยไม่ต้องเป็นสมาชิก และไม่จำเป็นต้องสังกัดมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผลงานที่ได้รับการพิจารณาในวารสารจะต้องมีสาระที่น่าสนใจ เป็นงานที่ทบทวนความรู้เดิมหรือองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย รวมทั้งข้อคิดเห็นทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และจะต้องเป็นงานที่ไม่เคยถูกนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นมาก่อนและไม่อยู่ในระหว่างพิจารณาลงพิมพ์ในวารสารใด บทความอาจถูกดัดแปลง แก้ไขเนื้อหา รูปแบบ และสำนวน ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร ทั้งนี้เพื่อให้วารสารมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากลและนำไปอ้างอิงได้

### การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่ละเรื่องจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์การเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถานให้หลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษปนภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีทางแปล หรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนเป็นภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษควรได้รับความตรวจสอบที่ถูกต้องด้านการใช้ภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาอังกฤษก่อน
2. ขนาดของต้นฉบับ ใช้กระดาษขนาด A4 (8.5x11 นิ้ว) และพิมพ์โดยเว้นระยะห่างจากขอบกระดาษด้านละ 1 นิ้ว จัดเป็น 2 คอลัมน์
3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร Browallia New ชื่อเรื่องให้ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา ชื่อผู้พิมพ์ใช้ตัวอักษรขนาด 16 pt. ตัวปกติ หัวข้อหลักใช้ตัวอักษรขนาด 16 pt. ตัวหนา หัวข้อรองใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา บทคัดย่อและเนื้อเรื่องใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา เชิงอรรถหน้าแรกที่เป็นชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้พิมพ์ ใช้ตัวอักษรขนาด 12 pt. ตัวหนา
4. การพิมพ์ต้นฉบับ ผู้ส่งงานจะต้องพิมพ์ส่งต้นฉบับในรูปแบบของแฟ้มข้อมูลต่อไปนี้ อย่างใดอย่างหนึ่ง ได้แก่ ".doc" (MS Word) หรือ ".rtf" (Rich Text)
5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 15 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง
6. จำนวนเอกสารอ้างอิงไม่เกิน 2 หน้า
7. รูปแบบการเขียนต้นฉบับ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทบทความรายงานผลวิจัยหรือบทความวิจัย (research article) และบทความจากการทบทวนเอกสารวิจัยที่ผู้อื่นทำเอาไว้ หรือบทความทางวิชาการ หรือบทความทั่วไป หรือบทความปริทัศน์ (review article)
8. การส่งบทความ ส่ง online ระบบ Thai Jo สามารถเข้าไปดูรายละเอียดที่ [www.journal.msu.ac.th](http://www.journal.msu.ac.th)
9. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะไม่พิจารณาผลงาน

### บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

**ชื่อเรื่อง (Title)** ควรสั้น กระชับ และสื่อเป้าหมายหลังของงานวิจัย ไม่ใช้คำย่อ ความยาวไม่เกิน 100 ตัวอักษร ชื่อเรื่องให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

**ชื่อผู้พิมพ์ [Author(s)]** และที่อยู่ ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และระบุตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงาน หรือสถาบันที่สังกัด และ E-mail address ของผู้พิมพ์ไว้เป็นเชิงอรรถของหน้าแรก เพื่อกองบรรณาธิการสามารถติดต่อได้

**บทคัดย่อ (Abstract)** เป็นการย่อเนื้อความงานวิจัยทั้งเรื่องให้สั้น และมีเนื้อหาครบถ้วนตามเรื่องเดิม ความยาวไม่เกิน 250 คำ หรือไม่เกิน 10 บรรทัด และไม่ควรรู้คำย่อ

**คำสำคัญ (Keyword)** ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษาประมาณ 4-5 คำสั้น ๆ

**บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารประกอบ

**วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา (Materials and Methods)** ให้ระบุรายละเอียด วัน เดือน ปีที่ทำทดลอง วัสดุ อุปกรณ์ สิ่งที่น่าสนใจ จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา อธิบายวิธีการศึกษา แผนการทดลองทางสถิติ วิธีการเก็บข้อมูลการวิเคราะห์และการแปลผล

**ผลการศึกษา (Results)** รายงานผลที่ค้นพบ ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย อย่างชัดเจนได้ใจความ ถ้าผลไม่ซับซ้อนและมีตัวเลขไม่มากควรใช้คำบรรยาย แต่ถ้ามีตัวเลข หรือ ตัวแปลมาก ควรใช้ตารางหรือแผนภูมิแทน

**วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion)** แสดงให้เห็นว่าผลการศึกษาตรงกับวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ หรือแตกต่างไปจากผลงานที่มีผู้รายงานไว้ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และมีพื้นฐานอ้างอิงที่เชื่อถือได้ และให้จบด้วยข้อเสนอแนะที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวการสำหรับการวิจัยต่อไป

**ตาราง รูป ภาพ แผนภูมิ (Table, Figures, and Diagrams)** ควรคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็นแทรกไว้ในเนื้อเรื่องโดยเรียงลำดับให้สอดคล้องกับคำอธิบายในเนื้อเรื่อง และมีคำอธิบายสั้น ๆ เป็นภาษาอังกฤษ ที่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วน กรณีที่เป็นตาราง คำอธิบายอยู่ด้านบน ถ้าเป็นรูป ภาพ แผนภูมิ คำอธิบายอยู่ด้านล่าง

**กิตติกรรมประกาศ (Adcknowledgements)** ระบุสั้น ๆ ว่างานวิจัยได้รับงานสนับสนุน และความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

**เอกสารอ้างอิง (References)** ระบุรายการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วนไว้ท้ายเรื่อง โดยใช้ Vancouver Style ดังตัวอย่างข้างล่าง และสามารถดูรายละเอียดและตัวอย่างเพิ่มเติมได้ที่ [www.journal.msu.ac.th](http://www.journal.msu.ac.th)

### 1. การอ้างอิงหนังสือ

**รูปแบบ:** ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. พิมพ์ครั้งที่. สถานที่เมืองพิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์. p 22-5. (ชื่อชุด; vol 288).

**ตัวอย่าง:** Getqen,TE. Health economics: Fundamentals of funds. New York: John Wiley & Son; 1997. P. 12-5 (Annals of New York academy of science; voll 288).

ชมพูนุช อ่องจิต. คลื่นไฟฟ้าหัวใจทางคลินิก. พิมพ์ครั้งที่ 5 กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2539

### 2. การอ้างอิงจากวารสาร

**รูปแบบ:** ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่องหรือชื่อบทความ. ชื่อวารสาร. ปีที่พิมพ์ เดือนย่อ 3 ตัวอักษร วันที่/ปีที่ (ฉบับที่): เลขหน้า.

**ตัวอย่าง:**

ก. วารสารไม่เรียงหน้าต่อเนื่องกันตลอดปี

Russell FK, Coppell AL, Davenport AP. Ln vitro enzymatic processing of radiolabelled big ET-1 in human Kidney as a food ingredient, Biochem Pharmacol 1998 Mar 1;55(5):697-701

พิจารณ์ เจริญศรี. การปรับความพร้อมเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารก่อนร่นเข้าสู่โลกกาวิวัฒน์ครั้งใหม่. นกบริหาร 2547;24(2): 31-6

ข. วารสารเรียงหน้าต่อเนื่องกันตลอดปี

Russell FD, Coppell AL Davenport AP. Ln vitro enzymatic processing of radiolabelled big ET-1 in human Kidney as a food ingredient, Biochem Pharmacol 1998;55:697-701

พิจารณ์ เจริญศรี. การปรับความพร้อมเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารก่อนร่นเข้าสู่โลกกาวิวัฒน์ครั้งใหม่. นกบริหาร 2547;24(2): 31-6

### 3. รายงานจากการประชุมวิชาการ

**รูปแบบ :** ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ใน: ชื่อคณะบรรณาธิการ, editors. ชื่อเอกสารรายงานการสัมมนา เดือน (ย่อ 3 ตัว) วันที่; เมืองที่สัมมนา, ประเทศ. เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์. P.1561-5

ตัวอย่าง: Bengtsson S, solheim BG. Enforcement of data protection, privacy and security and security in medical informatics. Ln: Lun KC, Degoulet P, Piemme TE, Reinhoff O, editors. MEDINFO 92. Proceedings of the 7<sup>th</sup> World Congress on Medical Informatics; 1992 Sep 6-10; Geneva, Switzerland, Amsterdam: North Holland; 1992. P.1561-5. พัททชัย พุทธรชัย, กิตติ บุญเลิศนิรันดร์ ทะนงศักดิ์ มณีวรรณ, พงาม เดชคำรณ, นภา ชันสุภา. การใช้เอทีฟอนกระตุ้น การสุกของพริก. ใน: เอกสารการประชุมสัมมนาทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 15. สถาบันวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. กรุงเทพฯ; 2541. หน้า 142-9

#### 4. การอ้างอิงจากพจนานุกรม

รูปแบบ: ชื่อพจนานุกรม. พิมพ์ครั้งที่. เมืองหรือสถานที่พิมพ์; ปีที่พิมพ์. หน้า.

ตัวอย่าง: Stedmin's medical dictionary. 26<sup>th</sup> ed. Baltimore: Williams & Wilkins; 1995. Apraxia; p. 119-20.

พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542. กรุงเทพฯ: นานมีบุ๊คพับลิเคชันส์; 2546. หน้า 1488

#### 5. การอ้างอิงจากหนังสือพิมพ์

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ชื่อหนังสือพิมพ์ ปี เดือน วัน; Sect.: sohk 15.

ตัวอย่าง: Lee G. Hospitalizations tied to ozone pollution: study estimates 50,000 admissions annually. The Washington Post 1996 Jun 21; Sect. A: 3(col.5).

พรรณี รุ่งรัตน์ สทศ ดั่งที่มพัฒนาข้อสอบระดับชาติมันใจคุณภาพ. เดลินิวส์ 12 พฤษภาคม 2548.

#### 6. อ้างอิงจากหนังสืออิเล็กทรอนิกส์

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ชื่อวารสารอิเล็กทรอนิกส์ [หรือ serial online] ปีที่พิมพ์เอกสาร ถ้าจำเป็นระบุเดือนด้วย; Vol no (ฉบับที่): [จำนวนหน้าจากการสืบค้น]. ได้จาก: URL: <http://www.edc.gov/neidoc/EID/eid.htm> วันที่ เดือน ปีที่ทำการสืบค้น (เขียนเต็ม)

ตัวอย่าง: More SS. Factors in the emergence of infectious disease, Emerh Infect Dis [serial online] 1995 Jan-Mar; (1): [24 screene]. Available from: RL: <http://www.edc.gov/neidoc/EID/eid.htm> Accessed 25, 1999.

ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ. นาโนเทคโนโลยีความเป็นไปได้และทิศทางในอนาคต. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ ตุลาคม-ธันวาคม (17): 2542 ได้จาก: <http://www.nanotech.sc.mahidol.ac.th/index.html> May 13 2005.

## Instruction for Authors

Research manuscripts relevant to subject matters outlined in the objectives are accepted from all institutions and private parties provided they have not been preprinted elsewhere. The context of the papers may be revised as appropriate to the standard. Vol.1 (January-February) Vol.2 (March-April) Vol.3 (May-June) Vol.4 (July-August) Vol.5 (September-October) Vol.6 (November-December)

### Preparation of manuscripts:

1. Manuscripts can be written in either Thai or English with the abstract in both Thai and English. Papers should be specific, clear, concise, accurate, and consistent. English language manuscripts should be checked by an English language editor prior to submission.

2. Manuscripts should be typed in MS word ".doc" or ".rtf" (Rich Text) on standard size paper, A4 or 8.5x11 inches, and arranged in two columns: single space for English, double space for Thai language.

3. Browallia font type is required with font size as follows:

Title the article: 18 pt. Bold

Name(s) of the authors: 16 pt.

Main Heading: 16 pt. Bold

Sub-heading: 14 pt. Bold

Body of the text: 14 pt

Footnotes for authors and their affiliations: 12pt.

4. The number of pages to 15, including references, tables, graphs, or pictures.

5. Types of manuscripts accepted: research articles and review articles.

6. Organization of research articles.

**Title:** denoted in both Thai and English, must be concise and specific to the point, normally less than 100 characters.

**Name(s):** of the author(s) and their affiliation must be given in both Thai and English.

**Abstract:** This section of the paper should follow an informative style, concisely covering all the important findings in the text. Authors should attempt to restrict the abstract to no more than 250 words.

**Keywords:** Give at least 4-5 concise words.

The body of the text comprises the following headings:

**Introduction:** A summary of who is doing what, why where, and when?

**Materials and Methods:** A discussion of the materials used, and a description clearly detailing how the experiment was undertaken, e.g., experimental design, data collection and analysis, and interpretation.

**Results:** Present the output. List the information in complicated, add tables, graphs, diagrams etc., as necessary.

**Discussion and Conclusion:** Discuss how the results are relevant to the objectives or former findings, why? Finally state what recommendations could be drawn.

**Tables, figures, diagrams, pictures:** should be screened for those important to support the findings, and separated from the text. Captions should be placed above the tables but under the figures.

**Acknowledgement:** the name of the persons, organization, or funding agencies who helped support the research are acknowledged in this section.

**References:** listed and referred to in vancouver style.  
(<http://www.library.uq.edu.au/training/citation/vancouv.html>)

7. Authors of review articles should follow the typical format style. This includes an introduction, the body of content, conclusion, and references.

### **Submission of manuscripts**

1. Manuscripts should be submitted through the Thai Jo Manuscripts submission system at [www.journal.msu.ac.th](http://www.journal.msu.ac.th).
2. The uncorrected manuscripts will be rejected by the editorial board.

### **Review of manuscripts:**

1. The editorial board will review all manuscripts for format compliance. Manuscripts formatted incorrectly will be returned to the author for correction.
2. Following submission of the corrected manuscript, the Peer Review Committee will review and offer comments
3. Manuscripts receiving the approval of the Peer Review Committee may be returned to the author for revision as advised by the Committee. Manuscripts failing to adopt the Committee's suggestions will not be published.





# ใบสมัครเป็นสมาชิกรวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ชื่อ-นามสกุล .....

ที่อยู่ บ้านเลขที่..... หมู่ที่..... ถนน..... แขวง/ตำบล.....

อำเภอ..... จังหวัด..... รหัสไปรษณีย์.....

โทรศัพท์..... โทรสาร..... E-mail.....

หน่วยงาน.....

ถนน..... แขวง/ตำบล..... อำเภอ.....

จังหวัด..... รหัสไปรษณีย์..... โทรศัพท์.....

ออกใบเสร็จในนาม.....

- สมัครเป็นสมาชิกหนึ่งปี      ค่าสมัคร 400 บาท
- สมัครเป็นสมาชิกสองปีติดต่อกัน      ค่าสมัคร 800 บาท

ส่งจ่ายผ่านเลขที่บัญชี 983-9-26661-6 ธนาคารกรุงไทย ชื่อบัญชี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (เงินรายได้)

สาขาท่าขอนยางมหาสารคาม

ทั้งนี้ขอให้ส่งหลักฐานการสมัคร (ใบสมัครนี้) และสำเนาการชำระเงินได้ที่ [science.msu@hotmail.com](mailto:science.msu@hotmail.com) หรือ ส่งเป็นเอกสารทางไปรษณีย์มาที่ งานวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150