

การตรวจสอบการกระจายลมร้อนในเตาอบด้วยการทดลองและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Investigation of Hot Air Distribution in an Oven Using Experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD)

ชัยวัฒน์ อุทัยแสน¹, ยศกร ประทุมวัลย์² และ ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี^{1*}
Chaiwat Uthaisan¹, Yotsakorn Pratumwal² and Songwut Mongkonlerdmanee^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) 111 ถนนพหลโยธิน คลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

¹ Department of Mechanical, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra- Nakhon 1381 Pracharat Road 1, Wong Sawang Subdistrict, Bang Sue District, Bangkok 10800

² National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA) 111 Phahonyothin Road, Khlong Nueng, Khlong Luang District, Pathum Thani 12120

*Corresponding Author: E-mail: songwut.m@rmutp.ac.th

Received: 28-02-2025 Revised: 01-12-2025 Accepted: 01-12-2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายลมร้อนในตู้อบโดยใช้การทดลองและการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยจำลองพฤติกรรมของการกระจายลมร้อนภายในตู้อบที่มีฮีตเตอร์จำนวน 3 แท่ง และพัดลมเป่าลมร้อนให้การกระจายความร้อนภายในตู้อบขนาด 0.100x0.885x0.200 m ที่อุณหภูมิ 80°C ซึ่งการทดสอบและจำลองนี้ไม่มีผลิตภัณฑ์สำหรับการอบจึงไม่พิจารณาความชื้น การทดลองใช้ระบบบันทึกอุณหภูมิ GTF2-IM28 Temp Controller และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ PT100 จำนวน 12 ช่องสัญญาณ โดยเชื่อมต่อกับเครื่องควบคุมและอ่านค่าผ่าน Modbus-RTU ลมร้อนคืออากาศที่ไหลในตู้อบมีปริมาตรเท่ากับ 1.52 m³ ของไหลเกิดการถ่ายเทและพาความร้อนภายใต้ความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) เลือกใช้รูปแบบการไหลทั้งแบบราบเรียบและปั่นป่วน สภาพผิวของผนังเป็นผิวราบเรียบกำหนดเป็น Adiabatic wall และกำหนดความดันอากาศที่ 101,325 Pa พร้อมทั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศและตู้อบที่ 28°C ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ด้วย CFD และการทดลองสอดคล้องกันมีความแตกต่างอยู่ในช่วงร้อยละ 6-10 จึงสรุปได้ว่าแบบจำลอง CFD สามารถจำลองการกระจายลมร้อนได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง จากนั้นทำการวิเคราะห์การกระจายลมร้อนในตู้อบทั้งแบบที่มีภาคเต็มตู้และแบบไม่มีภาค พบว่า มีการกระจายของลมร้อนเป็นแบบปั่นป่วน ลมร้อนในแต่ละตำแหน่งแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการอบ การศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงการออกแบบตู้อบให้มีการกระจายความร้อนที่สมดุลและมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการทำงาน โดยต้องพิจารณาตัวแปรสำคัญประกอบด้วย ทิศทางและตำแหน่งการเข้าของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน อัตราการไหลของลมร้อน กำลังของฮีตเตอร์ การควบคุมการสูญเสียของลมร้อนด้วยการติดตั้งฉนวนกันความร้อน และการสร้างช่องทางเข้าของลมร้อนหลายตำแหน่ง

คำสำคัญ : การกระจายลมร้อน, ตู้อบลมร้อน, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the hot-air distribution in a drying oven by using experimental testing and Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. The study simulates the behavior of hot-air distribution inside an oven equipped with three heater rods and a hot-air circulation fan, in order to distribute heat within an oven of dimensions 0.100 × 0.885 × 0.200 meters at a temperature of 80°C. In this testing and simulation, no product is placed in the oven; therefore, moisture is not considered. The experiment uses a GTF2-IM28 Temp Controller data-logging system and twelve PT100 temperature-measurement sensors, which are connected to the controller and read through Modbus-RTU. The hot air refers to the air flowing inside the oven with a volume of 1.52 m³. The fluid undergoes heat conduction and convection under the gravitational acceleration. Both laminar and turbulent flow models are applied. The wall surfaces are defined as smooth surfaces with an adiabatic-wall boundary condition, and

the air pressure is set at 101,325 Pa, with the initial temperature of both the air and the oven at 28°C. The results indicate that the CFD analysis and the experimental results are in agreement, showing a deviation in the range of 6–10%. Therefore, it can be concluded that the CFD model can simulate the hot-air distribution with high similarity to the actual experimental results. Subsequently, the hot-air distribution in the oven is analyzed under two conditions: with full trays and without trays. The findings show that the hot-air distribution exhibits turbulent behavior, and the airflow varies at different positions, which affects drying performance. This study can be used to improve oven design to achieve balanced and efficient heat distribution by considering key variables, including the direction and position of hot-air inlets, hot-air velocity, hot-air flow rate, heater power, control of heat loss through the installation of thermal insulation, and the creation of multiple hot-air inlet paths.

Keyword: Hot Air Distribution, Hot Air Oven, Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. บทนำ

การพัฒนาประเทศให้ก้าวหน้าด้วยนโยบายของทางภาครัฐสู่ไทยแลนด์ 4.0 นั้นเป็นการเปลี่ยนการขับเคลื่อนประเทศด้วยภาคอุตสาหกรรมไปเป็นการขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยี นวัตกรรม และความคิดสร้างสรรค์ ซึ่งต้องมีการปฏิรูปการพัฒนาประเทศในทุกภาคส่วนงาน เพื่อให้ประเทศมีความเจริญสามารถรับมือการเปลี่ยนแปลงจากภัยคุกคามแบบใหม่และโอกาสต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นให้พร้อมที่จะก้าวสู่การตลาดโลกอย่างมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน อาทิ เช่น ในส่วนงานทางด้านการเกษตรนั้นจะเปลี่ยนจากการเกษตรแบบดั้งเดิมเป็นการบริหารจัดการการเกษตรด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรม (Smart Farm) เป็นต้น ดังนั้นในส่วนสินค้า OTOP ควรต้องมีการพัฒนาเปลี่ยนการบริหารจัดการแบบดั้งเดิมด้วยแรงงานคนหรือเครื่องจักรดั้งเดิมเป็นการดำเนินการผลิตด้วยเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่มีนวัตกรรมเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์นั้นๆ จากการสำรวจสภาพการทำงานของกระบวนการผลิตขนมหวานพื้นเมืองของร้านขนมไทยต่างๆ ในจังหวัดเพชรบุรี และโรงงานอบขนมหลายแห่ง พบว่า มีเครื่องมือหรือเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตจำนวนมาก และการผลิตขนมหวานพื้นเมืองเพชรบุรีนั้น มีเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับการอบขนมด้วยความร้อน เช่น อ้าว วั่นกรอบ หม้อแกง ขนมโสมนัส และอื่นๆ และจะพบปัญหาในการอบ คือ การกระจายของความร้อนไม่ทั่วถึง ในบางตำแหน่งหรือบางพื้นที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากการอบนั้นมีคุณภาพไม่เท่ากัน โดยเฉพาะในบางพื้นที่ที่ใกล้กับช่องทางลมร้อนที่เข้ามาในตู้อบจะมีอุณหภูมิสูง และพื้นที่ไกลออกไปจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า

P.S. Mirade et. al. [1] ศึกษาลักษณะเฉพาะและการสร้างแบบจำลอง CFD ของโปรไฟล์อุณหภูมิอากาศและความเร็วในเตาอบอุโมงค์อบขนมบิสกิตอุตสาหกรรม และกล่าวถึงการประยุกต์ใช้แนวทางของ CFD เพื่อทำนายโปรไฟล์อุณหภูมิของอากาศและความเร็วลมภายในห้องอบของเตาอบอุโมงค์เผาด้วยก๊าซอุตสาหกรรมที่ใช้อบขนมบิสกิต เลือกใช้แบบจำลอง CFD สามมิติ การเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขกับการวัดในเชิงทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันค่อนข้างใกล้เคียงกันในการคาดการณ์เชิงคุณภาพ เช่นเดียวกับ Nantawan Therdthai et. al. [2] ที่ศึกษาการสร้างแบบจำลอง CFD และการจำลองเตาอบ

ขนมปังต่อเนื่องในอุตสาหกรรมโดยใช้แบบจำลองสองมิติ พารามิเตอร์สำคัญของเตาอบ คือปริมาณความร้อนและปริมาณพัดลม ทำให้สามารถจำลองแนวโน้มการกระจายความร้อนในเตาอบได้อย่างน่าพอใจ Andrew Lee [3] ศึกษาวิจัยเรื่อง การตรวจสอบเชิงตัวเลขของการกระจายอุณหภูมิในเตาอบอุตสาหกรรม การตรวจสอบเชิงตัวเลขดำเนินการกับเตาอบอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พิสูจน์ได้ว่าเตาอบมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอเป็นส่วนใหญ่ในช่วงระหว่าง 314 ถึง 348°C การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบนั้นสัมพันธ์กับความเร็ว การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเป็นไปตามเส้นโค้งของความเร็ว จากผลที่ได้ พบว่าบริเวณที่มีปัญหภายในเตาอบอุตสาหกรรมนั้นสามารถระบุได้ เช่น การไหลของอากาศผ่านรูพรุน และโซนพื้นที่การหมุนเวียนที่ไม่ดี

Pragati Kaushal and Sharma HK [4] ได้ศึกษาและใช้ CFD และการประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหารระเหยวิธี CFD สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบอุปกรณ์แปรรูปอาหารได้ การประยุกต์ใช้รวมถึงกระบวนการต่างๆ เช่น การทำความสะอาดถังเก็บ การตกผลึก ไซโคลนแบบธรรมดา การอบแห้ง การฆ่าเชื้อ การตกผลึก การผสม และการแช่เย็น การหมัก การอบ ฯลฯ

Zinedine Khatiret et al. [5] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) และการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบเตาอบในอุตสาหกรรมการอบขนมปังโดยเลือกรูปแบบการไหลที่เหมาะสมจะช่วยให้ใช้ทรัพยากรการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ Verboven et al. [6] นำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้าแบบพาความร้อนบังคับ บทความนี้กล่าวถึงแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน M. Rokni and B. Sunden [7] อภิปรายเกี่ยวกับการไหลปั่นป่วนที่พัฒนาเต็มที่ในท่อในช่วงของเรย์โนลด์ที่กว้าง กระบวนการนี้ผสมผสานแบบจำลองความหนืดเพื่อให้ได้แบบจำลองฟลักซ์เชิงพีชคณิตที่มีค่าการแพร่ที่แปรผัน A. Jones and D. Ingham [8] นำเสนอหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการไหลของการพาความร้อนในผนังขนานแนวตั้ง คำตอบเชิงตัวเลขสำหรับสถานการณ์ดังกล่าว และให้ผลลัพธ์สำหรับโปรไฟล์ความเร็วภายในผนัง อุณหภูมิเฉลี่ย ปัจจัยแรงเสียดทาน และพื้นที่

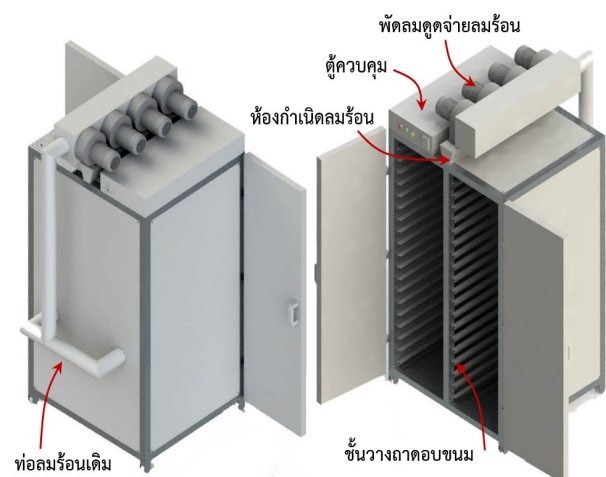
การไหลเวียนที่เกิดขึ้น E. Sparrow and M. Ortiz [9] เสนอการตรวจสอบเชิงทดลองเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อยู่เหนือแผ่นที่มีรูพรุน เอกสารนี้สามารถแสดงการไหลของของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิวของแผ่นได้

แนวทางแบบจำลอง Reynolds Averaged Navier-Stokes: RANS ถือเป็นเทคนิคการจัดการความปั่นป่วนที่ใช้งานได้จริงที่สุดสำหรับปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณทางอุตสาหกรรม ด้วยทรัพยากรการคำนวณที่มีอยู่ในปัจจุบันแบบจำลองความปั่นป่วนของความหนืดของกระแสของไหลวนสองสมการได้ทำหน้าที่เป็นรากฐานสำหรับการวิจัยความปั่นป่วนมาหลายปี แบบจำลองเหล่านี้ช่วยให้เกิดความแม่นยำ [10]-[12] แม้จะมีตัวเลือกการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วนมากมาย แต่แบบจำลอง $k-\epsilon$ ก็เป็นแบบจำลองสองสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการตรวจสอบแล้วสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงปั่นป่วนจนถึงปัจจุบัน สำหรับการไหลของอุตสาหกรรม เช่น การไหลในเตาอบ การกระจายของ k และ ϵ มักไม่ค่อยเป็นที่รู้จักล่วงหน้า และมักประมาณจากสูตรที่เชื่อมโยงความเร็วของทางเข้าและมาตราส่วนความยาวกับการเกิดความปั่นป่วน การใช้แบบจำลอง $k-\epsilon$ อย่างแพร่หลายได้นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถและข้อบกพร่องของแบบจำลอง [13]-[15] แม้จะได้รับความนิยม แต่ข้อจำกัดที่ทราบบางประการของแบบจำลอง $k-\epsilon$ เช่น พลังงานจลน์ของการปั่นป่วนถูกคาดการณ์ไว้เกินจริงในบริเวณที่การไหลกระทบและต่อกลับ ส่งผลให้คาดการณ์การพัฒนาของการไหลรอบขอบนำและวัตถุที่มีลักษณะเป็นหน้าผาลาดชันได้ไม่ดี การแยกตัวของการไหลจากพื้นผิวภายใต้การกระทำของการไล่ระดับความดันที่ไม่พึงประสงค์นั้นคาดการณ์ได้ไม่ดี อัตราการแพร่กระจายของกระแสผ่านและเจ็ตตรงกลมนั้นคาดการณ์ได้ไม่ดี ถูกต้อง ไม่สามารถสร้างแบบจำลองการไหลแบบลามินาร์และแบบเปลี่ยนผ่านด้วยแบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตราฐานได้ จึงเป็นพื้นที่การวิจัยที่ดำเนินการอย่างต่อเนื่องในการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน [11], [16]

นอกเหนือจากการใช้หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการวิเคราะห์แล้วยังมีการศึกษาการอบแห้งด้วยเครื่องอบที่น่าสนใจ เครื่องอบแห้งด้วยหลักการฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Principle) เป็นอีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการนิยมนิยม เช่น การศึกษาการอบแห้งขุยมะพร้าวโดยใช้ลมร้อนจากฮีตเตอร์ทำความร้อนขนาด 6,000 Watt ทำการทดลองกับขุยมะพร้าวน้ำหนัก 2, 4 และ 6 kg ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 40 และ 50°C ผลจากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ทำให้ขุยมะพร้าวมีการคายความชื้นที่ดีจึงใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นและสามารถลดความชื้นมาตรฐานแห้ง [17] การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยวิธีการฟลูอิดไคซ์เบด สามารถดำเนินการได้ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมควบคู่กับการตรวจสอบความชื้น และการใช้กำลังของฮีตเตอร์ที่สูงเกินไปหรือใช้ระยะเวลาสั้นในการอบแห้งนั้นอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ออกมา การกำหนดอัตราการไหลที่สูงหรือต่ำเกินไปส่งผลต่อคุณภาพในการอบ

เช่นกัน การให้อัตราการไหลสูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหายทางกายภาพ และสูญเสียค่าใช้จ่ายเกินความจำเป็น ดังนั้นการรอบด้วยหลักการนี้จึงต้องพิจารณาตัวแปรในการอบที่เหมาะสมของแต่ละผลิตภัณฑ์ [18]-[21]

จากการทบทวนวรรณกรรมจึงพิจารณาลักษณะของตู้อบขนมลมร้อนของงานวิจัยนี้ที่มีการพาความร้อนจากแท่งฮีตเตอร์ไหลไปสู่ห้องอบด้านในแสดงดังภาพที่ 1 ด้านบนตรงกลางของตู้อบจะเป็นห้องสร้างลมร้อนด้วยแท่งฮีตเตอร์ และมีพัดลมทำหน้าที่ดูดจ่ายลมร้อนไปยังท่อทางที่อยู่ด้านหลังของตู้อบ ลมร้อนไหลตามท่อและแยกออกเป็นสองทาง คือ ทางด้านขวาและทางด้านซ้าย และทั้งสองทางต่อเข้าไปยังห้องอบด้านใน ที่ด้านในตัวเครื่องอบจะมีช่องทางลมร้อนเข้ามาสองท่อ ซึ่งเมื่อนำอากาศอบขนมมาใส่แล้วจะทำให้อากาศไหลเวียนได้ไม่ดี โดยเฉพาะอากาศขนมที่อยู่ใกล้ท่อลมร้อนจะได้รับความร้อนมากกว่าแล้วเกิดการเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบได้ ดังนั้นบทความนี้จึงวิเคราะห์การกระจายของลมร้อน ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรหลัก คือ ตำแหน่งการติดตั้งท่อส่งลมร้อนภายใต้กำลังของแท่งฮีตเตอร์และอุณหภูมิการอบคงที่



ภาพที่ 1 เครื่องอบลมร้อนแบบอากาศหมุนเวียน 3 มิติ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สมการควบคุม (Governing Equations)

สมการอนุพันธ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัมใน 3 มิติ

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (4)$$

$$\frac{\rho c}{k} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

สมการเรโนลด์นัมเบอร์

$$Re = \frac{\rho V D_n}{\mu} \quad (6)$$

เมื่อ

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศร้อน

V คือ ความเร็วของอากาศในท่อ

D_n คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่อากาศไหลผ่าน

μ คือ ค่าความหนืดของอากาศร้อน

สมการนัสเซลนัมเบอร์สำหรับการพาความร้อนแบบบังคับที่มีการไหลแบบภายในและมีความปั่นป่วนบนวัสดุแผ่นเรียบ

$$Nu = \frac{0.0296 Re^{0.8} Pr}{1 + B Re^{-0.1} (Pr - 1)} \quad (7)$$

เมื่อ Pr คือ Prandtl number และ B เป็นฟังก์ชันของ Pr โดยถ้า $0.5 < Pr < 5$ ค่า B จะเท่ากับ $1.58 Pr^{-1/53}$

สมการนัสเซลนัมเบอร์สำหรับการพาความร้อนแบบบังคับที่มีการไหลแบบภายในท่อทรงกระบอกและมีความปั่นป่วน โดยไม่พิจารณาความหนืดของอากาศ

$$Nu = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^{1/3} \quad (8)$$

เมื่อ $10^4 < Re_d < 1.2 \times 10^5$ และ $0.7 < Pr < 120$

ตัวแปรต้นที่กำหนดให้เปลี่ยนแปลง คือ ตำแหน่งการติดตั้งท่อส่งลมร้อนซึ่งส่งผลต่อความเร็วของลมร้อนในช่องทางขาเข้า ต่อบังคับซ้ายและฝั่งขวา และตัวแปรตามคือผลการกระจายของอุณหภูมิในตู้อบ

2.2 วัสดุเครื่องมือและอุปกรณ์

- ตู้อบความร้อนขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ $1.00 \times 0.88 \times 2.00$ m ที่มีกำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้า 3 แท่งเท่ากับ 4,500 Watt มีพัดลมพาความร้อนจำนวน 4 ตัว หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ 2,700 rpm ภายในสามารถบรรจุถาดอบที่มีขนาดกว้าง x ยาวเท่ากับ 0.40×0.80 m ได้สองด้านคือด้านซ้ายและด้านขวา และแต่ละด้านจะมีฐานรองยื่นออกมาไว้สำหรับวางถาดฝั่งละ 19 ฐานรอง รวมเป็น 38 ฐานรอง รองรับถาดจำนวน 38 ถาด ดังภาพที่ 1

- เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ PT100 ที่มีความต้านทาน 100Ω ที่ 0°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความต้านทานของเซนเซอร์จะเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเป็นเส้นตรงซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ

- เครื่องมือวัดความเร็วลม (Lutron AM 4201 Digital Anemometer) อ่านค่าที่ความเร็วต่ำสุด 0.1 เมตรต่อวินาที และความแม่นยำ $\pm 2\% + 1$ d ตามมาตรฐาน ISO-9001, CE, IEC1010

- เครื่องควบคุมและอ่านค่าอุณหภูมิ เลือกใช้ GTF2-IM28 Temp Controller แสดงผลการวัด ควบคุมสัญญาณขาออก สัญญาณเตือน ออกแบบระบบอะนาล็อกด้วยการสื่อสารผ่านสัญญาณ RS485



a) ติดตั้ง PT100 ด้านขวา

ห้องสร้างลมร้อน (ฮีตเตอร์)



b) ติดตั้ง PT100 ด้านซ้าย

ภาพที่ 2 ตู้อบความร้อนและตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ PT100

- เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ เลือกใช้ EMKO Proop.black-7L เชื่อมต่อ Ethernet, Ethernet + Wi-Fi, Wi-Fi และเชื่อมต่อกับเครื่องควบคุมและอ่านค่าอุณหภูมิผ่าน Modbus-RTU

- โปรแกรม SolidWorks Flow Simulation

- ชุด Timer ควบคุมอุณหภูมิการทำงานตู้อบ

2.3 การเตรียมการทดลองและการดำเนินงาน

2.3.1 ติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ผนังของตู้อบลมร้อน ด้านซ้าย ด้านขวา และด้านหลัง เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

2.3.2 ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ PT100 จำนวน 12 จุด ไว้ที่ด้านข้างของตู้อบ ให้หัววัดอุณหภูมิยื่นเข้าไปในตู้อบ ดังภาพที่ 2

2.3.3 ประกอบตู้บันทึกผลและอุปกรณ์ต่างๆ ไว้บนตู้อบและทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ดังภาพที่ 3

2.3.4 ติดตั้งตู้บันทึกผลไว้ด้านบนของตู้อบลมร้อน ไม่ให้ได้รับความร้อนจากตู้อบ ดังภาพที่ 4

2.3.5 ติดตั้งสายอินเทอร์เน็ตเพื่อเก็บข้อมูลการบันทึกลงระบบ Cloud แบบเรียลไทม์ ดังภาพที่ 3

2.3.6 ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ ประกอบด้วย การทำงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ตั้งอุณหภูมิสำหรับการอบที่ 80°C) การทำงานของ Datalogger การทำงานของพัดลมและฮีตเตอร์ และการทำงานของอุปกรณ์ในตู้ควบคุมการทำงาน

2.3.7 ทดลองและเก็บข้อมูลอุณหภูมิโดยแยกเป็นรายกรณีศึกษาต่างๆ ดังนี้

- กรณีที่ 1 ไม่มีฉนวนในตู้อบ เพื่อตรวจสอบการกระจายความร้อนเบื้องต้น โดยใช้กำลังฮีตเตอร์สูงสุด ที่ความเร็วลมขาออกจากห้องพัดลมทั้ง 4 ตัว เท่ากับ 10 m/s

- กรณีที่ 2 ใส่ฉนวนในตู้อบจำนวน 38 ชาติ เพื่อตรวจสอบการกระจายความร้อน โดยใช้กำลังฮีตเตอร์สูงสุด และความเร็วลมสูงสุดที่พัดลมทั้ง 4 ตัว ทำงานร่วมกันทำให้ได้ความเร็วของกระแสลมร้อน 10 m/s

ทั้งนี้ช่องทางเติมอากาศจะอยู่ด้านบนตู้ ในส่วนด้านหน้าพัดลมเพื่อให้พัดลมช่วยในการเติมอากาศใหม่เข้ามา และช่องทางระบายอากาศออก ในกรณีมีผลิตภัณฑ์จะเป็นช่องทางปล่อยความชื้นออกไปจากตู้



ภาพที่ 3 ตู้บันทึกผลและอุปกรณ์



a) GTF2-IM28 Temp Controller



b) EMKO Proop.black-7L Datalogger

ภาพที่ 4 อุปกรณ์ประกอบเครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิ

ในการทำงานของตู้อบลมร้อนนี้จะดำเนินการภายใต้การพิจารณาการกระจายของลมร้อน โดยไม่มีการใส่ผลิตภัณฑ์สำหรับการอบใดๆ จึงไม่ต้องคำนึงถึงการควบคุมความชื้น อุณหภูมิสำหรับการทดสอบและจำลองอยู่ที่ 80°C แบ่งฮีตเตอร์แต่ละแห่งมีกำลัง 1,500 Watt จำนวน 3 แห่ง พัดลมดูดจ่ายลมร้อนจำนวน 4 ตัว ละ 250 Watt หมุนด้วยความเร็ว 2,700 rpm สามารถให้อัตราการไหลรวมได้เท่ากับ 0.046 m³/s และจ่ายออกไปยังทางออกเข้าตู้อบจำนวน 2 ช่องทางด้วยท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน คือ 100 mm โดยจ่ายไปทางด้านขวาและด้านซ้ายด้วยอัตราการไหล 0.026 และ 0.021 m³/s ตามลำดับ มีช่องปล่อยลมร้อนออกจำนวน 4 รูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm แต่ละรูมีอัตราการปล่อยความร้อนออกที่ 0.001 m³/s รวมทั้ง 4 รูเท่ากับ 0.004 m³/s มีช่องเติมอากาศใหม่เข้าไปที่ช่องทางดูดของพัดลมด้วยอัตราการไหลเข้า 0.004 m³/s การทดลองจะดำเนินการจนกระทั่งถึงสภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งตั้งอุณหภูมิห้องอบไว้ที่ 80°C

2.4 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

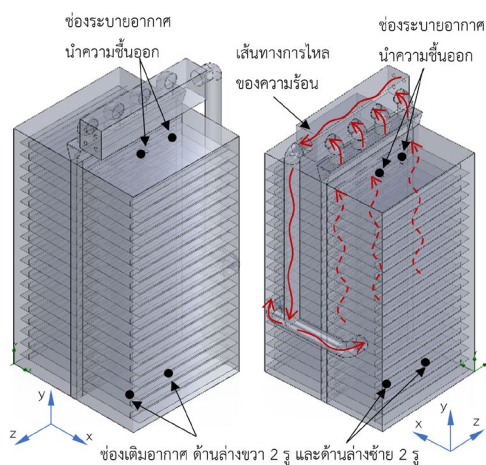
การวิจัยนี้วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) สมการควบคุม (Governing equation) ที่เลือกใช้เป็นโมเดลการไหลแบบปั่นป่วน ตามแบบจำลอง $k-\epsilon$ เปรียบเทียบผลของค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจริง โดยกำหนดเงื่อนไข พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าฮีตเตอร์ต้องรักษาอุณหภูมิของระบบให้อยู่ที่ 80°C ความเร็วลม 10, 15 และ 20 m/s เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายผลของอุณหภูมิจากโปรแกรม CFD และการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

จากภาพที่ 5 เป็นแบบจำลอง 3D ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWorks ซึ่งภาพที่ 5a และ 5b เป็นแบบจำลอง

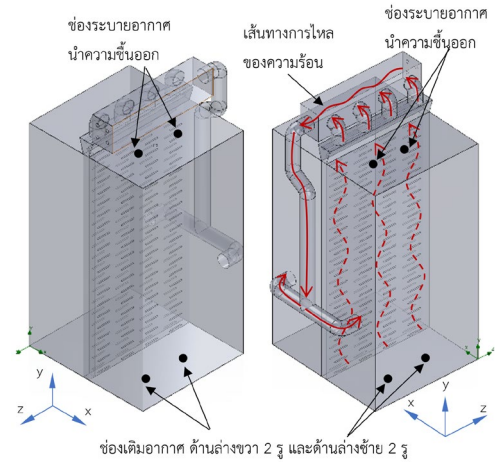
ของตู้แบบเดิมก่อนการปรับปรุง มีท่อทางลมร้อนหลักที่เชื่อมต่อระหว่างห้องพัดลมและห้องอบขนม การวางท่อทางนี้จะไม่สมมาตร ส่งผลให้ลมร้อนที่ออกจากห้องพัดลมทั้ง 4 ตัว เข้าไปยังห้องอบขนมฝั่งซ้ายและฝั่งขวาไม่เท่ากัน สำหรับภาพที่ 5c และ 5d เป็นแบบจำลองที่ปรับปรุงใหม่ให้เกิดความสมมาตรในการวางท่อทางลมหลัก ส่งผลให้ลมร้อนเข้าไปยังห้องอบขนมฝั่งซ้ายและฝั่งขวาเท่ากัน

แบบจำลองในภาพที่ 5a-5d ให้กำหนดการไหลเป็นแบบไหลภายใน (Internal Flow) มีปริมาตรของของไหลที่วิเคราะห์ (Fluid volume) เท่ากับ 1.52 m^3 ของไหลเกิดการถ่ายเทความร้อนและพาความร้อน กำหนดค่า Gravity ในทิศทางแกน -y เท่ากับ 9.81 m/s^2 กำหนดของไหลเป็นอากาศ (Air) มีความหนาแน่นอากาศ 1.168 kg/m^3 (ที่อุณหภูมิประมาณ 20°C และที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน) ค่าความหนืดจลน์เท่ากับ $0.00001855 \text{ kg/m s}$ สำหรับสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างตู้เป็น Stainless Steel 321 มีความหนาแน่น $8,100 \text{ kg/m}^3$ ผลิตจากวัสดุ Aluminum 6061 มีค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะเป็นไปตามภาพที่ 6 และ 7 ซึ่งมีแกนตั้งเป็นค่าการนำความร้อนในหน่วย W/m K และแกนนอนเป็นค่าอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K) ทำการเลือกรูปแบบการไหลเป็นราบเรียบและแบบปั่นป่วน กำหนดสภาวะทางความร้อนของผนัง (Wall thermal condition) เป็น Adiabatic wall และผิวเป็นแบบราบเรียบ กำหนดความดันอากาศเป็น $101,325 \text{ Pa}$ อุณหภูมิของอากาศเริ่มต้น 28°C และอุณหภูมิของวัสดุตัวตู้เริ่มต้นเป็น 28°C เช่นกัน การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) ดังต่อไปนี้

1. ที่ช่องทางอากาศภายนอกเข้ามาเติม (Inlet) ด้วยอัตราการไหลเข้าของอากาศ (Q_{in}) เท่ากับ $0.000393 \text{ m}^3/\text{s}$ (เป็นค่าความเร็วลมที่วัดได้จากการทดลอง)
2. ช่องทางอากาศออกสู่ภายนอกกำหนดเป็นความดันบรรยากาศเท่ากับ $101,325 \text{ Pa}$

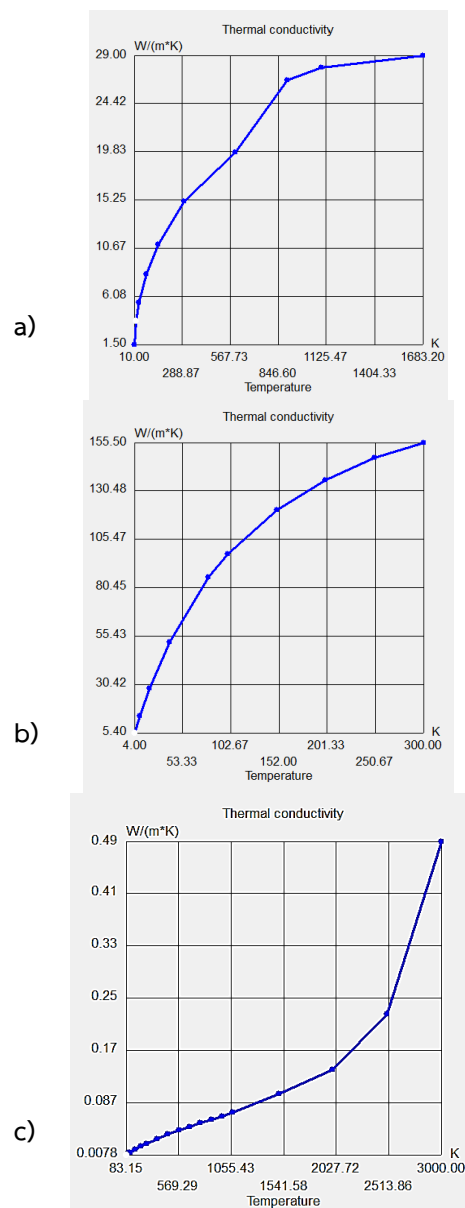


a) มุมมองด้านหน้าใส่ถาด b) มุมมองด้านหลังใส่ถาด

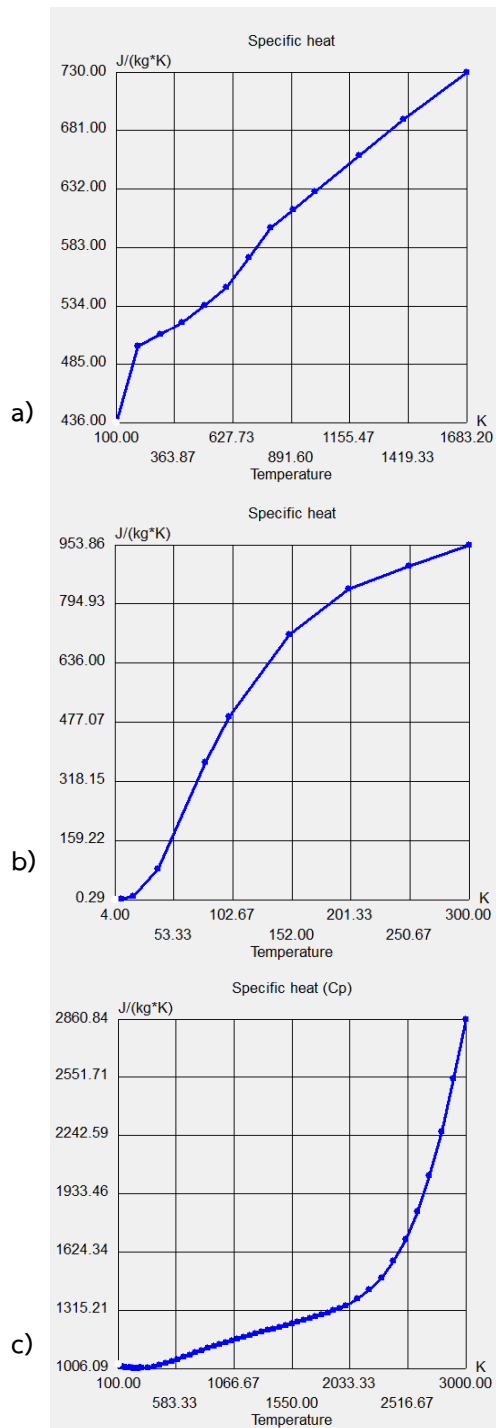


c) มุมมองด้านหน้า d) ใส่ท่อลมร้อนด้านหลังให้สมมาตร

ภาพที่ 5 แบบจำลองตู้สำหรับการวิเคราะห์ CFD



ภาพที่ 6 ค่าการนำความร้อน a) Stainless Steel 321 b) Aluminum 6061 และ c) อากาศ



ภาพที่ 7 ค่าความร้อนจำเพาะ a) Stainless Steel 321 b) Aluminum 6061 และ c) อากาศ

3. กำหนดความเร็วของพัดลมเป็นแบบภายใน (Internal fan) ด้วยความเร็วเชิงมุม 282 rad/s โดยพัดลมทั้ง 4 ตัวสามารถส่งผ่านลมร้อนออกไปยังช่องทางขาออกของห้องพัดลม ความเร็วลมที่ช่องทางขาออกนี้เท่ากับ 10 m/s (วัดได้จากการทดลอง) เงื่อนไขขอบเป็นทางเข้าที่มีอัตราการไหลจ่ายไปยังตู้อบเท่ากับผนังท่อเป็นแบบ No Slip Wall และ Adiabatic จากการติดตั้งฉนวน

4. แท่งฮีตเตอร์จำนวน 3 แท่ง ที่สามารถจ่ายความร้อนได้สูงสุดถึง 4,500 Watt และสามารถปรับลดกำลังไฟลงได้ตามกรณีศึกษานั้นๆ

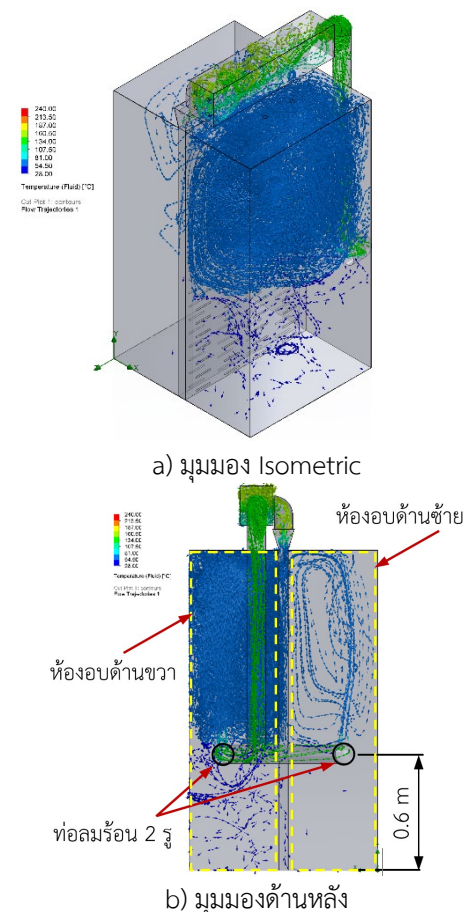
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย CFD

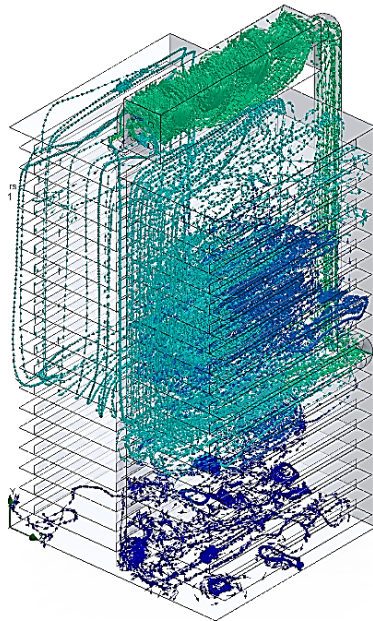
การวิเคราะห์ผลในช่วงสภาวะไม่คงตัว (Transient State) ถูกนำมาใช้พิจารณาการกระจายลมร้อนในตู้อบขนมดังภาพที่ 8 ซึ่งจะไม่มีการบรรจุกา

เป็นการศึกษาการกระจายของลมร้อนในสภาวะไร้ภาด เนื่องด้วยท่อนำส่งลมร้อนซึ่งอยู่ด้านหลังตู้อบมีการจัดวางตำแหน่งไม่อยู่ตรงกลาง (ไม่สมมาตร) ส่งผลให้ท่อทางขวาของตู้มีระยะทางที่สั้นกว่าลมร้อนจึงไหลไปตามท่อที่สะดวกกว่า ส่งผลให้ลมร้อนกระจายไม่ทั่วกันทั้งตู้อบ ตำแหน่งรูท่อ 2 รูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ที่ถูกเจาะเข้าไปยังตู้อบนั้นอยู่สูงจากพื้นเป็นระยะทาง 0.6 m จึงทำให้พื้นที่ด้านล่างนั้นมีการกระจายของลมร้อนที่ต่ำกว่าด้านบนและด้วยเหตุที่ลมร้อนจะลอยตัวขึ้นจึงส่งผลให้ความร้อนในด้านบนจะสูงกว่าด้านล่าง

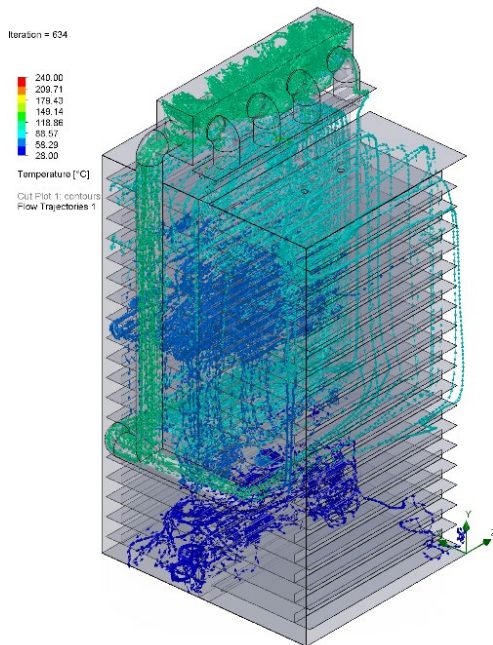
จากภาพที่ 8 จะมีโซนห้องอบด้านขวาและโซนห้องอบด้านซ้ายซึ่งมีความชัดเจนว่าการกระจายของลมร้อนนั้นไม่ดีสำหรับลักษณะของตู้อบแบบเดิมที่มีปัญหาอยู่ โดยเฉพาะพื้นที่ด้านล่างทางซ้ายและขวาซึ่งอยู่สูงจากพื้น 0.6 m จะมีการกระจายลมร้อนที่ต่ำมาก ทั้งหมดนี้เป็นการอธิบายในช่วงของสภาวะไม่คงตัว แต่หากปล่อยเวลาให้นานขึ้นมากกว่า 2 ชั่วโมงขึ้นไป พบว่าการกระจายของลมร้อนทั่วทั้งตู้อบนั้นจะเข้าสู่สภาวะคงตัว นั่นคืออุณหภูมิหากตั้งไว้ที่ 80°C ก็จะมีอุณหภูมิทั่วทั้งตู้ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ด้านบนและด้านล่างใกล้เคียงกันอยู่ที่ 80°C



ภาพที่ 8 การกระจายลมร้อนในตู้อบซึ่งไม่บรรจุกา

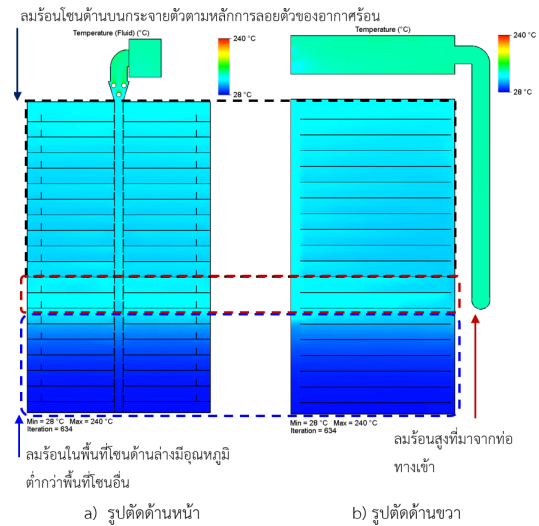


a) มุมมอง Isometric



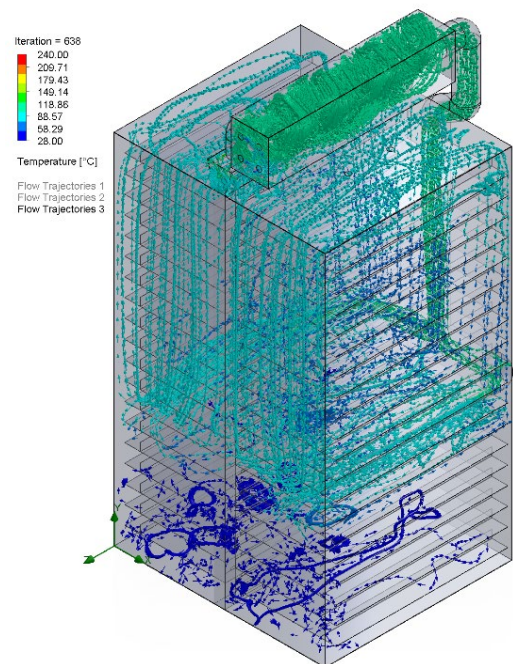
b) มุมมองด้านหลัง

ภาพที่ 9 การกระจายความร้อนในตู้อบซึ่งบรรจุถาด
พื้นที่ด้านล่างของตู้อบก็ยังคงมีการกระจายที่ไม่ดีพอในช่วงสภาวะ
ไม่คงตัว

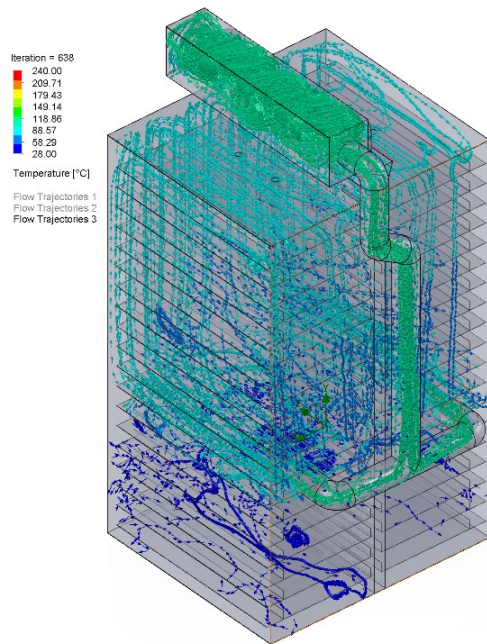


ภาพที่ 10 การกระจายอุณหภูมิของลมร้อนด้วยภาคตัดด้านหน้า
และด้านขวาของตู้อบ

จากภาพที่ 9 เป็นการศึกษาในกรณีที่มีการบรรจุถาดจำนวน 38 ถาด แบ่งเป็นห้องอบด้านขวา 19 ถาด และห้องอบด้านซ้าย 19 ถาด ลมร้อนจะถูกบังคับให้ไหลไปตามช่องทางเช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 8 เพียงแต่มลร้อนที่กระจายเข้าสู่ห้องอบนั้นจะมีถาดเป็นตัวบังคับไม่ให้ลมร้อนกระจายขึ้นสู่ด้านบนได้อย่างรวดเร็ว ความร้อนจะต้องแพร่กระจายไปยังโหนดด้านขวาและโหนดด้านซ้าย สังเกตเห็นได้ว่าการกั้นห้องทั้งสองห้องด้วยถาดนั้นจะส่งผลให้มีการกระจายลมที่ดีขึ้นและอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ภาพที่ 10 คือการกระจายของอุณหภูมิด้วยการใช้ภาคตัดด้านหน้าและด้านขวา ซึ่งทำให้เห็นภาพการกระจายของอุณหภูมิได้ชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่โหนดใต้ช่องทางลมร้อนเข้าสู่ตู้อบที่เวลาการทำงานของตู้อบที่ 20 นาที พบว่าอุณหภูมิมีค่าประมาณ 32-43°C แต่ในพื้นที่ด้านบนเหนือช่องทางลมร้อนเข้าสู่ตู้อบจะมีอุณหภูมิประมาณ 66-72°C

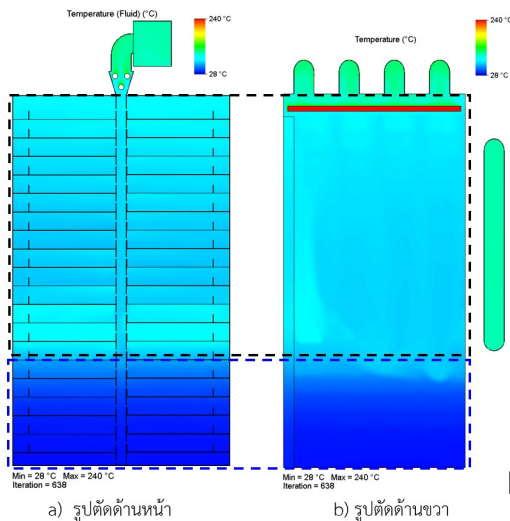


a) มุมมอง Isometric



b) มุมมองด้านหลัง

ภาพที่ 11 การกระจายลมร้อนในตู้อบที่ปรับปรุงท่อลม



a) รูปตัดด้านหน้า

b) รูปตัดด้านขวา

ภาพที่ 12 การกระจายอุณหภูมิของลมร้อนด้วยภาคตัดด้านหน้า
และด้านขวาของตู้อบ

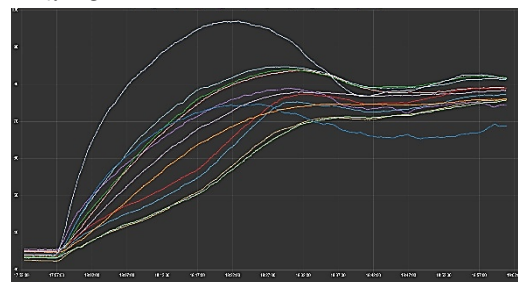
จากผลการกระจายลมร้อนของตู้อบในภาพที่ 8-10 ซึ่งเกิดจากความไม่สมมาตรของท่อลมร้อนได้ถูกปรับปรุงใหม่ให้ท่อลมร้อนมีความสมมาตรวิ่งตรงและแยกออกไปยังห้องอบด้านขวาและห้องอบด้านซ้ายในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งท่อลมร้อน 2 รู มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm จะยังคงอยู่สูงจากฐานของตู้ที่ระยะ 0.6 m ดำเนินการวิเคราะห์ใหม่โดยใช้เงื่อนไขขอบและรูปแบบเดิมได้ผลดังภาพที่ 11-12 พบว่าความร้อนกระจายตัวไปยังห้องอบทางด้านซ้ายและด้านขวาใกล้เคียงกันมีการกระจายของลมร้อนในลักษณะปั่นป่วนทำให้เกิดข้อดีในด้านของการกระจายลมร้อน การใช้ระยะเวลาการกระจายลมร้อนจากสถานะไม่คงตัวสู่เข้า

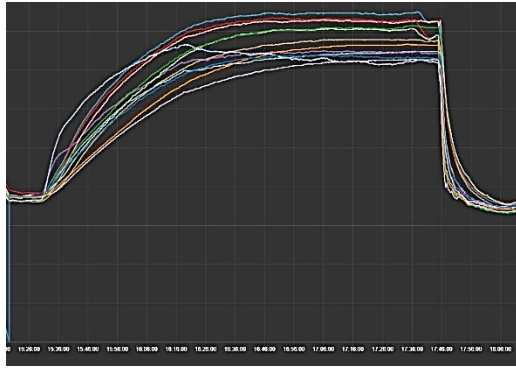
สู่ช่วงสภาวะคงตัวมากถึง 1 ชั่วโมง ซึ่งส่งผลไม่ดีทั้งการสิ้นเปลืองพลังงานและเวลา การออกแบบที่ตู้อบพร้อมโดยมีอุณหภูมิในตู้อบที่เข้าสู่สภาวะคงตัวเป็นสิ่งที่ดีต่อขนม ซึ่งการวิเคราะห์ในช่วงสภาวะไม่คงตัวในภาพที่ 11-12 นี้ถือว่าเป็นแนวโน้มและแนวทางที่น่าพอใจ ทั้งนี้หากสามารถปรับท่อทางเข้าของลมร้อนให้เคลื่อนตัวมาอยู่ที่ด้านล่างของตู้อบจะทำให้การกระจายของลมร้อนนั้นดีมากยิ่งขึ้นและกระจายทั่วทั้งตู้อบ

3.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 13-15 โดยแกนแนวนอนเป็นระยะเวลา (t) ในหน่วยนาที่ และแกนแนวตั้งเป็นอุณหภูมิ (T) ในหน่วยองศาเซลเซียส จากการทดลองให้ความร้อนกับตู้อบที่ใส่ถาดจำนวน 38 ถาด ได้ผลดังภาพที่ 13 แสดงให้เห็นถึงการกระจายลมร้อนซึ่งวัดด้วยเซนเซอร์อุณหภูมิ PT100 จำนวน 12 ช่องสัญญาณ (เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 12 จุดแทนด้วยเส้นกราฟ 12 เส้น) ในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิของตู้อบจะเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 28°C เมื่อทำการป้อนกำลังไฟไปยังฮีตเตอร์ทำให้เกิดการกระจายของลมร้อนโดยใช้พัดลมเป่าอากาศเพื่อนำพาความร้อนกระจายไปยังส่วนต่างๆ ของตู้อบด้วยความเร็วลมที่ 10 m/s จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตู้อบเดิมซึ่งยังไม่มีมีการปรับปรุงนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งแตกต่างกันอย่างมาก (Transient State) พิจารณาได้จากเส้นกราฟเกิดการกระจายตัว แต่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นระยะเวลามากกว่า 2 ชั่วโมง พบว่าแนวโน้มของเส้นกราฟจะใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างกันไม่มากนัก เหตุผลนี้เองจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาอบนั้นอาจเกิดความเสียหายได้ในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของลมร้อนที่ไม่เท่ากันก็คือช่วงสภาวะไม่คงตัว ในการปรับปรุงตู้อบนั้นจะต้องทำให้ช่วงสภาวะไม่คงตัวนี้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งให้ใกล้เคียงกัน

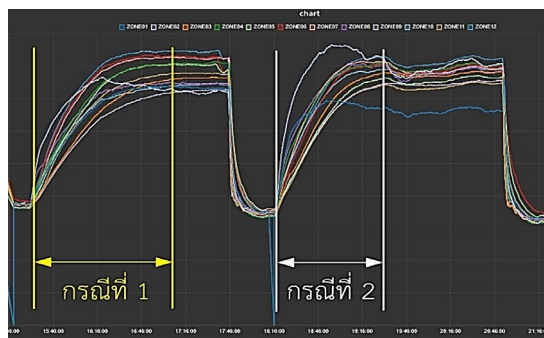
จากการทดลองด้วยการใช้กำลังไฟสูงสุดและรักษาอุณหภูมิห้องอบให้อยู่ที่ 80°C ด้วยความเร็วลม 10 m/s ได้ผลดังภาพที่ 8 นั้น จึงทำการปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟให้ลดลง 34% และลดกำลังของลมเป่าลง 25% จึงได้ผลดังภาพที่ 14 พบว่าการกระจายของลมร้อนในตู้อบของแต่ละตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในช่วงสภาวะไม่คงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน อัตราการกระจายลมร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีสัดส่วนและเข้าสู่ช่วงสภาวะคงตัว แต่จะเห็นได้ว่าทั้งกรณีของผลในภาพที่ 13 และผลในภาพที่ 14 นั้น อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวในแต่ละตำแหน่งของตู้อบก็ยังคงมีความแตกต่างกัน 1-5°C

ภาพที่ 13 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในช่วงสภาวะ
ไม่คงตัว จำนวน 12 จุด



ภาพที่ 14 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมื่อทำการลดกำลังไฟของฮีตเตอร์ 1/3 เท่า

ซึ่งจากภาพที่ 15 คือการเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในช่วงเวลาของสภาวะไม่คงตัว กรณีที่ 1 ในรูปด้านซ้าย เป็นกรณีที่ใช้ค่ากำลังไฟให้ลดลง 33% และใช้กำลังของลมเป่าที่ 66% จะต้องใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 100 นาที แต่สำหรับกรณีที่ 2 รูปด้านขวาคือการทดลองที่ใช้ค่ากำลังไฟให้ลดลง 33% และกำลังของลมเป่า 100% จะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวเพียง 74 นาที



ภาพที่ 15 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

3.3 การวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ

ผลการเปรียบเทียบการจำลองด้วย CFD และการทดลอง ได้ผลในช่วงสภาวะไม่คงตัวดังตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างผลการทดลองและวิเคราะห์ที่เงื่อนไขเดียวกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนกันระหว่าง 6-10% ซึ่งยอมรับได้ในการวิเคราะห์นี้ เป็นที่น่าสังเกตในตำแหน่งการวัดที่ 5, 6, 11 และ 12 ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านล่างของตู้อบมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ อันเนื่องมาจากการส่งจ่ายความร้อนเข้ามายังห้องอบขนมนี้ไม่ได้จ่ายเข้ามายังด้านล่างของตู้อบขนม และความร้อนจะมีพฤติกรรมลอยตัวสูงขึ้นสู่ด้านบน จึงส่งผลให้อุณหภูมิด้านล่างต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นๆ สำหรับความเร็วของกระแสลมร้อนที่เข้ามายังห้องอบขนม หากมีความเร็วลมเข้าห้องอบลดลงจะส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิไม่ทั่วถึงและเกิดเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างมาก

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้วยการทดลองและ CFD

Point	Exp. Results	CFD Results	% Difference
1	68.7	65.2	5.09
2	81.6	79.8	2.20
3	76	72.5	4.60
4	81.8	77.8	4.88
5	75.6	68.8	8.99
6	79	72.6	8.10
7	79	75.4	4.55
8	74.3	71.2	4.17
9	78.3	75.2	3.95
1	81.3	77.8	4.30
11	75.9	68.5	9.74
12	77.3	69.7	9.83

เนื่องด้วยกรณีศึกษาทั้งการทดลองและการจำลองการไหลด้วย CFD นั้นมีผลการทดลองและการวิเคราะห์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นในตารางที่ 1 จึงเป็นการเลือกข้อมูลเพียงบางส่วนเพื่อนำมาใช้ในการพิสูจน์แบบจำลอง ซึ่งในทุกโมเดลของการจำลองนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองก็ให้ผลมีความสอดคล้องกันในทุกกรณีศึกษา ดังนั้นจึงยกผลการเปรียบเทียบมาเพียงเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งเท่านั้น

4. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองและวิเคราะห์ด้วยหลักพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรมพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันซึ่งมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 6-10% ซึ่งเนื่องมาจากเกิดการสูญเสียความร้อนในการทดลองแต่ในกรณีวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไม่มีการสูญเสียความร้อน และพื้นผิวของตู้อบและพื้นที่ภายในไม่ได้ราบเรียบแต่ในโปรแกรมเป็นแบบราบเรียบ ผลการทดลองพบว่าการกระจายของลมร้อนในช่วงของสภาวะไม่คงตัวจะมีความแตกต่างกันไปและแต่ละตำแหน่งจะมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการกระจายลมร้อน เนื่องด้วยอากาศร้อนจะต้องเคลื่อนตัวขึ้นสู่ที่สูง ดังนั้นการจ่ายลมร้อนจากห้องสร้างลมร้อนจะต้องใช้พัดลมอากาศบังคับให้อากาศไหลผ่านลงมายังด้านล่างของตู้และลมร้อนจะกระจายขึ้นไปด้านบนของตู้โดยธรรมชาติ ดังนั้นการออกแบบจะต้องพิจารณาทางเข้าของลมร้อน ตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญคือการทำให้เกิดความสมมาตรของลักษณะทางกายภาพของตู้ การเข้าของลมร้อนไหลไปตามท่อทางเดิมมันไม่สมมาตร แม้ว่าจะปรับให้ท่อทางสมมาตรอาจยังไม่เพียงพอ จำเป็นต้องให้ปลายทางออกทางนั้นนำพาลมร้อนไปสู่ด้านล่างของตู้อบด้วย หรืออีกแนวทางหนึ่งคือการสร้างห้องสะสมความร้อนให้อยู่ด้านหลังตู้อบ และใช้ห้องสะสมลมร้อนนี้ เป็นห้องกระจายลมร้อนเข้าไปยังถาดตามชั้นต่างๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ และโปรแกรมช่วยในการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mirade P. S., Daudin J. D., Ducept F., and Trystram G., Characterization and CFD modeling of air temperature and velocity profiles in an industrial biscuit baking tunnel oven. *J. Clement/ Food Research International*. 2004; 37: 1031–1039.
- [2] Nantawan T., Weibiao Z., and Thomas A., Two-dimensional CFD modeling and simulation of an industrial continuous bread baking oven. *Journal of Food Engineering*. 2003; 60: 211–217.
- [3] Andrew L., Numerical Investigation of the Temperature Distribution in an Industrial Oven. University of Southern Queensland.
- [4] Pragati K. and Sharma H.K., Concept of Computational Fluid Dynamics (CFD) and its Applications in Food Processing Equipment Design. *Journal of Food Process Technology*. 2012; 3(1).
- [5] Khatir Z. et. al., The Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) And Oven Design Optimization in the British Bread-baking Industry. In: *International Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries SINTEF/NTNU, Trondheim Norway*; 2011. P. 21-23.
- [6] Verboven P., et. al., “Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven. *Journal of Food Engineering*. 2000; 43(2): 61-73.
- [7] Rokni M. and Sunden B., Investigation of a Two-Equation Turbulent Heat Transfer Model Applied to Ducts. *Journal of Heat Transfer*. 2003; 125(1): 194-200.
- [8] Jones A. and Ingham D., Combined convection flow in a vertical duct with wall temperatures that vary linearly with depth. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1993; 14(1); 37-47.
- [9] Sparrow E. and Ortiz M., “Heat transfer coefficients for the upstream face of a perforated plate positioned normal to an oncoming flow. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1981; 25(1); 127-135.
- [10] Subrata R., Sagar K. and Heidmann J., Film Cooling Analysis Using DES Turbulence Model. In *ASME TurboExpo*, 2003.
- [11] Mark F. et. al., Use of computational fluid dynamics in domestic oven design. *Int. Jnl. of Multiphysics*. 2008; 2(1).
- [12] ANSYS Inc. CFX-5.7.1 Theory Manual. ANSYS. 2005.
- [13] Wilcox D. C., *Basic Fluid Mechanics*, D C W Industries, La Canada, 1998.
- [14] Menter F. R., Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 1994; 1598–1605.
- [15] Dhinsa K. K., Bailey C. J. and Pericleous K. A., Turbulence Modelling and its Impact on CFD Predictions for Cooling of Electronic Components. In: *Inter Society Conference on Thermal Phenomena*. 2004.
- [16] Atkins W.S., Consultants, Best Practice Guidelines for Marine Applications of Computational Fluid Dynamics. 2002.
- [17] Tinprabath P., et al., A Study of Drying Coconut Coir Dust with a Fluidized Bed Type. In: *PCRUSCI CONFERENCE 2022*, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University, 2022. P. 465-475.
- [18] Tinprabath P., et. al. “The study of kumquats drying using a fluidized bed dryer,” In: *Rajamangala Manufacturing & Management of Technology Conference*; 9th RMTTC, 1–3 May 2024 at The Heritage Chiang Rai Hotel and Convention. Chiang Rai. P. 1325-1330.
- [19] Lertlaokul K., et al., Drying of Andrographis Paniculate with Fluidized Bed. In: *13 th Proceeding of Sustainable Industrial Innovation and Management Conferenc. BITEC Exhibition and Convention Center. Bangkok*. 2024.
- [20] Chindaprasert N. and Tinprabath P., A Study of Drying Behavior of Home Agricultural Products. In: *Proceeding of the 38Th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand: ME-NETT 32*, 3–6 July 2018 Mukdahan Province.
- [21] Chindaprasert N., Boonmee P. and Tinprabath P., A Study of Drying Roses Using Hot Air from Air Conditioner Condenser and Electric Heater Coils. In:

Proceeding of the 38th Conference on Mechanical
Engineering Network of Thailand: ME-NETT 32, 3–6
July 2018. Mukdahan Province