วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน | Agriculture & Technology RMUTI Journal
ปีที่ 6 ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม 2568 | Vol.6 No.3 September – December 2025

Received: April 8, 2025; Revised: July 8, 2025; Accepted: August 18, 2025

การเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยควบคุมการหมุนเวียนอากาศอัจฉริยะผ่านระบบไอโอที

Enhancing hot air drying performance through IoT-based intelligent air recirculation control

กานต์ กอมณี[1] อภินันต์ นามเขต[1] ทรงสุภา พุ่มชุมพล[1] รัฐพงศ์ ปฏิกานัง[1]
ชาคริต โพธิ์งาม[1] กฤตยา ไชยยศ[1*] และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา[1]
Kan Komanee[1], Apinunt Namkhat[1], Songsupa Pumchumpol[1], Rattapong Patikanang[1], Chakrit Po-Ngam[1], Krittaya Chaiyot[1*] and Umphisak Teeboonma[1]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี
[1]Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani Province
[*]Corresponding Author E-mail Address : krittaya.c@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารและเกษตรกรรมเพื่อการลดความชื้นผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมการหมุนเวียนอากาศที่ปรับเปลี่ยนได้แบบเรียลไทม์บนพื้นฐานของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง การทดลองดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิอบแห้งที่ 50°C 60°C และ 70°C ร่วมกับเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศ 0% 25% 50% และ 75% โดยควบคุมความเร็วลมคงที่เท่ากับ 1.5 m/s สำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ เนื้อหมูสันในเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะการอบแห้ง ได้แก่ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศช่วยลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในขณะที่อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ภายใต้สภาวะอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 70°C การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศจาก 0% เป็น 75% ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง 61% และอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น 11% นอกจากนี้ยังพบว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 50°C และเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศ 75% ให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 17.11 kWh/kg ผลการศึกษานี้ยืนยันว่า การบูรณาการระบบควบคุมเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศเข้ากับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสามารถเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งได้อย่างมีนัยสำคัญ แนวทางนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพการประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในระบบอบแห้งที่เน้นการประหยัดพลังงานและการพัฒนาอย่างยั่งยืนในระยะยาว

คำสำคัญ: การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พลังงาน เปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศ

Abstract

Drying is an energy-intensive process extensively utilized in food and agricultural industries for moisture reduction of products. This research aimed to investigate techniques for enhancing hot air drying performance through the application of a real-time adjustable air recirculation control system based on Internet of Things technology. Experiments were conducted under drying temperature conditions of 50°C, 60°C and 70°C combined with air recirculation percentages of 0%, 25%, 50% and 75%, while maintaining constant air velocity at 1.5 m/s. Pork tenderloin was used as the sample material for this study. The criteria used for evaluating drying performance included drying rate and specific energy consumption. The study results revealed that increasing drying temperature resulted in increased drying rate and specific energy consumption. Conversely, increasing air recirculation percentage helped reduce specific energy consumption while drying rate increased. Under drying temperature conditions of 70°C, increasing air recirculation percentage from 0% to 75% resulted in a 61% reduction in specific energy consumption and an 11% increase in drying rate. Furthermore, it was found that under conditions of 50°C drying temperature and 75% air recirculation percentage, the lowest specific energy consumption of 17.11 kWh/kg was achieved. This study confirms that integrating air recirculation percentage control systems with Internet of Things technology can significantly enhance drying performance. This approach demonstrates potential for industrial-scale applications, particularly in energy-saving drying systems and long-term sustainable development.

Keywords: Waste heat recovery, Specific energy consumption, Energy, Air recirculation percentage

บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร เพื่อลดความชื้น ยืดอายุการเก็บรักษา และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ (Adeyeye et al., 2022; Mishra et al., 2022) ปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งมีหลายวิธี อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot Air Drying; HAD) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากไม่ซับซ้อนและต้นทุนการสร้างเครื่องต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น (Masud et al., 2020; Gu et al., 2022) อย่างไรก็ตาม การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบดั้งเดิมมีข้อด้อยที่สำคัญ คือการใช้พลังงานค่อนข้างสูง นอกจากนี้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลค่อนข้างต่ำ รวมถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์ เช่น การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ (Ju et al., 2023) ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงเป็นหัวข้อวิจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง

กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนไปยังผลิตภัณฑ์เพื่อระเหยน้ำ และการถ่ายเทมวลซึ่งความชื้นจากภายในผลิตภัณฑ์แพร่กระจายออกสู่พื้นผิวและถูกอากาศพัดพาไป (Vinai et al., 2024) โดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง และคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Okunola et al., 2023) และข้อด้อยประการหนึ่งของการอบแห้งด้วยลมร้อนคือประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมและการควบคุมพารามิเตอร์ในกระบวนการไม่แม่นยำเพียงพอ นอกจากนั้นยังขาดระบบติดตามแบบเรียลไทม์ (Real-time monitoring) ส่งผลให้ใช้เวลาอบแห้งนานเกินความจำเป็น ก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ และส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต (Mishra et al., 2023)

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things; IoT) ได้นำเสนอศักยภาพใหม่ในการพัฒนากระบวนการอบแห้ง (Dadhaneeya et al., 2023; Miano et al., 2023; Mishra et al., 2023) ระบบ IoT ช่วยให้สามารถตรวจวัดและควบคุมตัวแปรสำคัญ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม ได้อย่างแม่นยำและทันท่วงที ผ่านเซนเซอร์อัจฉริยะและระบบป้อนกลับอัตโนมัติ งานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าระบบอบแห้งที่ควบคุมด้วย IoT สามารถลดการใช้พลังงานได้โดยยังคงรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ไว้ได้ (Mishra et al., 2023) นอกจากนั้นแนวคิดเรื่องการนำ

อากาศร้อนชื้นที่ออกจากห้องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่หรือการหมุนเวียนอากาศก็เป็นอีกเทคนิคที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นทางเลือกในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Fu et al., 2023; Pakdeekaew et al., 2023) การหมุนเวียนอากาศทำให้สามารถนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ช่วยลดความต้องการพลังงานในการทำความร้อนให้อากาศใหม่จากสภาวะแวดล้อม และจากงานวิจัยที่ผ่านมา Djaeni et al. (2021) และ Wang et al. (2022) พบว่า สามารถลดการใช้พลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญในระบบอบแห้ง

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีความก้าวหน้าและความเข้าใจในประโยชน์ของทั้ง IoT และการหมุนเวียนอากาศ แต่ยังคงมีช่องว่างองค์ความรู้ที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลาและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ งานวิจัยก่อนหน้าที่ศึกษาประเด็นการหมุนเวียนอากาศจะกำหนดให้เปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศคงที่ตั้งแต่เริ่มต้นการอบแห้งจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ (Djaeni et al., 2021; Wang et al., 2022) ซึ่งยังขาดการศึกษาในประเด็นการควบคุมเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศในรูปแบบการปรับเปลี่ยนตามช่วงของการอบแห้งโดยใช้ข้อมูลจากระบบ IoT โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับเปลี่ยนตามจุดวิกฤติของการอบแห้ง เช่น จุดเปลี่ยนจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) ไปยังช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ซึ่งเป็นช่วงเวลาสำคัญที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การผสานการควบคุมแบบปรับเปลี่ยนโดยใช้ข้อมูลจลนพลศาสตร์แบบเรียลไทม์จาก IoT เพื่อปรับเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศให้เหมาะสมกับแต่ละช่วงการอบแห้งจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูง อย่างไรก็ตาม ประเด็นนี้ยังขาดการศึกษาที่ครอบคลุม ความสำคัญของการแก้ไขปัญหานี้ไม่เพียงส่งผลต่อการลดต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมเท่านั้น แต่ยังมีนัยสำคัญต่อความยั่งยืนด้านพลังงานและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรมอาหารอีกด้วย

จากช่องว่างงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งได้กล่าวไว้ข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้เทคนิคควบคุมการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ตามช่วงเวลาของกระบวนการอบแห้ง โดยดำเนินการติดตามและควบคุมแบบเรียลไทม์ผ่านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุทดสอบและการเตรียมตัวอย่าง

การทดลองนี้ใช้เนื้อหมูสันในสดจากห้างสรรพสินค้าท้องถิ่นเป็นผลิตภัณฑ์ทดสอบ เนื่องจากเป็นส่วนที่มีไขมันน้อย อีกทั้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงและมีโครงสร้างเนื้อเยื่อที่เหมาะสมต่อการประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้น ค่าความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน Association of Official Analytical Chemists 2019 (AOAC, 2019) และพบว่า มีค่าเท่ากับ 240±10% d.b. ตัวอย่างถูกตัดด้วยเครื่องสไลซ์ให้มีขนาดเท่ากับ 1.0×10×1.0 cm^3 (กว้าง×ยาว×สูง)

ชุดทดลองการอบแห้ง

ชุดอุปกรณ์ทดลองระบบอบแห้งด้วยลมร้อนที่ออกแบบเฉพาะและบูรณาการกับเทคโนโลยี IoT มีรายละเอียดดังแสดงใน Figure 1

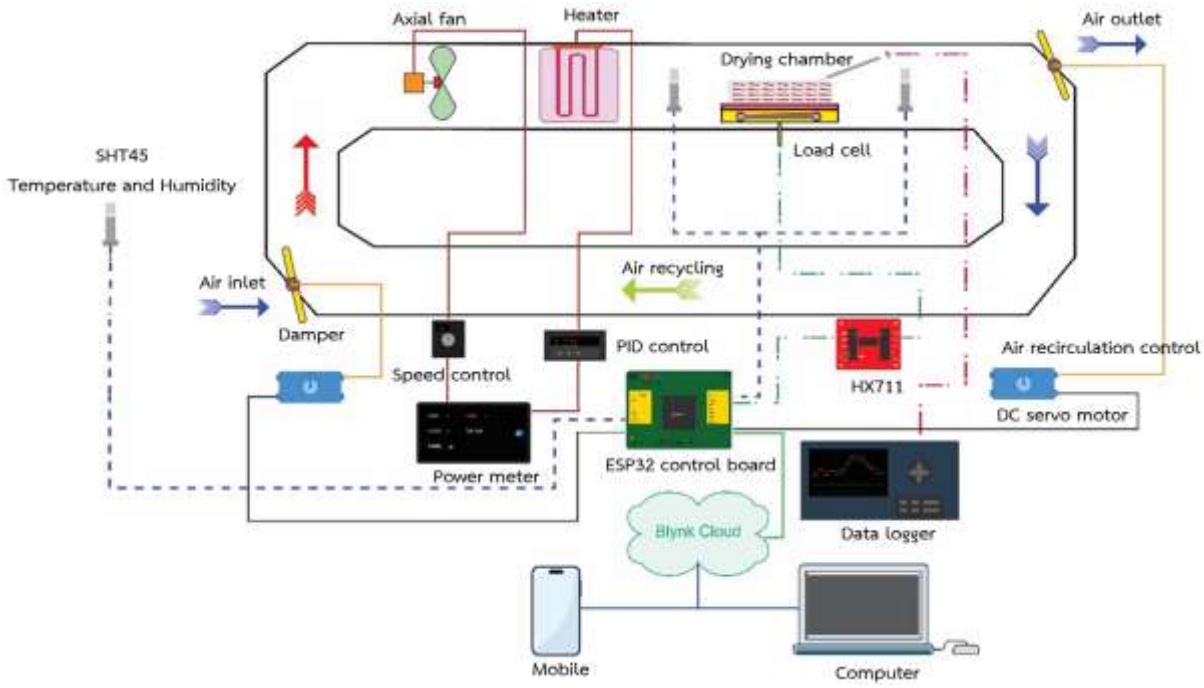


Figure 1 Schematic diagram of hot air drying system with IoT-controlled air recirculation

ระบบประกอบด้วยพัดลมแบบแนวแกนขนาด 100 W ขดลวดความร้อนขนาด 3 kW ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี (Proportional Integral Derivative; PID) ปรับการหมุนเวียนอากาศผ่านแดมเปอร์ด้วยเซอร์โวมอเตอร์ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (SHT45) ได้รับการสอบเทียบให้มีความแม่นยำ ±0.1°C และ ±1% RH ถูกติดตั้งที่ทางเข้าและทางออกเพื่อติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ ข้อมูลจากเซนเซอร์ SHT45 โหลดเซลล์ และเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่เชื่อมต่อแพลตฟอร์ม Blynk Cloud ซึ่งช่วยให้ติดตามและควบคุมการทำงานระยะไกลได้ ในส่วนการติดตามความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ลดลงดำเนินการโดยใช้โหลดเซลล์วัดน้ำหนักผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องเพื่อใช้วิเคราะห์ความชื้น สัดส่วนความชื้น และความชันของเส้นกราฟ ซึ่งความชันเส้นกราฟจะถูกใช้อ้างอิงในการปรับ เปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศ โดยในช่วงแรกของการอบแห้งจะไม่มีการหมุนเวียนอากาศ (ปล่อยอากาศร้อนที่ผ่านห้องอบแห้งทิ้งทั้งหมด) ทั้งนี้เพื่อเร่งการถ่ายเทมวลที่ผิวนอกผลิตภัณฑ์และระบายความชื้นในห้องอบแห้ง หลังจากกระบวนการอบแห้งเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ระบบ IoT จะปรับให้มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดการสูญเสียพลังงาน โดยมีเงื่อนไขในการปรับคือ 25% 50% และ 75% ตามลำดับ นอกจากนั้นได้ติดตั้งมิเตอร์วัดและบันทึกการใช้พลังงานเพื่อใช้ประเมินความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้ง กระบวนการอบแห้งเริ่มจากอากาศแวดล้อมถูกดูดโดยพัดลมเพื่อส่งต่อไปรับความร้อนที่ขดลวดความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ตามอุณหภูมิอบแห้งที่กำหนด หลังจากนั้นอากาศร้อนจะผ่านเข้าห้องอบแห้งเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนและถ่ายเทมวลกับผลิตภัณฑ์ อากาศร้อนชื้นที่ออกจากห้องอบแห้งในกรณีไม่มีการหมุนเวียนอากาศจะถูกปล่อยทิ้งทั้งหมด หลังจากนั้นพัดลมระบบก็จะดูดอากาศใหม่เข้ามาและส่งต่อไปรับความร้อนที่ขดลวดความร้อนต่อไป สำหรับกรณีมีการหมุนเวียนอากาศ อากาศร้อนชื้นจะถูกปล่อยทิ้งบางส่วนซึ่งควบคุมด้วยแดมเปอร์ และบางส่วนถูกดึงกลับมาใช้ใหม่เพื่อนำไปผสมกับอากาศใหม่ที่เข้าสู่ระบบและไหลเวียนไปรับความร้อนที่ขดลวดความร้อน ลักษณะการทำงานของระบบก็จะต่อเนื่องเช่นนี้ไปจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ได้ตามที่ต้องการ

วิธีดำเนินการทดลอง

การทดลองดำเนินการภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิห้องอบแห้ง 50°C 60°C และ 70°C เปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศเท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% ซึ่งเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศในงานวิจัยนี้คือ สัดส่วนอัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศที่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศทั้งหมด โดยควบคุมผ่านการปรับมุมแดมเปอร์ด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งได้สอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างมุมแดมเปอร์กับเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ โดยในงานวิจัยนี้ควบคุม

ความเร็วให้คงที่เท่ากับ 1.5 m/s การทดลองแต่ละเงื่อนไขจะเริ่มต้นจากการเดินระบบเครื่องอบแห้งจนกระทั่งสมดุลความร้อนและอุณหภูมิอบแห้งได้ตามค่าที่กำหนด จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ที่จัดเตรียมไว้เข้าสู่ห้องอบแห้งและเริ่มบันทึกข้อมูลทุกพารามิเตอร์อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 60% d.b. หรือสัดส่วนความชื้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.25 จึงหยุดการทดลอง สำหรับการปรับเปอร์เซ็นต์การหมุนอากาศกลับมาใช้ใหม่จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความชันของเส้นกราฟดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งค่าความชันที่ใช้ในการพิจารณาวิเคราะห์มีความสัมพันธ์ตาม (Eq. 1)

$$\text{slope} = \frac{MR_{t+1} - MR_t}{\Delta t} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

เมื่อ MR_t คือ สัดส่วนความชื้นผลิตภัณฑ์ที่แต่ละช่วงเวลา (kg water/kg dry matter), MR_{t+1} คือ สัดส่วนความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ช่วงเวลาถัดไป (kg water/kg dry matter) และ Δt คือ การเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลา (min)

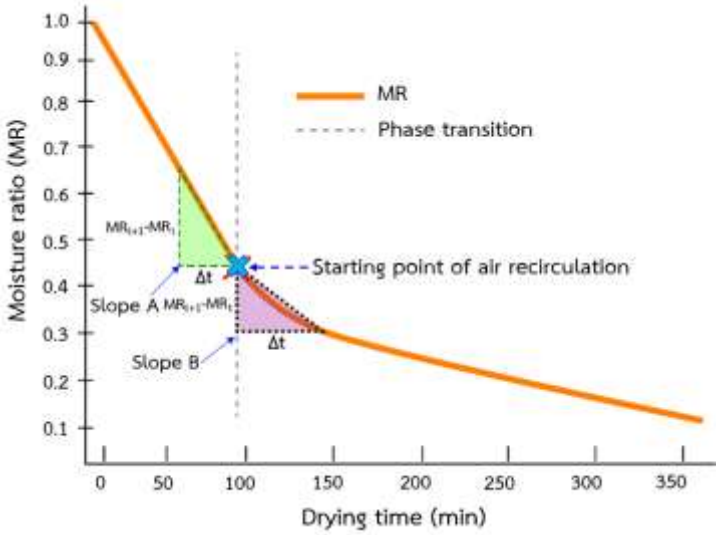
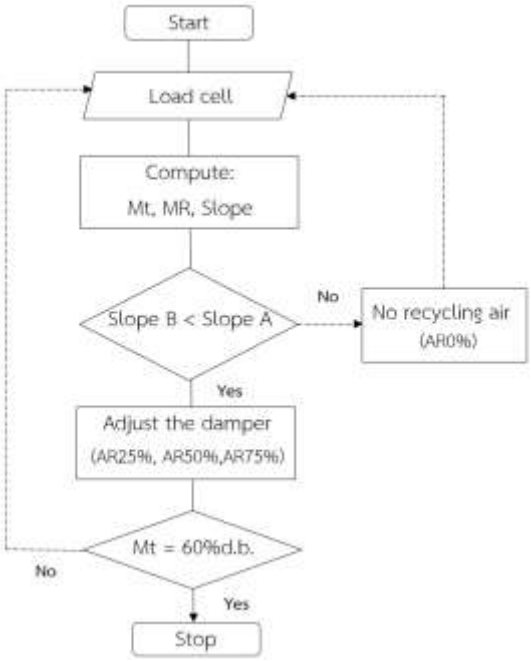
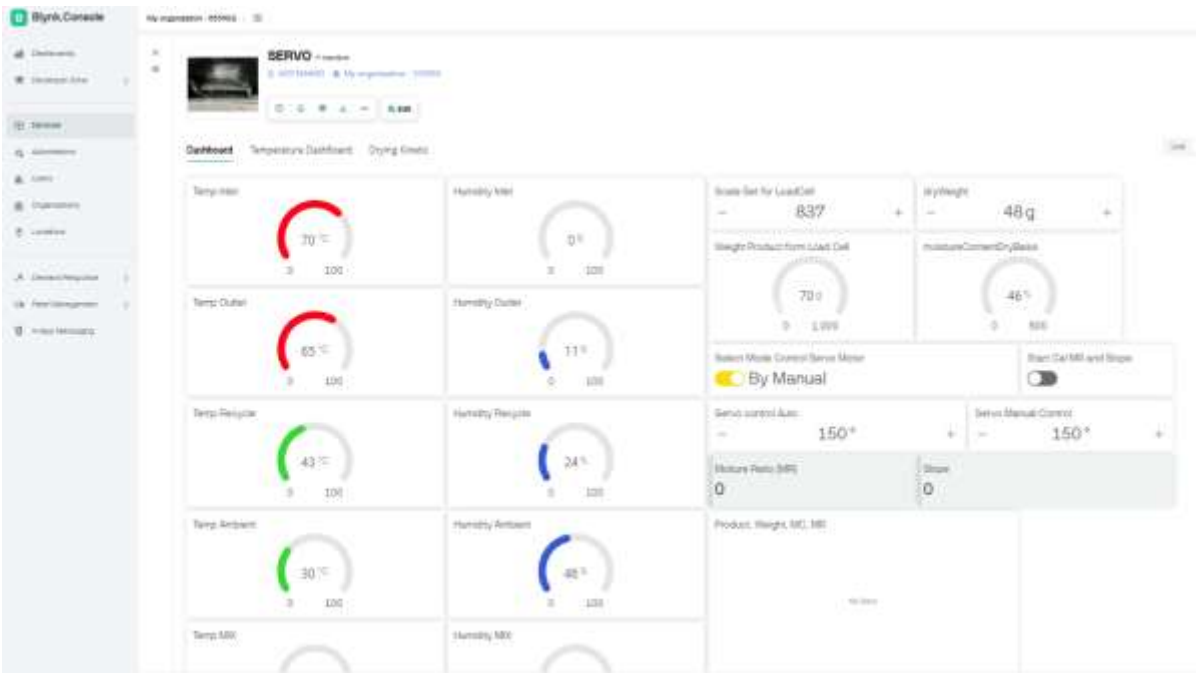


Figure 2 Moisture ratio and critical point for adjusting air recirculation percentage

ค่าความชันจาก (Eq. 1) คือดัชนีบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงช่วงการอบแห้งจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งในช่วงนี้จะเหมาะสมที่สุดในการปรับเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศ ผลจากการปรับนี้จะทำให้ความแตกต่างอุณหภูมิก่อนและหลังขดลวดความร้อนลดลง ช่วยลดการสูญเสียพลังงานความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมของระบบอบแห้งเพิ่มขึ้น โดยขั้นตอนทั้งหมดนี้ได้เขียนโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติผ่านระบบ IoT โดยมีแผนผังการควบคุมดังแสดงใน Figure 3



(A) System operation flowchart



(B) Example of monitoring, control, and data logging via Blynk Cloud

Figure 3 Schematic of the IoT-based air recirculation control system

การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับรายละเอียดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยมีดังนี้

ความชื้น

ความชื้น (Moisture content; M) คือ ปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อหนึ่งหน่วยมวลแห้ง เขียนความสัมพันธ์ได้ดัง (Eq. 2)

$$M = \frac{m_t}{m_d} \quad \text{(Eq. 2)}$$

เมื่อ M คือ ความชื้น (g water/g dry matter), m_t คือ มวลน้ำในผลิตภัณฑ์ที่แต่ละช่วงเวลา (g), m_d คือ มวลแห้งของผลิตภัณฑ์ (g)

สัดส่วนความชื้น

สัดส่วนความชื้น (Moisture Ratio; MR) วิเคราะห์โดยใช้ (Eq. 3) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น (Eq. 3) สามารถเขียนในรูปแบบอย่างง่ายได้ดัง (Eq. 4) ซึ่งสมการนี้จะถูกใช้เพื่อวิเคราะห์สัดส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลาของการอบแห้ง

$$MR_t = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad \text{(Eq. 3)}$$

$$MR_t \approx \frac{M_t}{M_{in}} \quad \text{(Eq. 4)}$$

โดย MR_t คือ สัดส่วนความชื้น (-), M_t ความชื้นที่แต่ละช่วงเวลา (kg water/kg dry matter), M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (kg water/kg dry matter) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (kg water/kg dry matter)

อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate; DR) คือ การเปลี่ยนแปลงมวลของผลิตภัณฑ์ต่อเวลา เขียนความสัมพันธ์ได้ดัง (Eq. 5)

$$DR = \frac{(m_t - m_{t+1})}{(\Delta t \times m_d)} \quad \text{(Eq. 5)}$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (g/g·min), m_t คือ มวลผลิตภัณฑ์ที่แต่ละช่วงเวลา (g), m_{t+1} คือ มวลผลิตภัณฑ์ที่ช่วงเวลาถัดไป (g), Δt คือ ช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลง (min), และ m_d คือ มวลแห้งของผลิตภัณฑ์ (g)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) วิเคราะห์จากพลังงานทั้งหมดที่ระบบใช้ (kWh) ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดัง (Eq. 6)

$$SEC = \frac{E_{total}}{m_w} \quad \text{(Eq. 6)}$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg), E_{total} คือ พลังงานทั้งหมดที่ระบบใช้ (kWh), m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

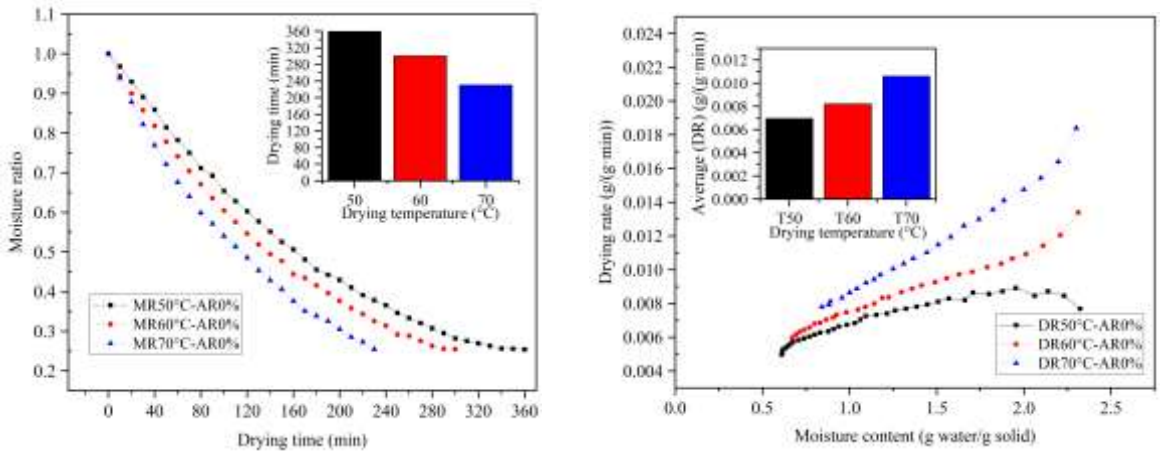
การวิเคราะห์ทางสถิติในงานวิจัยนี้ ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Minitab ทุกเงื่อนไขการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง และนำเสนอผลในรูปแบบค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในกลุ่มตัวอย่างวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ ($p<0.05$) และสำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) การหมุนเวียนอากาศ (AR) และอุณหภูมิอบแห้ง (T) โดยการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงพหุ (Multiple regression analysis) ซึ่งพิจารณาทั้งอิทธิพลของตัวแปรหลัก (Main effects) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Interaction) และพจน์กำลังสอง (Quadratic terms) โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared) ถูกใช้เพื่อประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้เพื่อตรวจสอบนัยสำคัญของปัจจัยในแบบจำลอง

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งเนื้อหมูสันในด้วยลมร้อนภายใต้อุณหภูมิอบแห้ง 50°C 60°C และ 70°C ร่วมกับการปรับเปลี่ยนการหมุนเวียนอากาศแบบอัตโนมัติผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เมื่อช่วงอัตราการอบแห้งเปลี่ยนแปลงจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยมีเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศที่ศึกษาเท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% ตามลำดับ ผลจากการศึกษามีรายละเอียดในแต่ประเด็นดังหัวข้อต่อไปนี้

ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง

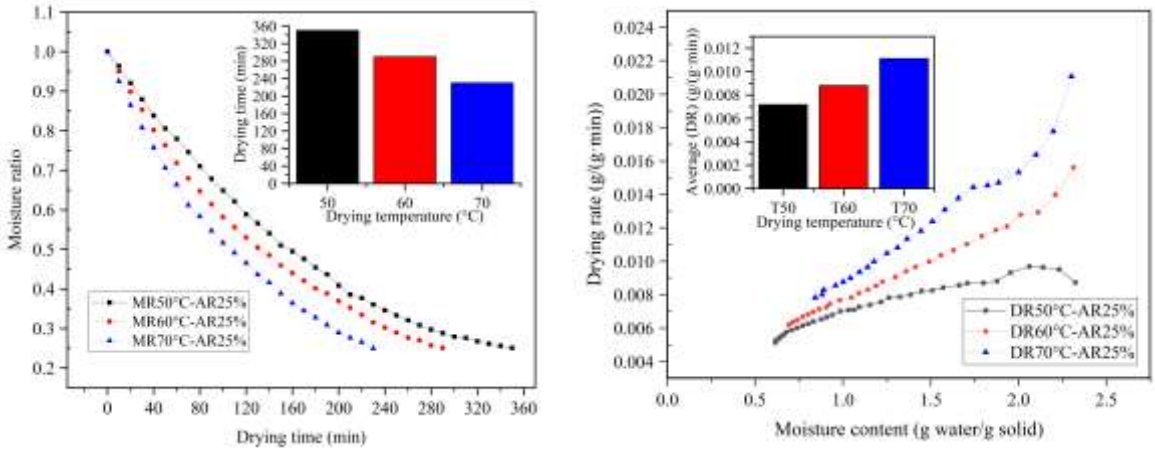
Figure 4-7 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง ภายใต้เงื่อนไขการหมุนเวียนอากาศเท่ากับ 0% 25% 50% และ 75% ตามลำดับ ผลจากการศึกษาในภาพรวมจะพบว่า สัดส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง โดยจะมีพฤติกรรมลดลงค่อนข้างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก ซึ่งสังเกตได้จาก Figure (4A-7A) หลังจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงจะช้าลง และหากพิจารณาอัตราการอบแห้ง (Figure 4B-7B) จะพบว่าในช่วงที่ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง (1.7-2.4 g water/g solid) หรือสัดส่วนความชื้นสูง (MR>0.7) อัตราการอบแห้งจะสูง ทั้งนี้เกิดจากผลิตภัณฑ์ยังคงมีความชื้นค่อนข้างสูง การระเหยของน้ำในช่วงนี้จึงเกิดจากน้ำที่สะสมบริเวณผิวชั้นนอกผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ซึ่งผลการศึกษานี้คล้ายคลึงและสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Bai et al., 2023; Shaukat et al., 2024) จากข้อมูลใน Figure 4 หากพิจารณาในกรณีการหมุนเวียนอากาศ 0% หรือปล่อยอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งทิ้งไปทั้งหมดโดยไม่มีการดึงกลับมาใช้ใหม่ และพิจารณาภายใต้เงื่อนไขความชื้นผลิตภัณฑ์สุดท้ายเท่ากับ 60%.d.b. หรือสัดส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 จะพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลง ในขณะที่อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Aranibar et al., (2023), Bai et al., (2023) และ Shaukat et al., (2024) เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลใน Figure 4 จะพบว่า กรณีเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 70°C จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่ากรณีอุณหภูมิอบแห้ง 50°C และ 60°C เท่ากับ 56% และ 30% ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่า อัตราการอบแห้งกรณีใช้อุณหภูมิอบแห้ง 70°C มีค่ามากกว่ากรณีใช้อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และ 60°C เท่ากับ 37% และ 25% ตามลำดับ สำหรับเหตุผลเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้เวลาการอบแห้งลดลง โดยที่อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น คือ การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศร้อนและผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทมวลหรือความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงเกิดขึ้นได้รวดเร็วและมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับหลักทฤษฎีสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล โดยผลจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า อุณหภูมิอบแห้งคือปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของผลิตภัณฑ์ (Al Faik et al., 2024; Zeng et al., 2024)



(A) Moisture ratio versus drying time

(B) Drying rate versus moisture content

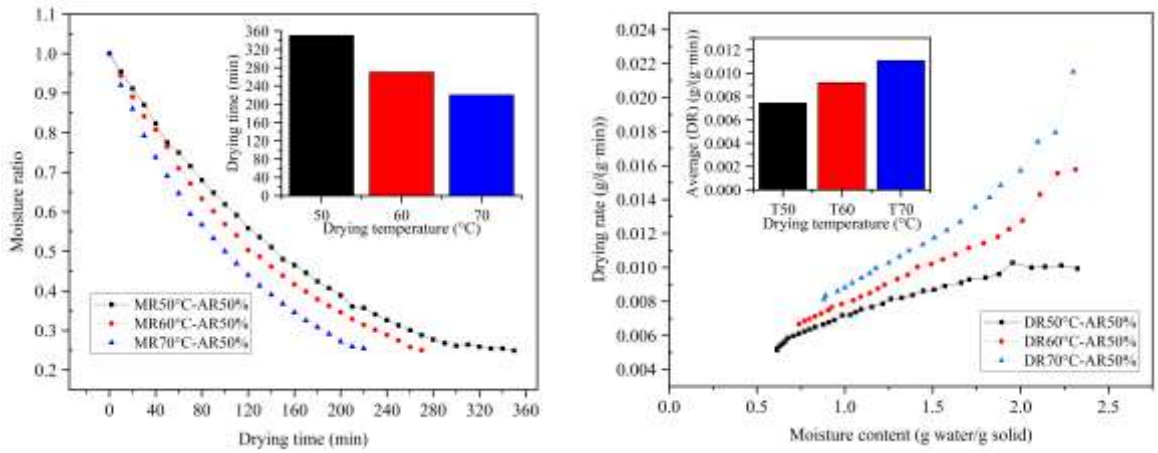
Figure 4 Effect of drying temperature on moisture ratio and drying rate at 0% air recirculation



(A) Moisture ratio versus drying time (B) Drying rate versus moisture content

Figure 5 Effect of drying temperature on moisture ratio and drying rate at 25% air recirculation

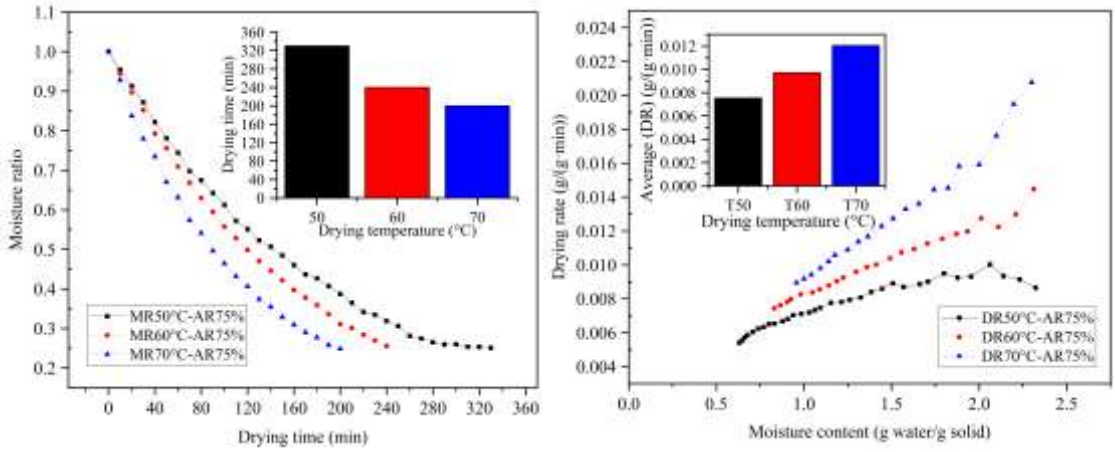
Figure 5 นำเสนอความสัมพันธ์ของอุณหภูมิอบแห้งต่อสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งในกรณีหมุนเวียนอากาศ 25% หรือปล่อยอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งทิ้งไป 75% และดึงกลับมาใช้ใหม่ 25% จากข้อมูลจะพบว่า มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับข้อมูลการหมุนเวียนอากาศ 0% เมื่อพิจารณาประเด็นระยะเวลาการอบแห้งและอัตราการอบแห้งพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C เท่ากับ 52% และ 26% ตามลำดับ โดยอัตราการอบแห้งกรณีใช้อุณหภูมิอบแห้ง 70°C มีค่ามากกว่ากรณีใช้อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และ 60°C เท่ากับ 33% และ 21% ตามลำดับ ซึ่งอธิบายเหตุผลได้ในลักษณะเช่นเดียวกันกับกรณีก่อนหน้า



(A) Moisture ratio versus drying time (B) Drying rate versus moisture content

Figure 6 Effect of drying temperature on moisture ratio and drying rate at 50% air recirculation

Figure 6 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิอบแห้งต่อสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งเมื่อหมุนเวียนอากาศ 50% หรือปล่อยอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งทิ้งไป 50% และดึงกลับมาใช้ใหม่ 50% จากข้อมูลจะพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70°C จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C เท่ากับ 59% และ 23% ตามลำดับ โดยอุณหภูมิอบแห้ง 70°C มีอัตราการอบแห้งมากกว่ากรณีใช้อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และ 60°C เท่ากับ 36% และ 18% ตามลำดับ



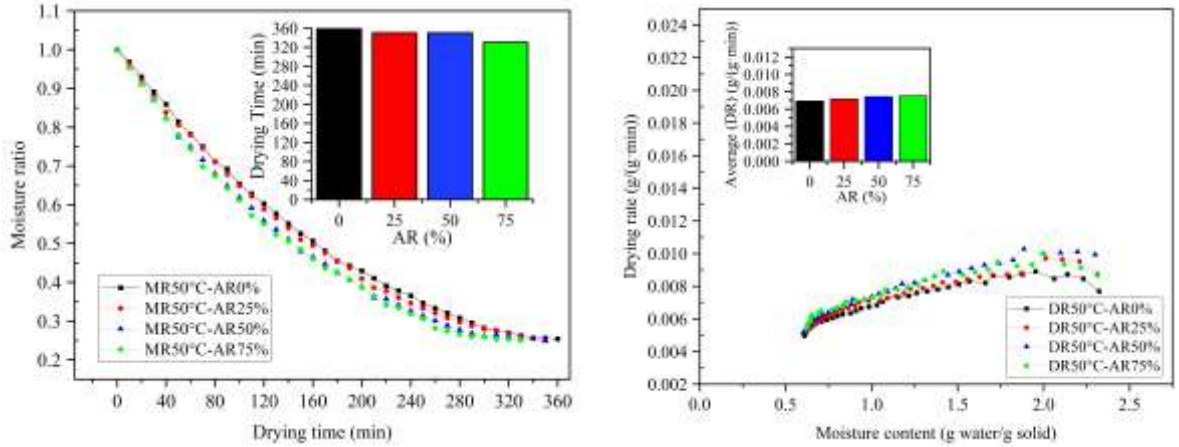
(A) Moisture ratio versus drying time (B) Drying rate versus moisture content

Figure 7 Effect of drying temperature on moisture ratio and drying rate at 75% air recirculation

Figure 7 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิอบแห้งต่อสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งเมื่อหมุนเวียนอากาศ 75% จากข้อมูลจะพบว่า แนวโน้มของข้อมูลมีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลที่แสดงใน Figure 4-6 และจากข้อมูลที่นำเสนอใน Figure 4-7 สามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50°C เป็น 70°C สามารถลดเวลาการอบแห้งสูงสุดถึง 65% และเพิ่มอัตราการอบแห้งได้สูงสุดถึง 39%

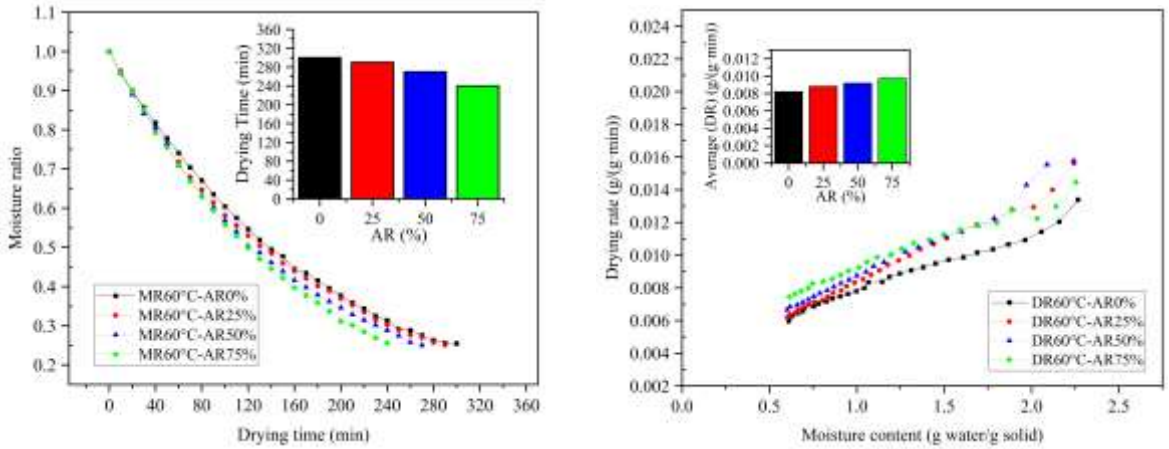
ผลของการหมุนเวียนอากาศที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง

Figure 8-11 แสดงความสัมพันธ์ของการหมุนเวียนอากาศที่มีต่อการเปลี่ยนสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 50°C 60°C และ 70°C ตามลำดับ จากผลการศึกษาในภาพรวมพบว่า การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศส่งผลให้เวลาการอบแห้งลดลงโดยที่อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นในทุกระดับอุณหภูมิอบแห้งที่ทำการศึกษา จากข้อมูลใน Figure 8 หากพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C และวิเคราะห์อิทธิพลของการหมุนเวียนอากาศจะพบว่า การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศจาก 0% เป็น 75% ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงประมาณ 9% ทั้งนี้เนื่องจากการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ช่วยลดการสูญเสียพลังงาน (Afzali et al., 2019; Zohrabi et al., 2020)



(A) Moisture ratio versus drying time (B) Drying rate versus moisture content

Figure 8 Effect of air recirculation percentage on moisture ratio and drying rate at 50°C

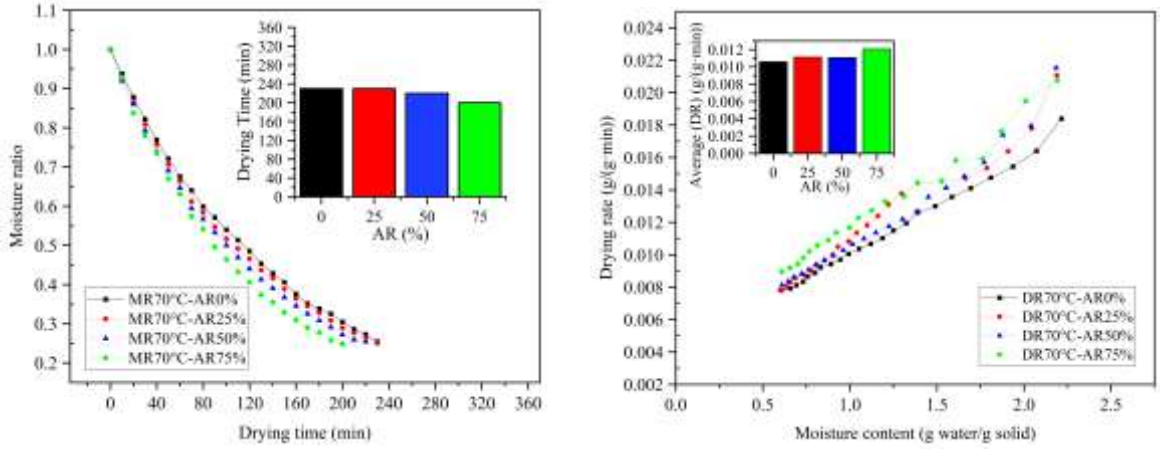


(A) Moisture ratio versus drying time (B) Drying rate versus moisture content

Figure 9 Effect of air recirculation percentage on moisture ratio and drying rate at 60°C

Figure 9 แสดงผลของการหมุนเวียนอากาศที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60°C ซึ่งพบว่า มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับที่อุณหภูมิ 50°C แต่มีอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศจาก 0% เป็น 75% ส่งผลให้เวลาการอบแห้งลดลงประมาณ 25% นอกจากนั้นเมื่อสังเกตจากกราฟอัตราการอบแห้ง (Figure 9B) จะเห็นได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศ 50% และ 75% ให้อัตราการอบแห้งในช่วงผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงใกล้เคียงกันและจะเริ่มแตกต่างกันเมื่อผลิตภัณฑ์มีความชื้นลดลง โดยเฉพาะในช่วงความชื้น 0.6-1.2 g water/g solid

Figure 10 แสดงความสัมพันธ์ของการหมุนเวียนอากาศต่อสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้ง 70°C จากข้อมูลจะพบว่า การหมุนเวียนอากาศ 75% มีระยะเวลาการอบแห้งสั้นที่สุดและให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุด และจากข้อมูลใน Figure 8-10 สรุปได้ว่า การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสามารถลดเวลาการอบแห้งและเพิ่มอัตราการอบแห้ง



(A) Moisture ratio versus drying time (B) Drying rate versus moisture content

Figure 10 Effect of air recirculation percentage on moisture ratio and drying rate at 70°C

ผลของอุณหภูมิอบแห้งและเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Figure 11 แสดงผลของอุณหภูมิอบแห้งและการหมุนเวียนอากาศที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption; SEC) จากผลการทดลองพบว่า ทั้งอุณหภูมิและการหมุนเวียนอากาศมีผลต่อค่า SEC อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Zlatanović et al., 2017; Fu et al., 2023) จาก Figure 11 หากพิจารณา

กรณีไม่มีการหมุนเวียนอากาศ (AR0%) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50°C เป็น 70°C พบว่า ค่า SEC เพิ่มขึ้นจาก 24.12 เป็น 34.38 kWh/kg หรือคิดเป็น 42.5% ในทางตรงกันข้ามพบว่า การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศในทุกเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งสามารถช่วยลดค่า SEC โดย SEC มีค่าต่ำที่สุดเมื่อการหมุนเวียนอากาศเท่ากับ 75% และหากพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50°C จะพบว่า SEC ที่เงื่อนไข AR75% มีค่าต่ำกว่าที่เงื่อนไข AR0% AR25% และ AR50% เท่ากับ 41% 35% และ 8% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 60°C จะพบว่า SEC ที่เงื่อนไข AR75% มีค่าต่ำกว่าที่เงื่อนไข AR0% AR25% และ AR50% เท่ากับ 62% 59% และ 9% ตามลำดับ และสุดท้ายเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 70°C จะพบว่า SEC ที่เงื่อนไข AR75% มีค่าต่ำกว่าที่เงื่อนไข AR0% AR25% และ AR50% เท่ากับ 61% 42% และ 19% ตามลำดับ จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่า การหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่มีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Zlatanović et al. (2017), Mohammadi et al. (2019) และ Zohrabi et al. (2020) สำหรับเงื่อนไขการอบแห้งที่ให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 17.11 kWh/kg คือ สภาวะอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50°C และการหมุนเวียนอากาศเท่ากับ 75%

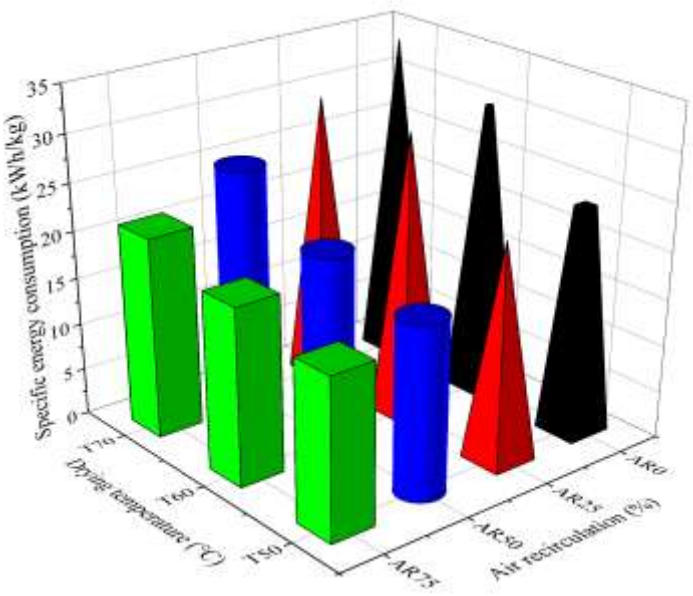


Figure 11 Influence of drying temperature and air recirculation percentage on specific energy consumption

ข้อมูลจากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่สามารถลดการใช้พลังงานหรือลด SEC ของการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่ไม่มีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่จะปล่อยพลังงานความร้อนทิ้งไปทั้งหมดก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งระบบจะต้องจ่ายพลังงานให้กับขดลวดความร้อนในปริมาณค่อนข้างคงที่ตลอดการอบแห้งเพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศจากสิ่งแวดล้อมให้ได้เท่ากับอุณหภูมิอบแห้งที่กำหนด และเมื่อมีการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่ อากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งจะถูกนำมาผสมกับอากาศใหม่ที่เข้าสู่ระบบซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการผสมอากาศส่งผลให้อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าสู่ขดลวดความร้อนสูงกว่ากรณีไม่มีการหมุนเวียนอากาศหรือการหมุนเวียนอากาศในอัตราส่วนที่ต่ำ ดังนั้นจึงทำให้พลังงานที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อนลดลงจากเดิม ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ $Q=mC_p\triangle T$ เมื่อ Q คือ พลังงานความร้อน (kW), m คือ อัตราการไหลเชิงมวลอากาศ (kg/s), C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะอากาศ (kJ/kg.°C) และ $\triangle T$ คือ ผลต่างอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังผ่านขดลวดความร้อน (°C)

Table 1 แสดงผลลัพธ์การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วยวิธีการถดถอยเชิงพหุ ซึ่งจากข้อมูลพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งและการหมุนเวียนอากาศมีนัยสำคัญทางสถิติสูง ($p<0.023$, $F=5.72$) ส่วนตัวแปรอื่นพบว่า ไม่มีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาร่วมกันในแบบจำลอง สามารถสร้างสมการถดถอยเพื่อแสดงค่า SEC ได้ดัง (Eq. 7)

$$SEC = -27.8 + 0.076AR + 1.457T - 0.00362(AR \times T) - 0.00803T^2 - 0.000151AR^2 \quad \text{(Eq. 7)}$$

ทั้งนี้ สมการถดถอยดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายค่า SEC ภายใต้เงื่อนไขการศึกษาในงานวิจัยนี้เท่านั้น คือ อุณหภูมิอบแห้ง 50°C 60°C และ 70°C และการหมุนเวียนอากาศ 0% 25% 50% และ 75% ตามลำดับ การนำสมการไปใช้ทำนายค่า SEC นอกช่วงเงื่อนไขที่ศึกษาอาจให้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอาจเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออยู่นอกช่วงที่ทำการศึกษา โดยสมการถดถอยนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 สูงถึง 88.48% และค่า R^2(adj) เท่ากับ 86.56% ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำสูงในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล

Table 1 Analysis of variance results for the regression model of specific energy consumption

Item	Degrees of Freedom (df)	F-value	p-value
Regression Model	5	46.08	0.000*
Air Recirculation (AR)	1	0.57	0.455
Drying Temperature (T)	1	2.73	0.109
Interaction (AR×T)	1	5.72	0.023*
Quadratic Term of Temperature (T^2)	1	1.20	0.282
Quadratic Term of Air Recirculation (AR^2)	1	0.07	0.787
Residual	30		
Total	35		

Note : Statistical significance at $p<0.05$

ผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอจุดเด่นที่สำคัญ คือ ระบบควบคุมการหมุนเวียนอากาศโดยบูรณาการร่วมกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อติดตามและควบคุมการทำงานแบบเรียลไทม์ให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีข้อแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Zohrabi et al., 2020; Djaeni et al., 2021; Fu et al., 2023) ที่ควบคุมเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศให้คงที่ทั้งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงหรือกล่าวได้ว่าคงที่ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการอบแห้ง

บทสรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและการหมุนเวียนอากาศที่มีต่อผลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยสามารถปรับเปลี่ยนการหมุนเวียนอากาศได้แบบเรียลไทม์ผ่านเทคโนโลยี IoT พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การหมุนเวียนอากาศช่วยลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะโดยที่อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50°C และการหมุนเวียนอากาศเท่ากับ 75% จะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 17.11 kWh/kg ในขณะที่ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 70°C และการหมุนเวียนอากาศเท่ากับ 75% จะใช้เวลาการอบแห้งสั้นที่สุดและมีค่าอัตราการอบแห้งสูงที่สุด สุดท้ายผลจากงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นชัดเจนว่าการใช้เทคโนโลยี IoT ติดตามและควบคุมเงื่อนไขการอบแห้งแบบเรียลไทม์สามารถลดการใช้พลังงานในงานอบแห้ง ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมอบแห้งต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนเครื่องมือและทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Adeyeye, S. A. O., Ashaolu, T. J., & Babu, A. S. (2022). Food drying: A review. *Agricultural Reviews*, *1*(8), 1–8. https://doi.org/10.18805/ag.R-2537

Afzali, F., Darvishi, H., & Behroozi-Khazaei, N. (2019). Optimizing exergetic performance of a continuous conveyor infrared-hot air dryer with air recycling system. *Applied Thermal Engineering*, *154*, 358–367. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.096

Al Faik, M. A., Roy, M., Azam, M. S., Ahmmed, R., Hoque, M. M., & Alam, M. M. (2024). Comprehensive study on potato drying in convective air dryer: Experimental observations, mathematical modeling, and model validation. *Measurement: Food*, *14*, 100170. https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2024.100170

AOAC. (2019). Official methods of analysis of AOAC international. Association of Official Analytical Chemists: Virginia.

Aranibar, C., Aguirre, A., & Borneo, R. (2023). Effect of temperature on drying kinetics and quality of partially deoiled chia flour wheat pasta. *Food Science and Engineering*, *5*(1), 10–25. https://doi.org/10.37256/fse.5120243238

Bai, R., Sun, J., Qiao, X., Zheng, Z., Li, M., & Zhang, B. (2023). Hot air convective drying of ginger slices: Drying behaviour, quality characteristics, optimisation of parameters, and volatile fingerprints analysis. *Foods*, *12*(6), 1283. https://doi.org/10.3390/foods12061283

Dadhaneeya, H., Nema, P. K., & Arora, V. K. (2023). Internet of things in food processing and its potential in Industry 4.0 era: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *139*, 104109. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.07.006

Djaeni, M., Hadiyanto, H., Kumoro, A. C., Utari, F. D., & Hii, C. L. (2021). Improvements in thermal efficiency of onion slice drying by exhaust air recycling. *Cogent Engineering*, *8*(1), 1920562. https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1920562

Fu, D., Wu, W., Wang, G., Xu, H., Han, F., & Liu, Z. (2023). Novel method of increased efficiency corn drying on a fixed bed by condensation. *Foods*, *12*(5), 1027. https://doi.org/10.3390/foods12051027

Gu, C., Ma, H., Tuly, J. A., Guo, L., Zhang, X., Liu, D., Ouyang, N., Luo, X., & Shan, Y. (2022). Effects of catalytic infrared drying in combination with hot air drying and freeze drying on the drying characteristics and product quality of chives. *LWT*, *161*, 113363. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113363

Ju, H.-Y., Vidyarthi, S. K., Karim, M., Yu, X. L., Zhang, W. P., & Xiao, H.-W. (2023). Drying quality and energy consumption efficient improvements in hot air drying of papaya slices by step-down relative humidity based on heat and mass transfer characteristics and 3D simulation. *Drying Technology*, 41(3), 460–476. https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2099416

Masud, M. H., Ananno, A. A., Ahmed, N., Dabnichki, P., & Salehin, K. (2020). Experimental investigation of a novel waste heat based food drying system. *Journal of Food Engineering*, *281*, 110002. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110002

Miano, J. I., Nabua, M. A., Gaw, A. R., Alce, A. R. B., Ecleo, C. A. M., Repulle, J. V., & Omar, J. J. (2023). Optimizing drying efficiency through an IoT-based direct solar dryer system: Integration of web data logger and SMS notification. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *14*(7), 223–230. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140726

Mishra, L., Hauchhum, L., & Gupta, R. (2022). Development and performance investigation of a novel solar-biomass hybrid dryer. *Applied Thermal Engineering*, *211*, 118492. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118492

Mishra, N., Jain, S., Agrawal, N., Jain, N., Wadhawan, N., & Panwar, N. (2023). Development of drying system by using internet of things for food quality monitoring and controlling. *Energy Nexus*, *11*, 100219. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100219

Mohammadi, I., Tabatabaekoloor, R., & Motevali, A. (2019). Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices. *Energy*, *170*, 149–158. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.099

Okunola, A. A., Adekanye, T. A., Okonkwo, C. E., Kaveh, M., Szymanek, M., Idahosa, E. O., Olayanju, A. T., & Wojciechowska, K. (2023). Drying characteristics, kinetic modeling, energy and exergy analyses of water yam (*Dioscorea alata*) in a hot air dryer. *Energies*, *16*(4), 1569. https://doi.org/10.3390/en16041569

Pakdeekaew, A., Treeamnuk, K., & Treeamnuk, T. (2023). Humidity control for air circulation in the drying process. *Advances in Technology Innovation*, *8*, 278–289. https://doi.org/10.46604/aiti.2023.12030

Shaukat, M. N., Fallico, B., & Nazir, A. (2024). Impact of air-drying temperatures on drying kinetics, physicochemical properties, and bioactive profile of ginger. *Foods*, *13*(7), 1096. https://doi.org/10.3390/foods13071096

Vinai, B., Praphanpong, S., Eakpoom, B., Apinunt, N., & Umphisak, T. (2024). Improve drying performance of noodles using hot air combined with infrared stimulation. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *118*(2), 47–61. https://doi.org/10.37934/arfmts.118.2.4761

Wang, G., Qiao, F., & Yue, Z. (2022). Research on energy saving and environmental protection electric power grain circulation drying system. *Journal of Advanced Thermal Science Research*, *9*, 38–49. https://doi.org/10.15377/2409-5826.2022.09.4

Zeng, Z., Han, C., Wang, Q., Yuan, H., Zhang, X., & Li, B. (2024). Analysis of drying characteristic, effective moisture diffusivity and energy, exergy and environment performance indicators during thin layer drying of tea in a convective-hot air dryer. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *8*, 1371696. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1371696

Zlatanović, I., Komatina, M., & Antonijević, D. (2017). Experimental investigation of the efficiency of heat pump drying system with full air recirculation. *Journal of Food Process Engineering*, *40*(2), e12386. https://doi.org/10.1111/jfpe.12386

Zohrabi, S., Aghbashlo, M., Seiiedlou, S. S., Scaar, H., & Mellmann, J. (2020). Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation. *Journal of Cleaner Production*, *257*, 120394. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120394