



การพัฒนาตู้อบแห้งชนิดอุโมงค์แบบก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

ด้วยเทคนิคสลับทิศทางการลม

DEVELOPMENT OF GAS-FIRED INFRARED TUNNEL

DRYER WITH AIRFLOW REVERSAL TECHNIQUE

สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ พิสิณี เสือสีบพันธ์ุ* วรลักษณ์ สุริวงค์ สกาวเดือน แก้วดำ และ พิรุฬห์รัชย์ ไทยสมัค

Somkiat Jaturonglumert, Pisinee Suasubphan*, Voraluck Suriwong,

Sakawduan Kaewdam and Phirunrat Thaisamak

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, 50290, Thailand

* E-mail: pisinee.ssb@gmail.com, Tel*: +66 5387 5000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวางแผนการใช้งานและพัฒนาปรับปรุงตู้อบแห้งชนิดอุโมงค์แบบก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน ด้วยเทคนิคสลับทิศทางการลม โดยใช้กรณีศึกษาเป็นผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางที่ 1 เป็นการวางแผนการใช้งาน และหาแนวทางการจัดการเพื่อปรับปรุงกระบวนการอบแห้งมะม่วง ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนแนวทางที่ 2 เป็นการแก้ไขปัญหาการกระจายลมและอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอในตู้อบแห้งเชิงแนวคิด โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ร่วมกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือช่วยในการแก้ไขปัญหา จากผลการศึกษาพบว่าแนวทางการศึกษาที่ 1 การวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาอบผลิตภัณฑ์ร่วมกับการบริหารจัดการด้วยการนำผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่แห้งมาอบวนซ้ำสามารถช่วยให้การอบแห้งผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและประสิทธิภาพดีขึ้น ส่วนแนวทางการศึกษาที่ 2 เมื่อทำการเก็บข้อมูลการกระจายลมและอุณหภูมิของตู้อบแห้งก่อนทำการปรับปรุง ร่วมกับการใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามาช่วยแก้ปัญหาในตู้อบแห้งเชิงแนวคิด พบว่าเทคนิคนี้สามารถช่วยอธิบายการกระจายลมและอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถช่วยแก้ปัญหาแรงงานในขั้นตอนการขนย้ายรถเข็นได้ซึ่งคิดเป็นต้นทุนที่สามารถลดลงได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้สามารถนำไปประกอบการตัดสินใจ การพัฒนาปรับปรุงเครื่องอบแห้งดังกล่าวในอนาคต

คำสำคัญ: ตู้อบแห้งชนิดอุโมงค์แบบก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน; เทคนิคสลับทิศทางการลม; มะม่วง

ABSTRACT

This research study was aimed to study the planning and development of gas-fired infrared tunnel dryer with airflow reversal technique. This work was presented with the dried mango as the product case study. The study was divided into two approaches. First, planning and finding a solution to improve the drying management to achieve the effectiveness of drying mango. Second, finding the conceptual solution to improve the problem of airflow and temperature distribution in the dryer by using the computation fluid dynamic (CFD) program as a tool. The result of the first approach was found that the management of drying duration and looping the moist product to repeat the drying can improve the product quality and increase drying efficiency. For the second approach, the result was found the CFD can use as an effective tool for solving the problem and predicting the irregular airflow and temperature distribution in the dryer. Moreover, this approach could be reduced labor cost for transportation of trucks in drying process around 10 percent which was applied as an option for further improvement.

Keywords: Gas-fired infrared tunnel dryer, Airflow reversal technique, Mango

1. บทนำ

การอบแห้ง (Drying) เป็นวิธีการถนอมอาหาร (Food preservation) ที่นิยมใช้ก่อนอย่างแพร่หลายโดยส่วนใหญ่ วัสดุที่ใช้ออบจะอยู่ในสถานะของแข็งที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ น้ำหรือความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุอาจไม่ต้องระเหยที่จุดเดือด แต่ใช้หลักการการใช้อากาศร้อนไหลผ่านวัสดุ เพื่อพาความชื้นออกไป วัสดุจะแห้งได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุนั้นด้วย นอกจากนี้ การอบแห้งเป็นการลดปริมาณน้ำในอาหาร เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทุกชนิดที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย (Microbial spoilage) ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือชะลอปฏิกิริยาต่าง ๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมี [1-2] โดยวิธีการอบแห้งที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับวัตถุดิบเดิมมากที่สุดคือการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) เนื่องจากการอบแห้งวิธีนี้สามารถรักษาสวนประกอบสำคัญของอาหารที่ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อน เช่น วิตามิน กลิ่น สี รสชาติ รสเปรี้ยวและเนื้อสัมผัสของอาหารให้อยู่ใกล้เคียงกับของเดิม [3] และอีกวิธีคือการอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum dry) เป็นวิธีที่ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์มีจุดเดือดต่ำลง ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกับวัตถุดิบเดิม [4] แต่ข้อเสียทั้งสองวิธีนี้

คือไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและกลาง (SME) เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง และใช้เวลานาน [2]

การอบแห้งชนิดอุโมงค์แบบก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน (Gas-fired infrared tunnel dryer) มีข้อดีคือ เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและกลาง (SME) เช่น กลุ่มวิสาหกิจชุมชน สหกรณ์การเกษตร เป็นต้น เนื่องจากลงทุนต่ำแต่ได้ผลผลิตจำนวนมาก ใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซซึ่งประหยัดกว่าไฟฟ้าโดยไม่มีมลพิษเหมือนเชื้อเพลิงของแข็ง และค่าใช้จ่ายบำรุงซ่อมแซมไม่สูงมาก อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์ ยังพบปัญหาด้านประสิทธิภาพการอบแห้งหากออกแบบให้อุโมงค์อบแห้งยาวมาก ๆ อาจทำให้เกิดปัญหาการกระจายลมและอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอได้ นอกจากนี้ปัญหาเรื่องแรงงานที่ใช้สำหรับการขนย้ายรถเข็นระหว่างกระบวนการอบแห้งเป็นปัญหาและอุปสรรคที่สำคัญของผู้ประกอบการที่ทำให้ไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง [2] สำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่นิยม และมีความต้องการของตลาด เช่น มะม่วง ลำไย แก้วมังกร สับปะรด และกล้วย

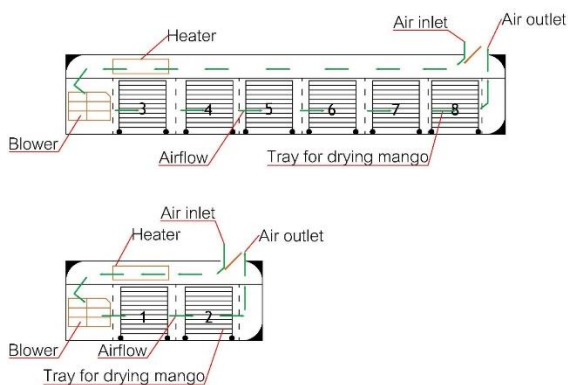
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวางแผนการใช้งานและพัฒนาปรับปรุงตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์แบบก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อนสำหรับ

กลุ่มวิสาหกิจชุมชน โดยใช้ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้ง เป็นกรณีศึกษา เพื่อให้การใช้งานตู้อบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการจัดการผลิตผล คุณภาพและลด ต้นทุนการผลิตด้านแรงงาน

2. อุปกรณ์และการวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์สำหรับดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย ตู้อบแห้งชนิดอุโมงค์แบบก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร บ้านลำปาง จ. ลำพูน ซึ่งมี 2 ส่วนคือ ตู้อบแห้งไล่ความชื้น ในช่วงแรกซึ่งใช้อุณหภูมิสูง ในช่วง 70-80°C (High temperature) ที่มีขนาด 1.2 × 4 × 1.65 เมตร (กxยxส) ความจุ 2 รถเข็น และตู้อบแห้งควบคุมความชื้นช่วงท้าย ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 60-70°C (Low temperature) มีขนาด 1.2 × 10 × 1.65 เมตร (กxยxส) ความจุ 6 รถเข็น ซึ่งมีชุดควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง (Temperature control) จากการปรับหรือเชื้อเพลิงก๊าซ (LPG) เข้า หลอดอินฟราเรด (Gas-fired infrared heater) ชุดพัดลม กระจายอากาศและอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตู้อบแห้งชนิดอุโมงค์แบบก๊าซอินฟราเรด-ลมร้อน

2.2 วิธีการทดลอง

การเตรียมมะม่วงอบแห้ง เริ่มจากคัดมะม่วงสุกพันธุ์ มหาชนก ที่มีขนาด สีเปลือก ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และปริมาณของแข็งที่ละลายได้อยู่ในช่วง 16-17 °Brix [4] ล้างสะอาดและปอกเปลือก หั่นมะม่วงตามแนวยาว โดย

กำหนดให้มีความหนา 1-1.5 เซนติเมตร แช่สารละลายกรด ซิตริก ($C_6H_{10}O_8$) ความเข้มข้น 2% w/w, กรดแอสคอร์บิก ($C_6H_8O_6$) ความเข้มข้น 1% w/w และเกลือแคลเซียม (KCl) ความเข้มข้น 1% w/w เป็นเวลา 5 นาที เพื่อยับยั้งการเกิด สีน้ำตาลในเนื้อมะม่วง [4-5] จากนั้นเรียงชั้นมะม่วงบน ตะแกรงสแตนเลสและจัดวางตะแกรงตามชั้นของรถเข็นเพื่อ เตรียมเข้าสู่ตู้อบแห้ง โดยตะแกรง 1 ชั้น สามารถจัดวางชั้น มะม่วงได้ปริมาณ 5 กิโลกรัม เมื่อจัดวางตะแกรงเต็มชั้น รถเข็น ปริมาณน้ำหนักรวมต่อหนึ่งรถเข็นเท่ากับ 50 กิโลกรัม (รถเข็นบรรจุตะแกรง 10 ชั้น) และเมื่อทำการ อบแห้งเต็มความจุของตู้อบแห้ง จะใช้ปริมาณชั้นมะม่วง ทั้งหมดต่อรอบการอบแห้งเท่ากับ 400 กิโลกรัม (ตู้อบแห้ง 8 ตู้ × ปริมาณน้ำหนักชั้นมะม่วงต่อรถเข็น 50 กิโลกรัม) นำเข้าสู่ตู้อบแห้งตามสภาวะอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดของ กลุ่มวิสาหกิจชุมชน

สำหรับรูปแบบการจัดการอบแห้งแบบเดิมของกลุ่ม วิสาหกิจชุมชนสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองการไหล ของรถเข็นดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากเตรียมวัตถุดิบ นำรถเข็นคันแรกเข้าสู่ตู้อบแห้งที่ 1 ซึ่งเป็นตู้อบแห้ง ไล่ความชื้นในช่วงแรกซึ่งใช้อุณหภูมิสูงที่ 75°C และทำการ อบแห้งในแต่ละตู้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจาก 1 ชั่วโมงผ่านไป นำรถเข็นคันที่ 2 ที่เตรียมวัตถุดิบแล้วเสร็จ เข้าสู่ตู้อบแห้ง แทนที่ โดยรถเข็นคันที่ 1 จะถูกย้ายไปยังตู้อบแห้งห้องที่ 2 และรถเข็นคันที่ 2 จะเข้าสู่ตู้อบแห้งตู้ที่ 1 แทน พร้อมทั้ง เตรียมคันที่ 3 รอเข้าสู่ตู้อบแห้ง จากนั้นอีก 1 ชั่วโมงย้าย รถเข็นคันที่ 1, 2 และ 3 เข้าสู่ตู้อบแห้งตู้ที่ 3, 2 และ 1 ตามลำดับ โดยเตรียมรถเข็นคันที่ 4 ถึง คันที่ 8 เพื่อเข้าสู่ ตู้อบแห้งต่อไป ซึ่งตู้อบแห้งที่ 3-8 จะเป็นตู้อบแห้งช่วงท้าย ซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 60°C สำหรับการตั้งค่าความเร็วลม เข้าของทั้ง 2 ตู้จะใช้ชุดพัดลมกรงกระรอกขนาด 2 แรงม้า ซึ่งจะได้ความเร็วลมประมาณ 3-5 เมตรต่อวินาที ตลอดช่วง ความยาวของตู้อบแห้ง การกำหนดให้รถเข็นแต่ละคันอยู่ใน ตู้อบแห้งแต่ละตู้ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะเรียกว่าเวลาในการ อบแห้งแต่ละตู้ (Holding time) แต่เนื่องจากมีตู้อบแห้ง จำนวน 8 ตู้ เวลาในการอบแห้ง (Drying time) ของรถเข็น แต่ละคันจึงเท่ากับ 8 ชั่วโมง และเมื่อครบกระบวนการ

อบแห้งรถเข็นทั้งหมด เวลาเดินตู้อบแห้ง (Operation time) จึงมีค่าเท่ากับ 15 ชั่วโมง ทั้งนี้ในการเคลื่อนย้ายรถเข็นในระหว่างการอบแห้ง ใช้แรงงานคน (Labor) ในการดำเนินการ [6]

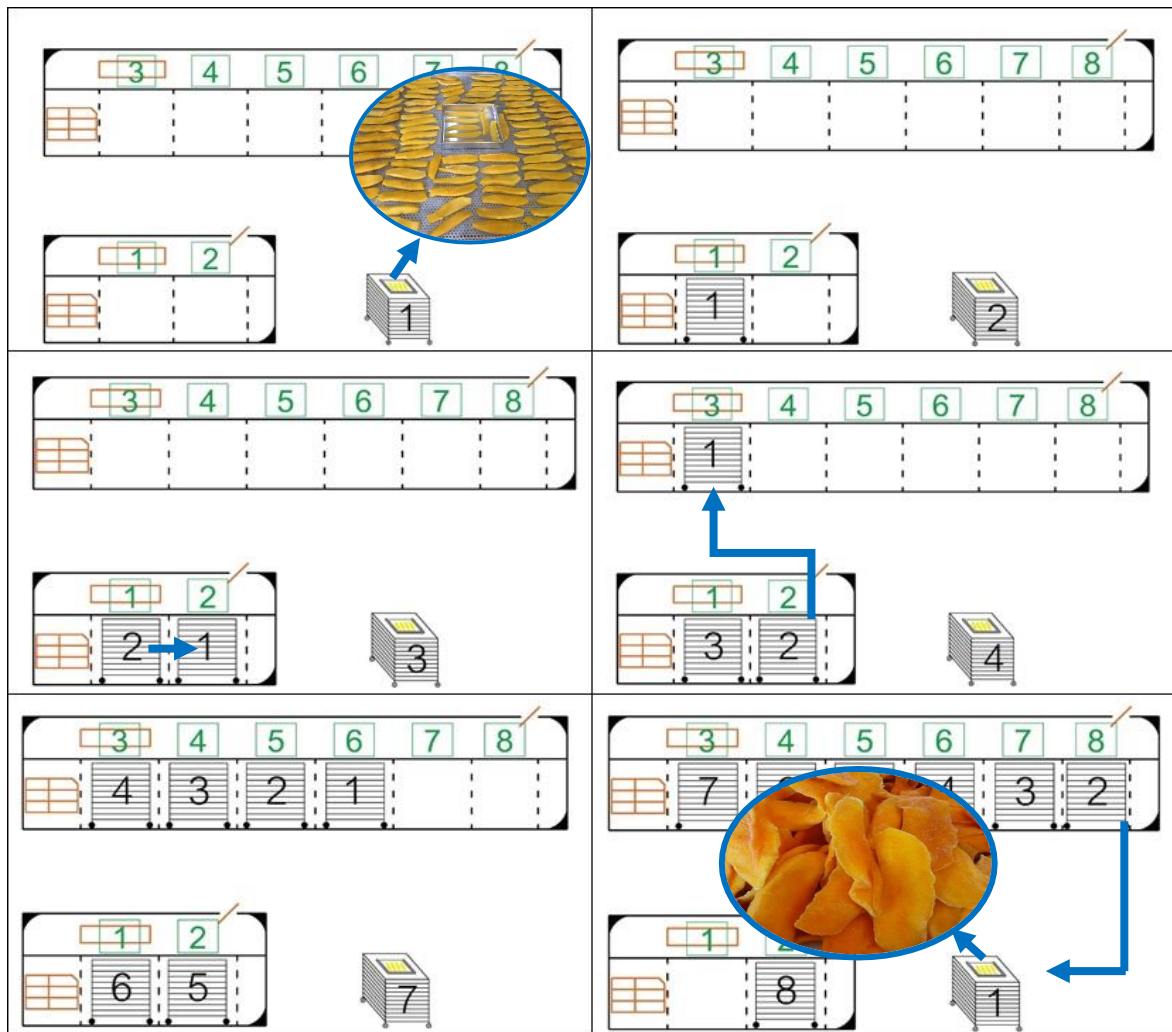
2.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้ง

ในระหว่างการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ทุก ๆ 30 นาที โดยเก็บข้อมูลออกจากตำแหน่งที่ควบคุมตัวอย่างเอาไว้จากรถเข็นคันที่ 1 ที่ตำแหน่งบน กลาง และล่างสุดของรถเข็น ดังแสดงในรูปที่ 2 และทำการวัดความเร็วลมและอุณหภูมิ ภายในตู้อบแห้ง เฉพาะตู้อบแห้งช่วงท้ายเพื่อนำมาใช้สร้างแบบจำลองสำหรับปรับปรุงตู้อบแห้งต่อไป ด้วยเครื่องวัดความเร็วลม

ชนิด Hot wire anemometer ยี่ห้อ Lutron รุ่น AM-4234SD ซึ่งมี Thermometer Type K และ %RH เพื่อเก็บข้อมูลพร้อมกันทุกตำแหน่งที่วัดค่า

2.4 การวางแผนใช้งานและพัฒนาปรับปรุงตู้อบแห้งแบบต่อเนื่องชนิดอุโมงค์แบบก้ำขิ้นพราเรต - ลมร้อน

สำหรับแนวทางที่ 1 เป็นการวางแผนการใช้งาน และหาแนวทางการจัดการเพื่อปรับปรุงกระบวนการอบแห้ง รม่วงให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการหาช่วงเวลาในการอบแห้งแต่ละตู้ (Holding time) และการพัฒนากลยุทธ์สำหรับการอบแห้งแบบวนซ้ำ (Re-drying) ให้กับผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้คุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน มพช. กำหนด [5]

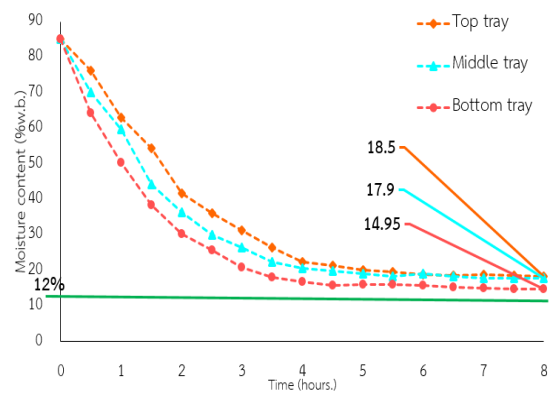


รูปที่ 2 แบบจำลองการไหลของรถเข็นในตู้อบแห้งชนิดอุโมงค์แบบก้ำขิ้นพราเรต-ลมร้อน

สำหรับแนวทางที่ 2 เป็นการแก้ไขปัญหาการกระจายลมและอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอในตู้อบแห้งเชิงแนวคิด โดยการใช้โปรแกรม Autodesk Fusion 360 และ Autodesk CFD 2018

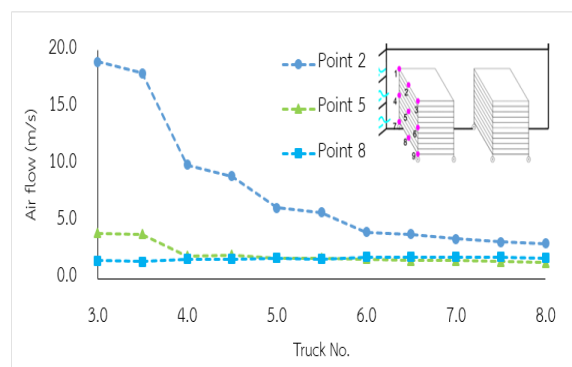
4. ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

จากกรณีศึกษาการอบแห้งมะม่วงของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรบ้านลำม้าง ด้วยตู้อบแห้งชนิดอุโมงค์แบบกึ่งอินฟราเรด-ลมร้อน สำหรับวิธีการจัดการสำหรับการอบแห้งแบบเดิม เป็นวิธีการอบแห้งโดยใช้แรงงานคนนำรถเข็นเข้าตู้อบแห้งทีละคัน และทำการย้ายรถเข็นไปแต่ละตู้จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งแต่ละตู้อบแห้ง ตู้ละ 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการย้ายรถเข็นเข้าตู้อบแห้งตู้ใหม่ และทำการสุ่มวัดคุณภาพของมะม่วงอบแห้งภายในรถเข็นให้ผ่านตามผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2558 การอบแห้งผักและผลไม้ [5] ในการเก็บข้อมูลน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ แล้วทำการคำนวณค่าความชื้น (Moisture content, %w.b.) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นฐานเปียกของมะม่วงพบว่าแนวโน้มการลดลงของความชื้นในตำแหน่งกาดล่างสุดมีการลดลงของความชื้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าความชื้นต่ำเกือบถึงเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด (ต่ำกว่า 12 %w.b.) ในส่วนของกาดกลางและกาดบน พบว่าความชื้นมีแนวโน้มลดลงแต่ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐาน มผช. กำหนด โดยรวม แสดงให้เห็นว่าชั้นวางผลิตภัณฑ์แต่ละระดับมีการระเหยความชื้นไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องมาจากการกระจายลมและอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการอบแห้งที่เกิดกับรูปแบบการกระจายลมและอุณหภูมิในตู้อบแห้งควบคุมความชื้นช่วงท้าย

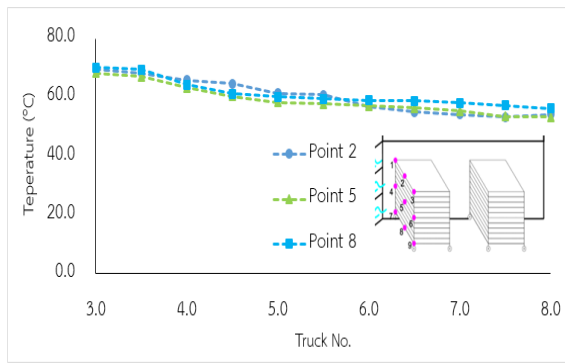


รูปที่ 3 อัตราการอบแห้งในแบบเดิมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

จากตู้อบแห้งที่ 3 ไปยังตู้อบแห้งที่ 8 ดังแสดงในรูปที่ 4 จะมีรูปแบบการกระจายลมในแต่ละชั้นความสูงของกาดที่รถเข็นตำแหน่งบน (Top tray) จุดวัดเฉลี่ย 1-3 ตำแหน่งกลาง (Middle tray) จุดวัดเฉลี่ย 4-6 ตำแหน่งล่าง (Bottom tray) จุดวัดเฉลี่ย 7-9 อยู่ในช่วง 3-5 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะมีค่าสูงมากที่รถเข็นแรก ๆ เนื่องจากเป็นตำแหน่งทางเข้าของลม และมีแนวโน้มลดลงที่ปลายตู้อบแห้ง ส่วนรูปที่ 5 และรูปแบบการกระจายอุณหภูมิผลของการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของรถเข็น (จุดเดียวกับการวัดความเร็ว) อยู่ในช่วง 55-70°C โดยมีแนวโน้มลดลงที่ปลายตู้อบแห้งเช่นกัน ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งช่วงท้ายยังแห้งไม่ถึงเกณฑ์ที่ต้องการ



รูปที่ 4 รูปแบบการกระจายลมในแต่ละชั้นความสูงของกาด



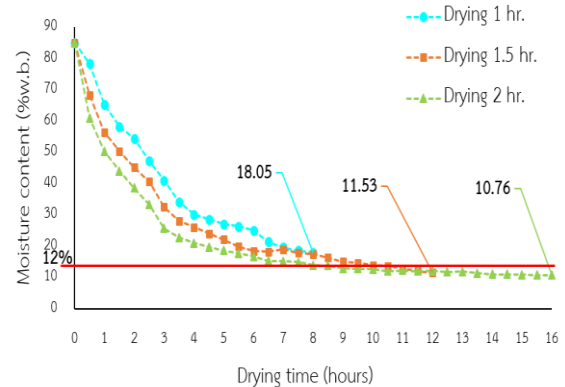
รูปที่ 5 รูปแบบการกระจายอุณหภูมิในแต่ละชั้น
ความสูงของถาด

จากการอบแห้งแบบเดิม พบว่าผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ โดยในหนึ่งรถเข็น มีส่วนที่แห้งอยู่บริเวณด้านล่าง และถาดด้านบนยังคงมีความชื้นอยู่ จึงได้หาแนวทางในการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาอบผลิตภัณฑ์ร่วมกับการบริหารจัดการด้วยการนำผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่แห้งกลับมาอบวนซ้ำต่อไป

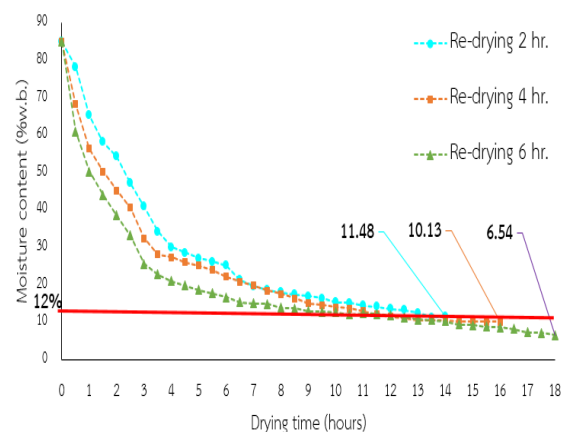
4.1 แนวทางการศึกษาที่ 1 เพื่อเลือกเวลาในการอบแห้งแต่ละตู้ (Holding time) และการอบแห้งแบบวนซ้ำ (Re-drying)

เมื่อทำการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาอบผลิตภัณฑ์ (1.0, 1.5, 2.0 ชั่วโมง) โดยพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Drying time) ของรถเข็นในแต่ละคันใช้เวลา 8, 12 และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ และระยะเวลาเดินเครื่องรวม (Operation time) เท่ากับ 15.0, 22.5 และ 30.0 ชั่วโมงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 และตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยผลผลิตหลังจากการอบแห้ง พบว่าการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 ชั่วโมง ได้ค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งคือ 50, 75 และ 90% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งแล้ว พบว่าระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 2 ชั่วโมง มีค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งมากที่สุด แต่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งทั้งหมดนานกว่าเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่เวลาอื่น ๆ คือ 30 ชั่วโมง และใช้ค่าใช้จ่ายต่อรอบถึง 7,600 บาท ส่วนที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่ 1 ชั่วโมง ได้ค่าผลผลิตเฉลี่ยคือ 50% เมื่อคำนวณมะม่วงที่ต้องทำการ

อบแห้งแบบวนซ้ำแล้วนั้น พบว่าจำนวนมะม่วงที่ต้องนำมาอบแห้งแบบวนซ้ำมีปริมาณเท่ากับจำนวนมะม่วงที่แห้ง หากนำมาอบแห้งแบบวนซ้ำอีกจะต้องรวมมะม่วงที่อบแห้งที่อยู่ในตู้อบแห้งออกมาก่อน ดังนั้นจึงเลือกนำวิธีการอบแห้งต่อตู้ที่ 1.5 ชั่วโมง ทำการอบแห้งแบบวนซ้ำ โดยการอบแห้งแบบวนซ้ำนี้ได้เพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 7 และตารางที่ 2 โดยค่าความชื้นสุดท้ายของมะม่วงการอบแห้งแบบวนซ้ำที่เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าความชื้นสุดท้ายที่ 11.48, 10.13 และ 6.54 %w.b. ตามลำดับ พบว่าในการอบแห้งแบบวนซ้ำที่เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีการลดลงของความชื้นต่ำกว่ามาตรฐาน และใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 14, 16 และ 18 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 6 ระยะเวลาการอบแห้งจากการวางแผนรูปแบบการใช้เวลาในการอบแห้งแต่ละตู้ (Holding time)



รูปที่ 7 ระยะเวลาการอบแห้งจากการวางแผนรูปแบบการอบแห้งโดยการอบแห้งแบบวนซ้ำ (Re-drying)

เมื่อนำมะม่วงที่อบแห้งโดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 1.5 ชั่วโมง (Holding time) ร่วมกับการทำการอบแห้งแบบวนซ้ำต่อตู้ที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมงแล้วนั้น จะได้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด คือ 24.5, 26.5 และ 28.5 ชั่วโมง ตามลำดับ และค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งคือ 86, 93 และ 80 % ตามลำดับ พบว่าที่ระยะเวลาการอบแห้งแบบวนซ้ำที่ 4 ชั่วโมง ให้ค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้ง(Average %yield)มากที่สุดเท่ากับ คือ 93% และเมื่อเทียบกับระยะเวลาในการอบแห้งต่อตู้ที่ 2 ชั่วโมง (Holding time) ซึ่งได้ค่าผลผลิตเฉลี่ยหลังการอบแห้งเพียง 90% พบว่าเมื่อใช้การอบแห้งแบบวนซ้ำ เข้ามาร่วมด้วย จะมีประสิทธิภาพดีกว่า โดยใช้ระยะเวลาเดินเครื่องรวม

(Operation time) น้อยกว่า 3.5 ชั่วโมง และค่าความสิ้นเปลืองแก๊สน้อยกว่า 2.59 กิโลกรัม พร้อมทั้งสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งที่ปรับปรุงแล้ว สามารถลดค่าใช้จ่ายรวมลงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการจัดการใหม่นี้ สามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าเชื้อเพลิงและค่าไฟฟ้าลงได้ แต่ยังไม่สามารถช่วยลดต้นทุนด้านแรงงานลงได้ ซึ่งมีสัดส่วนประมาณ 1 ใน 4 ของต้นทุนทั้งหมด โดยเมื่อคิดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Cost) ต่อรอบ ของกระบวนการปรับปรุงแล้ว จะสามารถลดต้นทุนลงได้จาก 190 เป็น 169 บาทต่อกิโลกรัม หรือประมาณ 10% ต่อบรรยากาศการผลิตในแต่ละครั้ง

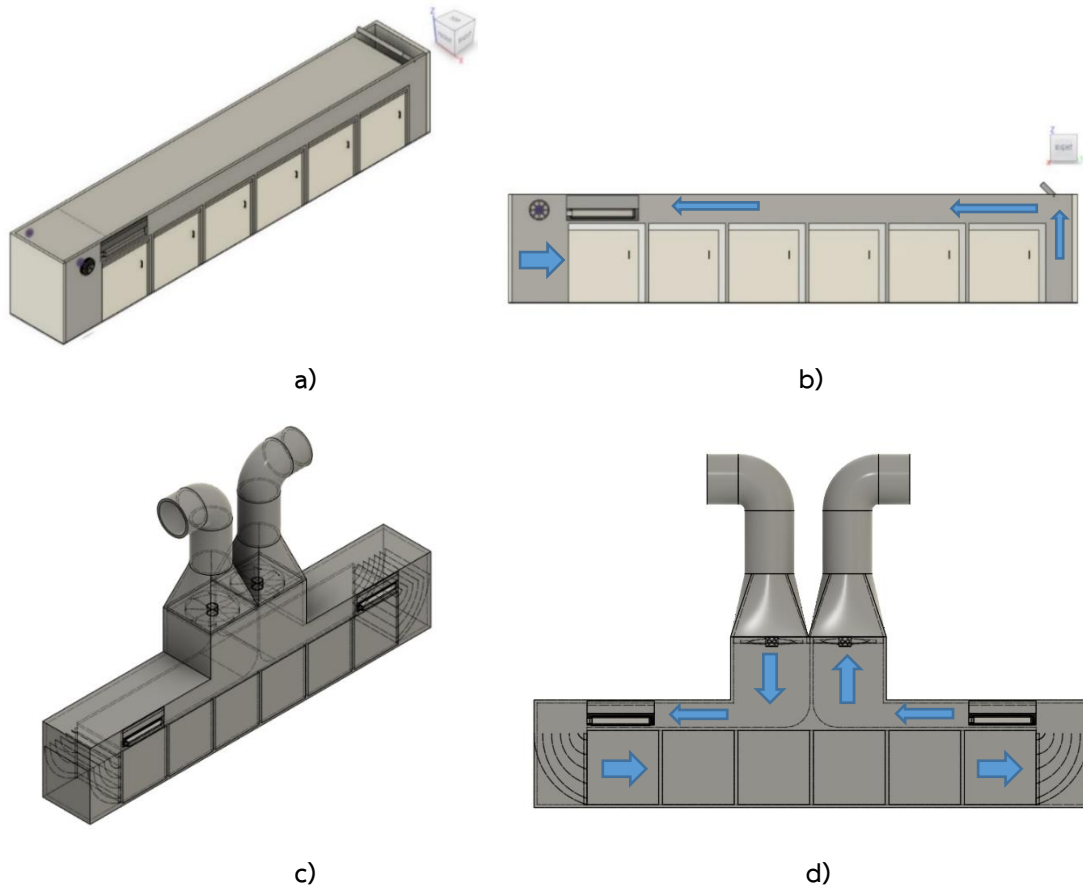
ตารางที่ 1 ผลจากการศึกษาโดยการปรับระยะเวลาการอบแห้ง (Holding time) เพื่อหาร้อยละผลผลิตที่ได้ (Average %yield) และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Cost) ต่อบรรยากาศ (Batch)

Holding time	Drying time	Operation time	Average %yield	Consumption LPG	LPG cost	Total cost	Cost
hours	hours	hours	%yield	kg.	THB/batch	THB/batch	THB/kg.
1.0	8	15.0	50	11.10	500	6,300	284
1.5	12	22.5	75	16.65	700	6,900	207
2.0*	16	30.0	90	22.20	900	7,600	190

ตารางที่ 2 ผลจากการศึกษาโดยการปรับระยะเวลาการอบแห้ง 1.5 ชั่วโมง ร่วมกับการอบแห้งแบบวนซ้ำ (Re-drying) เพื่อหาร้อยละผลผลิตที่ได้ (Average %yield) และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิต (Cost) ต่อบรรยากาศ (Batch)

Re-drying time	Drying time	Operation time	Average %yield	Consumption LPG	LPG cost	Total cost	Cost
hours	hours	hours	%yield	kg.	THB/batch	THB/batch	THB/kg.
2	14	24.5	86	18.13	700	6,700	175
4**	16	26.5	93	19.61	800	7,000	169
6	18	28.5	80	21.09	900	7,500	211

หมายเหตุ: * และ ** เป็นกระบวนการอบแห้งที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบ

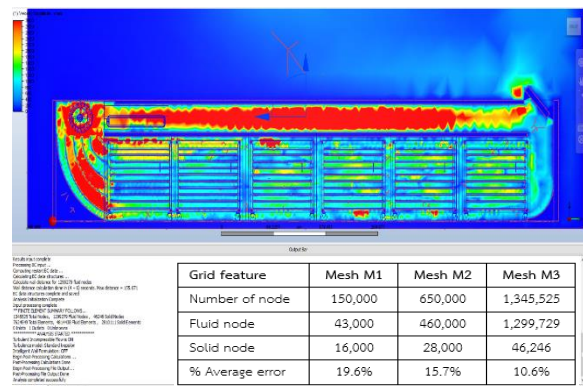


รูปที่ 8 แบบจำลองตู้โดยสารในแบบเดิม (a-b) และแบบที่ปรับปรุงใหม่ (c-d)

4.2 แนวทางการศึกษาที่ 2 เพื่อแก้ไขปัญหาการกระจายลมและอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอในตู้โดยสาร และปัญหาแรงงานในการขนย้ายรถเข็น

โดยเริ่มจากการใช้โปรแกรม Autodesk Fusion 360 เพื่อสร้างแบบจำลองตู้โดยสารในแบบเดิม และแบบที่ปรับปรุงใหม่ และใช้โปรแกรม Autodesk CFD 2018 เพื่อทำนายผลการจำลองการกระจายลมและอุณหภูมิภายในตู้โดยสาร [6-10] ดังแสดงในรูปที่ 8 ถึง 10 สำหรับกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Grid validation) ดังรูปที่ 9 จะทำเพียงแบบจำลองตู้โดยสารในแบบเดิม ซึ่งพบว่าเมื่อทำการวัดค่าการกระจายลมและอุณหภูมิ เปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม CFD ตลอดช่วงความยาวตู้โดยสารทั้ง 6 รถเข็น ๆ ละ 3 ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ซึ่งในการศึกษาได้ใช้ระดับความละเอียดของจุด (Node) จำนวน 3 ระดับ (Mesh M1, M2,

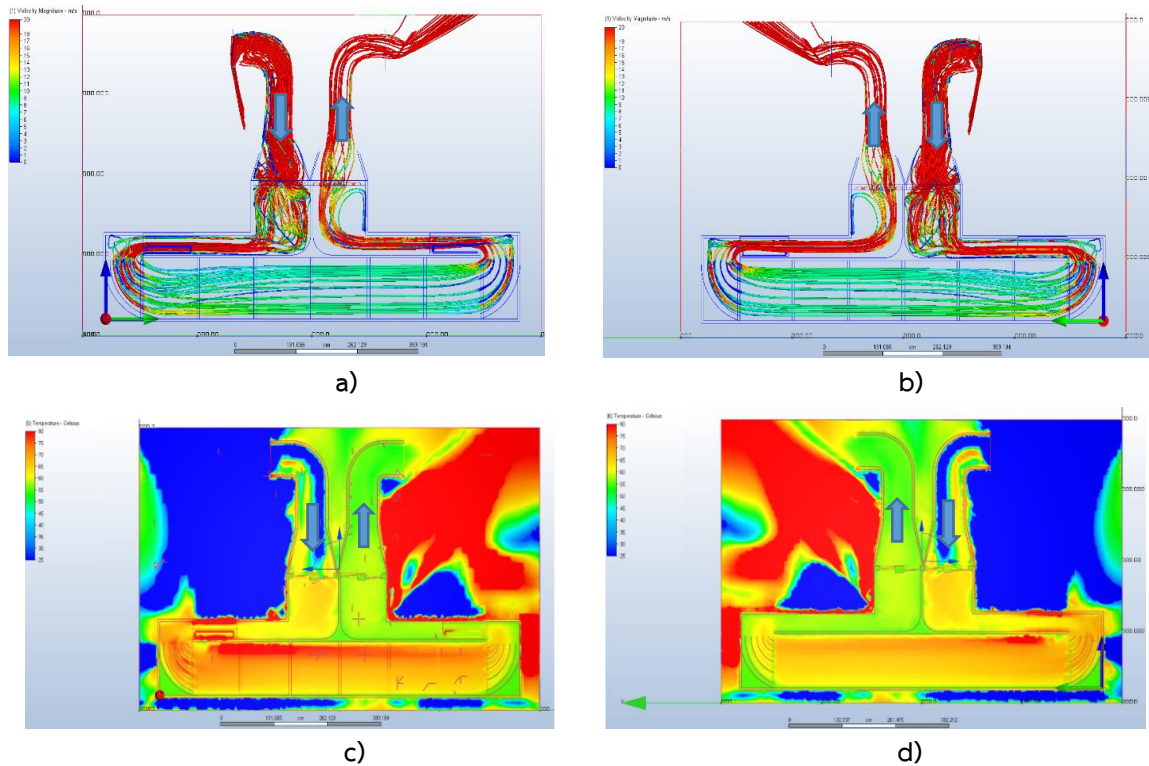
M3) ซึ่งพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (% Average error) เท่ากับ 19.6, 15.7 และ 10.6% ตามลำดับ ดังนั้นในการดำเนินการต่อไป จึงเลือกระดับความละเอียดของจุดกริดเป็นแบบ Mesh M3 ต่อไป [11-12]



รูปที่ 9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เมื่อทำการการเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งจากแบบเดิม ให้เป็นการอบแห้งแบบสลับทิศทางลม (Airflow reversal technique) โดย Lopez et al., 2008 และ Janjai et al., 2011 ได้กล่าวไว้ว่า การอบแห้งด้วยวิธีนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งได้รับความร้อนทั้งส่วนบนและส่วนล่างทำให้การกระจายลมและอุณหภูมิเป็นไปได้อย่างทั่วถึง ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ร่วมกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือช่วยในการทำนายและหาแนวทางแก้ไขปัญหาคาการกระจายลมและอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพก่อนที่ผู้ประกอบการจะ

ตัดสินใจเลือกลงทุน โดยจากการศึกษาพบว่าวิธีปรับปรุงการกระจายความเร็วลมและอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งได้ดีที่สุดควรเลือกการปรับปรุงด้วยการกำหนดตำแหน่งพัดลมทางเข้าและออกของลมร้อนให้อยู่ตรงปลายทั้งสองข้างเพื่อสลับทิศทางของลม ด้วยพัดลมแบบ Vane axial ที่สามารถสลับทิศทางได้ ซึ่งจากเดิมทางเข้าและออกของลมร้อนใช้ช่องทางเข้าและออกอันเดียวกัน และอยู่ในช่วงท้ายของตู้อบแห้งเพื่อใช้ปรับสัดส่วนลมเข้าและออก (Damper) ทำให้ส่วนปลายมีความเร็วลมและอุณหภูมิต่ำลง



รูปที่ 10 การทำนายผลการจำลองการกระจายลมและอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งในแบบเดิม และแบบที่ปรับปรุงใหม่

จากการสร้างแบบจำลองของตู้อบแห้งแบบใหม่ และทำการจำลองรูปแบบการกระจายลมและอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยในแบบจำลองรูปที่ 10 a) และ c) แสดงทิศทางลมเข้าทางด้านซ้ายและออกทางด้านขวา ส่วนรูปที่ 10 b) และ d) แสดงทิศทางลมเข้าทางด้านขวาและออกทางด้านซ้าย ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนเทคนิคการอบแห้งให้เป็นแบบสลับทิศทางลม พบว่าการกระจาย

ความเร็วลมภายในตู้อบแห้งดีขึ้น โดยมีการกระจายความเร็วลมประมาณ 3-5 เมตรต่อวินาที ทั้งก่อนและหลังสลับทิศทางดังรูปที่ 10 a) และ b) และการกระจายอุณหภูมิประมาณ 60-70°C ทั้งก่อนและหลังสลับทิศทางดังรูปที่ 10 c) และ d) ทำให้ช่วยในการดึงอากาศชื้นออกจากตู้อบแห้งได้ดี อีกทั้งช่วยลดแรงงานคนเพื่อเข็นรถเข็นเข้าและออกตู้อบแห้งได้ ซึ่งคิดเป็นต้นทุนที่สามารถลดลงได้ในส่วนของ

ค่าแรงงานลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ต่อการอบการผลิต อย่างไรก็ตามก็ควรทำมีศึกษาวิจัยจริงกับตู้อบแห้งที่ปรับปรุงนี้ โดยศึกษาทั้งจำนวนและเวลาในการสลับทิศทางของตู้อบแห้งที่เหมาะสมต่อไป

5. สรุป

จากผลการศึกษาพบว่า แนวทางการศึกษาที่ 1 ได้ทำการวางแผนรูปแบบการอบแห้งตามระยะเวลาการอบผลิตภัณฑ์ การบริหารจัดการการอบแห้งด้วยการนำผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่แห้งทำการอบวนซ้ำใหม่ เพื่อช่วยให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายและ

เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ส่วนแนวทางการศึกษาที่ 2 เป็นการแก้ไขข้อขัดข้องเชิงแนวคิด โดยแนวทางนี้สามารถช่วยอธิบายการกระจายลมภายในตู้อบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอได้เป็นอย่างดี พร้อมทั้งสามารถใช้เป็นเครื่องมือเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงเครื่องต่อไปได้ในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล. (2555). เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน: การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 35(2), 269-283.
- [2] Phirunrat Thaisamak, Wipa Teppinta, Chanawat Nitatwichit, Jatupong Varith and Somkiat Jaturonglumert. (2013). Fixed Deep-beds Drying of Black Pepper: A comparative study between a normal airflow and reverse airflow. *Journal of Agr. Research & Extension* 30(3) (Suppl.): 68-79.
- [3] Sakawduan Kaewdam, Chanawat Nitatwichit, Jatupong Varith and Somkiat Jaturonglumert. (2013). Mathematical model of freeze drying on mango. *Journal of Agr. Research & Extension* 30(3) (Suppl.): 56-67.
- [4] ขญานิต รัตนมงคล, สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ, ขนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร, พิสุทธิ กลิ่นขจร และหยาดฝน ทนงการกิจ. (2561). จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. ในการประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ครั้งที่ 17, ลำปางรีสอร์ท อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง.
- [5] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2558). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน: ผักและผลไม้อบแห้ง. มพช., 136/2558.
- [6] พิมพ์ วุฒิสินธ์, ชูศักดิ์ ขวประดิษฐ์, สุเทพ กลสิกรรม, พุทธิธินันท์ จารุวัฒน์, เวียง อากรซี, ตัญญา กองช่อง และ สุภัทร หนูสวัสดิ์. (2551). รายงานผลการวิจัยเรื่องเติม พัฒนาเครื่องอบแห้งลำไย. กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร.
- [7] I.I. Ruiz-López, C.E. Martínez-Sánchez, R. Cobos-Vivaldo and E. Herman-Lara. (2008). Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed beds with airflow reversal. *Journal of Food Engineering*. 89(1), 310 - 318.
- [8] Janjai, S., N. Lamler, B. Mahayothee, P. Srumsiri, M. Precoppe, B.K. Bala and Muller J. (2011). Experimental and simulation performances of a batch-type longan dryer with air flow reversal using biomass burner as a heat source. *J. Drying technology* 29, 1439-1451.

- [9] Jing Xie, Xiao - Hua Qu, Jun - Yu Shi and Da - Wen Sun. (2006). Effects of design parameters on flow and temperature fields of a cold storage by CFD simulation. *Journal of Food Engineering* 77, 355-363.
- [10] S. Jaturonglumlert, J. Pimphimol and J. Varith. (2008). Influence of longan packed bed arrangement on air flow pattern under forced-air convection. *International Symposium on Longan, Lychee, and other Fruit Trees in Sapindaceae Family* 863, 381-388.
- [11] José Rivas, M. Constanza Sadino-Riquelme, Ignacio Garcés, Andrea Carvajal and Andrés Donoso-Bravo. (2020). Spatial and temporal validation of a CFD model using residence time distribution test in a tubular reactor. *Computation* 2020, 8, 0094; doi:10.3390/computation8040094.
- [12] Rosario Lanzafame, Stefano Mauro, Michele Messina and Sebastian Brusca. (2020). Development and validation of CFD 2D models for the simulation of micro H-Darrieus turbines subjected to high boundary layer instabilities. *Energies* 2020, 13, 5564; doi:10.3390/en13215564.