

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสำหรับอบแห้งอะโวคาโด

ยุทธนา ศรีอุดม^{1*} อนุรัตน์ เทวตา¹ สังคม สัพโส¹ และ ชินเนีย รัตทิภัทร²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

²คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

^{1, 2}41/1 หมู่ 7 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 9 เมษายน 2569 แก้ไขบทความ 26 มิถุนายน 2569 ตอรับบทความ 29 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และทดสอบประสิทธิภาพของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งอะโวคาโดพันธุ์พื้นเมือง โดยระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานแบบผสมผสานระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงกลางวัน และพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่แสงไม่เพียงพอ เพื่อให้กระบวนการอบแห้งดำเนินได้อย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง การทดลองใช้อะโวคาโดปริมาณเริ่มต้น 5 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 84.7% (wb) โดยควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งที่ 60, 65 และ 70 °C ผลจากการศึกษา พบว่า ระบบอบแห้งสามารถรักษาอุณหภูมิได้อย่างเสถียร และมีการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความชื้นของอะโวคาโดลดลงจนเหลือประมาณ 10% (wb) โดยใช้เวลาอบแห้ง 24.1, 22.8 และ 21.9 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ โดยมีค่าเท่ากับ 4.55%, 5.31% และ 5.65% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 70 °C ให้ประสิทธิภาพสูงสุด สรุปได้ว่าตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ลดระยะเวลาในการอบ และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอะโวคาโดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว

คำสำคัญ : อบแห้ง; พลังงานแสงอาทิตย์; อะโวคาโด; พลังงานสะอาด; การผลิตอย่างยั่งยืน

A Solar Dryer Integrated with an Electric Heating System for Avocado Drying

Yutthana Sriudom^{1*} Anurat Tewata¹ and Sangkom Sappaso¹ and
Zinnia Ratipat²

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

²Faculty of Business Administration and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

^{1, 2}41/1 moo 7 Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang, Tak, 63000

Received 9 April 2026; Revised 26 June 2026; Accepted 29 June 2026

Abstract

This research aims to design, develop, and evaluate the performance of a hybrid solar–electric dryer for drying local avocado varieties. The developed drying system operates by combining solar energy during the daytime with electrical energy when solar radiation is insufficient, enabling continuous drying for 24 hours. The experiment was conducted using 5 kg of avocados with an initial moisture content of approximately 84.7% (wet basis), under controlled drying temperatures of 60, 65, and 70 °C. The results showed that the drying system was able to maintain stable temperatures and achieve uniform heat distribution, resulting in a reduction of moisture content to approximately 10% (wet basis), with drying times of 24.1, 22.8, and 21.9 hours, respectively. Furthermore, the thermal efficiency of the system increased with higher drying temperatures, with values of 4.55%, 5.31% และ 5.65%, respectively, indicating that the temperature of 70 °C provided the highest efficiency. In conclusion, the developed hybrid solar–electric dryer effectively enhances drying performance, reduces drying time, and extends the shelf life of avocados and helps reduce post-harvest losses.

Keywords : Drying; Solar Energy; Avocado; Clean Energy; Sustainable Production

** Corresponding Author. Tel.: +666 6976 5424, E-mail Address: numkmutt@rmutl.ac.th*

1. บทนำ

อะโวคาโดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพสูง และมีการขยายพื้นที่เพาะปลูกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะในอำเภอพบพระ จังหวัดตาก ซึ่งมีสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ส่งผลให้สามารถผลิตอะโวคาโดได้ในปริมาณมาก อย่างไรก็ตาม การผลิตที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวกลับก่อให้เกิดปัญหาสำคัญ คือ การกระจุกตัวของผลผลิตในช่วงฤดูกาลเดียวกัน ส่งผลให้เกิดภาวะผลผลิตล้นตลาด ราคาผลผลิตตกต่ำ และไม่สามารถระบายสินค้าได้ทันเวลา นอกจากนี้ อะโวคาโดยังเป็นผลไม้ที่มีอัตราการสุกและเสื่อมคุณภาพรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว (Post-harvest loss) ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในระบบเกษตรและอาหาร โดยมีรายงานว่า การสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวของผลผลิตทางการเกษตรทั่วโลกอาจสูงถึง 30-40% [1] ดังนั้น การพัฒนาแนวทางเพื่อลดการสูญเสียและเพิ่มมูลค่าผลผลิตจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง

การแปรรูปผลผลิตด้วยกระบวนการอบแห้งเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษา เนื่องจากการลดความชื้นและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งช่วยลดการเน่าเสียและเพิ่มโอกาสในการกระจายสินค้าไปยังตลาดนอกฤดูกาลได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการตากแห้งแบบดั้งเดิม (Open sun drying) ยังมีข้อจำกัด เช่น การปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ และการควบคุมคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ [2] จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ในช่วงที่ผ่านมา เทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดและช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน โดยมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งหลายรูปแบบ เช่น การอบแห้งแบบพาสซีฟ การอบแห้งแอคทีฟ และการ

อบแห้งแบบไฮบริด อย่างไรก็ตาม ระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวมีข้อจำกัดสำคัญ คือ ไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงเวลากลางคืนหรือในสภาพอากาศที่มีเมฆมาก อีกทั้งยังควบคุมอุณหภูมิได้ยาก ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [3] ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาระบบอบแห้งแบบผสมผสานพลังงาน (Hybrid Solar Dryer) ซึ่งใช้แหล่งพลังงานเสริม เช่น พลังงานไฟฟ้า ชีวมวล หรือระบบกักเก็บความร้อน เพื่อให้สามารถดำเนินการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพมากขึ้น

จากการสืบค้นข้อมูลและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยมีนักวิจัยหลายท่าน ที่ได้ศึกษาและวิจัยด้านการอบแห้งตัวอย่างเช่น Sandali et.al. [4] ได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงและใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งรับพลังงานความร้อนจากใต้พิภพมาเป็น พลังงานความร้อนเสริมในการอบแห้ง แต่ในการทดลองจะใช้เครื่องทำน้ำร้อนสร้างความร้อนแทนความร้อนจากใต้ดินพบว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้เครื่องอบแห้งได้ โดยสามารถทำอุณหภูมิอากาศ ได้ 46 - 58 °C ในช่วงกลางวัน ขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมี ค่าประมาณ 25 °C และสามารถทำอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตอนกลางวันได้ 46 °C ขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าประมาณ 15 °C ดังนั้น เครื่องอบแห้งนี้จึงสามารถทำการอบแห้งได้ต่อเนื่องในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด Islam et.al. [5] ได้ศึกษาผลกระทบของการถ่ายเทความชื้นของผลไม้เมื่อใช้ส่วนวางผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน 3 แบบ แบบที่ 1 คือแบบใช้ท่ออากาศขนาดเล็กเป็นช่องทางเข้าของอากาศและใช้กระจกแผ่นเรียบปิดคลุมซึ่งมีรูเป็นช่องทางออกของอากาศ แบบที่ 2 คือ ใช้กระจกสองชั้นประกอบเป็นรูปหลังคาสามเหลี่ยมที่มีช่องว่างให้อากาศออกและมีรูตรงหน้าจั่วให้อากาศเข้า แบบที่ 3

คือแบบใช้กระจกแผ่นเรียบปิดด้านบน ด้านข้างมีรูอากาศ 2 รู ทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้เป็นช่องอากาศเข้าออก จากการทดลองปรากฏว่า ส่วนวางผลิตภัณฑ์แบบที่ 3 มีการถ่ายเทความชื้นได้ดีที่สุด เนื่องจากมีอัตราการระเหยน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 58.9% P. Kotchapoom [6] ได้ทำการประยุกต์ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาทำงานร่วมกับพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์เพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง เมื่อค่า Water activity ต่ำกว่า 85% ของน้ำหนักของปลา โดยใช้อุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก Arduino load cell ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแจ้งเตือนเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการผลิต การทดสอบจะใช้ปลาตากเป็นวัตถุดิบและใช้อุณหภูมิระหว่าง 50-60 °C โดยแบ่งการทดสอบวิธีการผลิต 3 รูปแบบ จากการทดสอบ พบว่า การตากแบบธรรมชาติ ใช้ระยะเวลาในการผลิต 5 h/ครั้ง ซึ่งการตากโดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ระยะเวลาในการผลิต 3.5 h/ครั้ง และการตากในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับโซลาร์เซลล์ใช้ระยะเวลาในการผลิต 3 h/ครั้ง การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับโซลาร์เซลล์ใช้ระยะเวลาในการผลิตน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีจุดคุ้มทุนมากที่สุด และ Y. Sriudom, A. Tewata, J. Visedmanee [7] ได้ทำการสร้างสร้างโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจำลองในการตากกล้วย และศึกษาผลของความเร็วลม ตำแหน่งช่องทางลมเข้า และช่องทางลมออกที่ส่งผลต่อการลดลงของความชื้น และอัตราการอบแห้งของกล้วยด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยความชื้นเริ่มต้นของกล้วยตากประมาณ 230 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง อบจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย ประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยโรงเรือนที่สร้างขึ้นมีขนาดกว้าง 1.25 เมตร ยาว 1.90 เมตร และ สูง 0.80 เมตร ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตโปร่งแสงเป็นวัสดุหลัก และใช้พัดลมดูดอากาศ ขนาด 6 นิ้ว สำหรับการถ่ายเทอากาศ

โดยแบ่งระดับความเร็วลมออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 1.0 เมตรต่อวินาที (ระดับ 1) และ 1.5 เมตรต่อวินาที (ระดับ 2) จากการทดสอบ พบว่า กรณีช่องทางลมเข้าด้านล่าง ช่องทางลมออกอยู่บน โดยมีความเร็วลมทางเข้าเฉลี่ย 1.5 เมตรต่อวินาที ทำให้อัตราการลดลงของน้ำหนักเฉลี่ยสูงที่สุด โดยมีอัตราการลดลงของน้ำหนักเฉลี่ยต่อชั่วโมง เท่ากับ 0.157 กิโลกรัมต่อชั่วโมง Al-Juhaimi, F. [8] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ปริมาณน้ำมัน และคุณสมบัติทางชีวภาพของส่วนต่างๆ ของผลอะโวคาโดพันธุ์ "Fuerte" (FAF) ทั้งระยะดิบ (สีเขียว) และระยะสุก โดยผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศ ไมโครเวฟ และตู้อบ ผลการศึกษาพบว่า เนื้อของผลดิบที่อบแห้งด้วยอากาศมีปริมาณน้ำมันสูงกว่า (76.84%) เมื่อเทียบกับเนื้อของผลสุกที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟซึ่งมีปริมาณน้ำมันอยู่ที่ 70.87% นอกจากนี้ยังมีการประเมินปริมาณน้ำมันในส่วนเปลือกและเมล็ดของ FAF อีกด้วย กรดโอเลอิก ปาล์มติก และไลโนเลอิก เป็นกรดไขมันหลักที่พบในเนื้อ และเปลือกของ FAF โดยปริมาณกรดโอเลอิกในเนื้อผลดิบและผลสุกอยู่ที่ 71.07% และ 72.85% ตามลำดับ สำหรับสาร catechin ในเนื้อผลดิบและผลสุกนั้น พบในปริมาณสูงที่ 190.51 และ 195.45 มก./100 กรัม ในตัวอย่างสด ตามลำดับ ผลการศึกษาเกี่ยวกับสารประกอบฟีนอลิก อื่นๆ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระยังพบว่า มีความแตกต่างกันไปตามระยะความสุก วิธีการอบแห้ง โดยตรวจพบสาร Dihydroxybenzene ในปริมาณสูงสุดในเปลือกผลสุกที่อบแห้งด้วยอากาศ และเมล็ดผลดิบสด เท่ากับ 234.74 มก./100 กรัม และ 227.18 มก./100 กรัม ตามลำดับ

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า ระบบอบแห้งแบบผสมผสานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ลดระยะเวลาในการอบแห้ง โดยสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้สูงถึง ประมาณ 70% และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่าระบบทั่วไป [9]

นอกจากนี้ ยังมีศักยภาพในการลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ [10] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการศึกษาระบบอบแห้งประเภทนี้อย่างกว้างขวาง แต่ส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นไปที่การทดสอบในพืชชนิดอื่น เช่น ผลไม้ทั่วไป ผัก หรือปลา และเน้นการปรับปรุงองค์ประกอบทางวิศวกรรมของเครื่องอบแห้ง เช่น ระบบถ่ายเทความร้อน การไหลของอากาศ และวัสดุสะสมความร้อน

ดังนั้น จะเห็นได้ว่ายังมีข้อจำกัดและช่องว่างขององค์ความรู้ในหลายประเด็น ได้แก่ (1) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอบแห้งแบบผสมผสานกับอะโวคาโดพันธุ์พื้นเมือง ซึ่งมีลักษณะเฉพาะด้านโครงสร้างเนื้อและปริมาณไขมันสูง (2) การออกแบบระบบอบแห้งที่เหมาะสมกับบริบทของเกษตรกรระดับชุมชน (3) การประเมินประสิทธิภาพของระบบอย่างเป็นรูปธรรม

จากช่องว่างดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งอะโวคาโดพันธุ์พื้นเมือง ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของระบบอบแห้งในด้านอุณหภูมิ การลดความชื้น และระยะเวลาในการอบแห้ง รวมไปถึงศึกษาศักยภาพของการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในการลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว และเพิ่มมูลค่าของอะโวคาโดในระดับชุมชน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่ใช้สำหรับการอบแห้ง

2.1.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ปัจจุบันมีการยอมรับการใช้งาน 3 ลักษณะ คือ

1) การอบแห้งระบบพาสซีฟ (Passive) คือ ระบบการอบแห้งที่ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ร่วมกับ

กระแสลมธรรมชาติ โดยไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าหรืออุปกรณ์กลไก ในการหมุนเวียนอากาศ

2) การอบแห้งระบบแอคทีฟ (Active) คือ ระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอุปกรณ์ช่วยหมุนเวียนอากาศ เช่น พัดลม เพื่อบังคับทิศทางลมให้ผ่านแผงรับแสงอาทิตย์และผลิตภัณฑ์

3) การอบแห้งระบบไฮบริด (Hybrid) คือระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ช่วยในเวลาที่แสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอ เช่น ใช้ร่วมกับพลังงานเชื้อเพลิงจากชีวมวล พลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ

2.1.2 หลักการวัดความชื้นในวัสดุ [11] โดยการคำนวณความชื้นแบบมาตรฐานเปียก คำนวณได้จากสมการที่ (1)

1) ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{w-d}{w} * 100 \quad (1)$$

โดยที่

M_w = ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)

w = มวลเปียกของวัสดุ (kg)

d = มวลแห้งของวัสดุ (kg)

2) อัตราการอบแห้ง คำนวณได้จาก สมการที่ (2)

$$\text{Drying rate} \quad \frac{dX}{dt} = \frac{X_0 - X}{t - t_0} \quad (2)$$

โดยที่

$X_0 - X$ = ค่าความเปลี่ยนแปลงของความชื้น (kg)

$t - t_0$ = ค่าความเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลา (h)

3) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง (Thermal efficiency) [12] คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\eta_{th} = \frac{(m_i - m_f) * h_{fg}}{(A_c * I * t) + E_{heater}} * 100 \quad (3)$$

โดยที่

η_{th} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)

m_i = มวลวัสดุก่อนการอบแห้ง (kg)

m_f = มวลวัสดุหลังการอบแห้ง (kg)

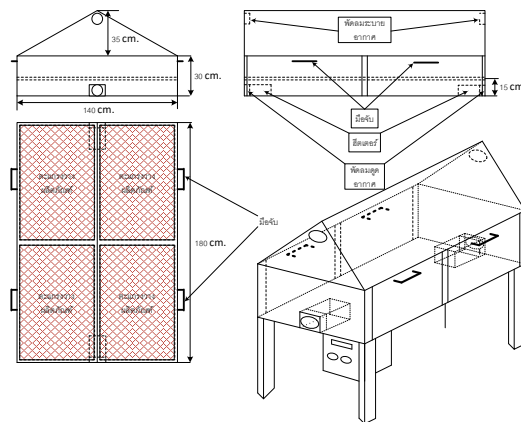
h_{fg} = ค่าความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ (KW-h/kg)

A_c = พื้นที่โรงเรือนที่รับรังสีอาทิตย์ (m²)

I = ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบโรงเรือน (W/m²)

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

E_{heater} = พลังงานที่ใช้กับฮีตเตอร์อินฟราเรด (kW-h)



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

2.2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า โดยมีเงื่อนไขเบื้องต้นในการออกแบบ ดังนี้

1) อะโวคาโดพันธุ์พื้นเมืองที่ใช้ในการอบแห้งครั้งละ 5 kg ความชื้นเริ่มต้นของอะโวคาโดประมาณ 84.7 (% w.b.) และ ความชื้นสุดท้ายของ อะโวคาโดประมาณ 10 (% w.b.)

2) ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า เป็นแหล่งพลังงานความร้อน

3) รูปแบบเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบ ลักษณะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเครื่องอบแห้งวางทำมุมรับแสงที่ 18° หันหน้าไปทางทิศใต้

2.2.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ

1) อะโวคาโดพันธุ์พื้นเมือง

2) เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ ยี่ห้อ SPM-1116SD ช่วงการวัด 0.0 ถึง 2,000.0 W/m² ความแม่นยำ ± 10 W/m²

3) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ Wisco รุ่น DL 2200 ขนาด 8 ช่องสัญญาณ และ ตัวขยายสัญญาณ Analog Expansion Module EX2 4 ขนาด 16 ช่องสัญญาณ มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -250 °C ถึง 1,300 °C มีความแม่นยำ ± 0.1 °C

4) เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น SF-400A ขนาด 0 – 7,000 g ความละเอียด 0.1 กรัม ความแม่นยำ ± 0.2%

2.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ลานนา ตาก ระหว่างวันที่ 7 – 9 มีนาคม 2568 โดยมี ขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ และ อุปกรณ์ในการตรวจวัดเข้ากับชุดทดสอบทั้ง 3 ชุด ดัง แสดงในรูปที่ 2 โดยทำการบันทึกอุณหภูมิอุณหภูมิ ความเข้มแสง ทุก ๆ 10 วินาที ด้วยเครื่องวัดความเข้ม แสงอาทิตย์ และ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เพื่อนำมาใช้ คำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน และ ชั่งน้ำหนัก ผลิตรัณฑ์ทุก ๆ 1 ชม. โดยนำอะโวคาโดในตู้อบแห้ง ออกมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแล้วนำกลับเข้า ตู้อบแห้ง โดยจะควบคุมเวลาในการชั่งน้ำหนักไม่เกิน 1 นาทีต่อครั้ง เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้น มาตรฐานเปียก และอัตราการอบแห้ง เริ่มบันทึกข้อมูล ตั้งแต่เวลา 8.00 น. เป็นต้นไป จนกระทั่งผลิตรัณฑ์แห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้าย และนำข้อมูลที่ได้มาใช้สำหรับ วิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

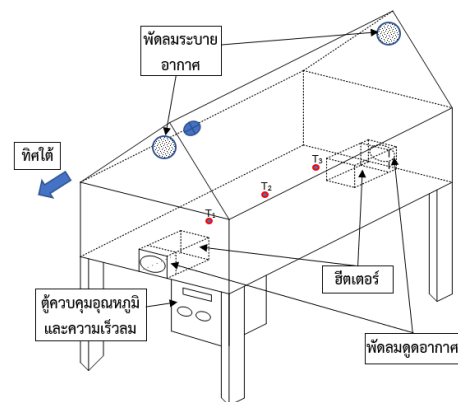
2) การเตรียมอะโวคาโด สำหรับอบแห้ง โดยนำ ผลอะโวคาโดที่มีอายุ ตั้งแต่ 6 เดือนขึ้นไป แต่ไม่เกิน 8 เดือน จำนวน 5 กิโลกรัม มาหั่นบางตามแนวยางของผล โดยหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร แล้วนำผลอะโวคาโดที่หั่น แล้วไปจัดวางให้เต็มถาด โดยไม่ให้อะโวคาโดซ้อนทับกัน ซึ่งการทดสอบอบแห้งจะทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ

3) ระบบระบายความชื้นของห้องอบแห้งได้รับการออกแบบโดยติดตั้งพัดลมระบายอากาศ ขนาด 21 วัตต์ ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ โดย ความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 3.9 เมตร/วินาที ทำหน้าที่ระบาย อากาศขึ้นออกจากห้องอบแห้งอย่างต่อเนื่องตลอด ระยะเวลาการทำงาน เพื่อควบคุมปริมาณความชื้น สัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งโดยการถ่ายเทมวลของไอน้ำจาก ผลิตรัณฑ์สู่บรรยากาศภายนอก สำหรับการควบคุม อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ใช้ฮีตเตอร์ ขนาด 2,000 วัตต์ จำนวน 2 ตัว เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อน

เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในระบบ โดยการทำงานของฮีตเตอร์ จะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ซึ่งจะสั่งการให้ฮีตเตอร์ ทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ และหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้

4) คำนวณหาปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก และอัตราการอบแห้ง ตามสมการที่ (1) – (2)

5) คำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ระบบอบแห้ง (Thermal efficiency) ตามสมการที่ (3)



● ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ

● ตำแหน่งในการวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

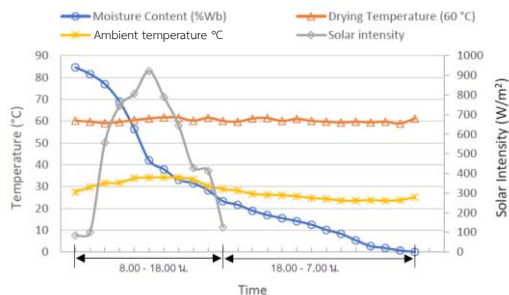
รูปที่ 2 ตำแหน่งอุปกรณ์ และจุดตรวจวัดอุณหภูมิภายใน ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบอบแห้งอะโวคาโดด้วยตู้อบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า โดยควบคุม อุณหภูมิที่ 60 °C แสดงดังรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 พบว่า ปริมาณความชื้นของอะโวคาโด ลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการอบแห้ง โดย มีความชื้นเริ่มต้น 84.7 (% w.b.) และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง โดยเฉพาะ ในช่วงเวลา 11.00–13.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้ม รังสีแสงอาทิตย์สูง อยู่ในช่วง 745–921 W/m² โดย

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุด มีค่าเท่ากับ 921.3 W/m^2 โดยอุณหภูมิภายในตู้อบ มีค่า $59.3 - 61.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $60.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึงแม้ว่าจะไม่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ แต่ระบบยังสามารถรักษาอุณหภูมิการอบแห้งไว้ใกล้เคียง $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้ จากการใช้อีทีเตอร์เป็นตัวช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ส่งผลให้ความชื้นของอะโวคาโดยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์รวมทั้งสิ้น 24.1 ชั่วโมง

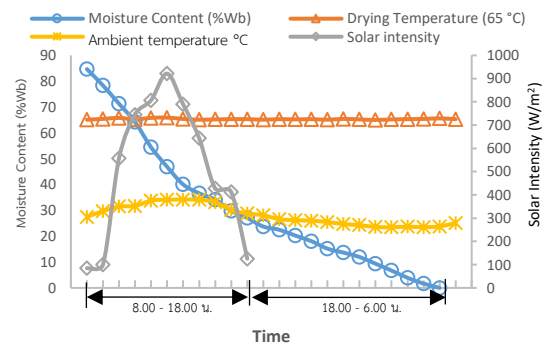


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของอะโวคาโด (Moisture Content, % w.b.) อุณหภูมิการอบแห้งที่กำหนด $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (Solar intensity) ตลอดช่วงเวลากการอบแห้ง

3.2 ผลการทดสอบอบแห้งอะโวคาโดด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า โดยควบคุมอุณหภูมิที่ $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงดังรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่า ปริมาณความชื้นของอะโวคาโด ลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการอบแห้ง โดยเริ่มต้นมีความชื้นเริ่มต้น $84.7 \text{ (}\% \text{ w.b.)}$ และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากมีปริมาณน้ำอิสระภายในเนื้อวัสดุสูง โดยเฉพาะในช่วงเวลา $11.00-13.00$ น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูง อยู่ในช่วง $745-921 \text{ W/m}^2$ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุด มีค่าเท่ากับ 921.3 W/m^2 หลังจากนั้น อัตราการลดลงของความชื้นเริ่มชะลอตัวลง

โดยอุณหภูมิภายในตู้อบอยู่ระหว่าง $65.1 - 65.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $65.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึงแม้ว่าจะไม่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ แต่ระบบยังสามารถรักษาอุณหภูมิการอบแห้งไว้ใกล้เคียง $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้ จากการใช้อีทีเตอร์เป็นตัวช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ส่งผลให้ความชื้นของอะโวคาโดยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์รวมทั้งสิ้น 22.8 ชั่วโมง

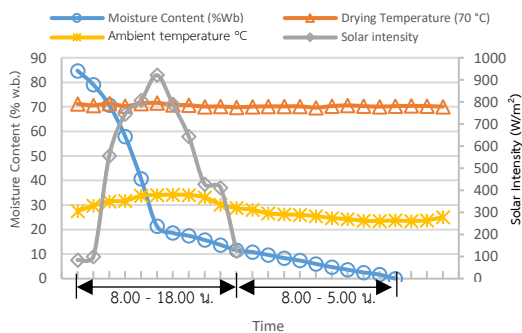


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของอะโวคาโด (Moisture Content, % w.b.) อุณหภูมิการอบแห้งที่กำหนด $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (Solar intensity) ตลอดช่วงเวลากการอบแห้ง

3.3 ผลการทดสอบอบแห้งอะโวคาโดด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า โดยควบคุมอุณหภูมิที่ $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 พบว่า ปริมาณความชื้นของอะโวคาโดลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการอบแห้ง โดยเริ่มต้นมีความชื้นเริ่มต้น $84.7 \text{ (}\% \text{ w.b.)}$ และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากมีปริมาณน้ำอิสระภายในเนื้อวัสดุสูง โดยเฉพาะในช่วงเวลา $11.00-13.00$ น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูง อยู่ในช่วง $745 - 921 \text{ W/m}^2$ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุด มีค่าเท่ากับ 921.3 W/m^2 หลังจากนั้น อัตราการลดลงของความชื้นเริ่มชะลอตัวลง โดยใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์รวมทั้งสิ้น 21.9 ชั่วโมง

นอกจากนี้อุณหภูมิแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของวัน โดยอยู่ในช่วง 23.5 – 34.7 °C แต่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิการอบแห้งภายในระบบ



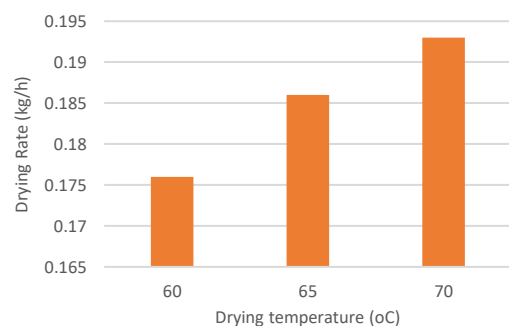
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของอะโวคาโด (Moisture Content, % w.b.) อุณหภูมิการอบแห้งที่กำหนด 70 °C อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (Solar intensity) ตลอดช่วงเวลาการอบแห้ง

จากรูปที่ 3-5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของอะโวคาโด อุณหภูมิการอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ภายใต้ อุณหภูมิการอบแห้ง 60°C, 65°C และ 70°C พบว่า ปริมาณความชื้นของอะโวคาโดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการอบแห้ง โดยในช่วงแรก ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นการระเหยของน้ำอิสระที่อยู่บริเวณผิวและช่องว่างภายในเนื้ออะโวคาโด จากนั้นอัตราการลดความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อปริมาณน้ำภายในผลิตภัณฑ์เหลือน้อยลง ซึ่งเป็นลักษณะของช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ที่การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ของความชื้นจากภายในเนื้ออะโวคาโดออกสู่ผิวหน้า นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจาก 60°C เป็น 65°C และ 70°C พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงจาก 24.10 ชั่วโมง เป็น 22.80 ชั่วโมง และ 21.90 ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงให้

เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและการระเหยของความชื้น ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น ถึงแม้ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาการทดลอง แต่ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสามารถรักษาอุณหภูมิการอบแห้งให้อยู่ในระดับที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การลดลงของความชื้นเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 70°C ซึ่งให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด

3.4 ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งอะโวคาโดด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 6

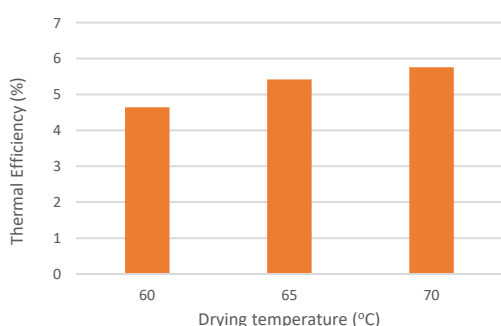
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) และ อุณหภูมิการอบแห้ง (Drying Temperature) พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 60°C เป็น 70°C อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อุณหภูมิ 60°C 65°C และ 70°C มีอัตราการอบแห้ง 0.176 kg/h 0.186 kg/h และ 0.193 kg/h ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ความชื้นภายในอะโวคาโดถูกกำจัดได้รวดเร็วขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิ 70°C จึงเป็นสถานะที่ให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดในการทดลองนี้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) และ อุณหภูมิการอบแห้ง (Drying Temperature)

3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) แสดงดังรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) และ อุณหภูมิการอบแห้ง (Drying Temperature) พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 60°C เป็น 70°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อุณหภูมิ 60°C มี ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 4.55% ขณะที่อุณหภูมิ 65°C และ 70°C มีค่าประมาณ 5.31% และ 5.65% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิช่วยให้ พลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบถูกนำไปใช้ในการ ระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 70°C เป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพ เชิงความร้อนสูงสุดในช่วงการศึกษานี้ เนื่องจากสามารถ ถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่า ทำให้อัตราการ ระเหยความชื้นสูงขึ้น



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) และ อุณหภูมิการอบแห้ง (Drying Temperature)

3.5 อภิปรายผลการศึกษา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ได้แก่ [15] [16] [17] และ [9] ร่วมกับงานวิจัยของผู้วิจัย พบว่า งาน ของ [15] แสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบผสมผสาน สามารถลดระยะเวลาในการอบ และเพิ่มความ

เสถียรภาพของอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่สามารถลดความชื้นของอะโว คาโดจาก 84.7% เหลือประมาณ 10% ภายในเวลา 21.9–24.1 ชั่วโมง พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิได้อย่าง คงที่ตลอด 24 ชั่วโมง ขณะที่ [16] ได้อธิบายเชิงทฤษฎี ว่าระบบ Hybrid มีข้อได้เปรียบด้านการทำงานต่อเนื่อง และการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน ซึ่งสนับสนุนผลการ ทดลองของงานนี้โดยตรง ในส่วนของ [17] ซึ่งใช้แหล่ง ความร้อนเสริมจากระบบแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า สามารถรักษาอุณหภูมิในช่วงไม่มีแสงอาทิตย์ได้ เช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ใช้ฮีตเตอร์ ไฟฟ้าซึ่งให้ความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ แม่นยำและเสถียรมากกว่า ขณะที่ [9] ซึ่งเป็นการศึกษา ทดลองจริงในผลิตภัณฑ์ปลา พบว่าระบบ Hybrid สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้มากที่สุดเมื่อ เปรียบเทียบกับวิธีอื่น ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลของ งานวิจัยนี้เช่นกัน โดยสรุป งานวิจัยของผู้วิจัยมีความ สอดคล้องกับทั้งเชิงทฤษฎีและเชิงทดลองของงานวิจัย ก่อนหน้าในด้านการใช้พลังงานผสมเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพและความต่อเนื่องของกระบวนการอบแห้ง ขณะเดียวกันยังแสดงจุดเด่นในด้านการควบคุมอุณหภูมิ ที่แม่นยำ อีกทั้งการประยุกต์ใช้กับอะโวคาโดพันธุ์ พันธ์เมืองยังมีการศึกษาในวรรณกรรมค่อนข้างจำกัด

4. สรุป

ผลการศึกษาการพัฒนาเครื่องอบแห้งอะโวคาโด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า พบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมและรักษาอุณหภูมิการ อบแห้งในช่วง 60 – 70 °C ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยม ีการกระจายความร้อนภายในตู้อบอย่างสม่ำเสมอ ส่งผล ให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนและการระเหยความชื้น มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ระบบสามารถรักษาอุณหภูมิที่ กำหนดไว้ที่ 60°C 65°C และ 70°C ได้แม้ในช่วงที่ไม่มี แสงอาทิตย์ ในด้านการอบแห้งอะโวคาโดที่มีความชื้น

เริ่มต้นเฉลี่ย 84.7% (w.b.) จนเหลือความชื้นสุดท้าย 10 (% w.b.) พบว่า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C 65°C และ 70°C มีค่าเท่ากับ 24.1 22.8 และ 21.9 ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ช่วยเพิ่มอัตราการระเหยความชื้นและลดระยะเวลาในการอบแห้ง นอกจากนี้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้ง โดยมีค่าเท่ากับ 4.55% 5.31% และ 5.65% ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ให้ประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการทดลอง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนงบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำหรับทุนสนับสนุนงานพื้นฐาน (Fundamental Fund, FF) และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก ที่เอื้อเฟื้อพื้นที่ในการทำวิจัย และสนับสนุนอุปกรณ์ รวมไปถึงเครื่องมือสำหรับทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. G. Unar, S. A. Khatri, N. H. Mirjat, P. H. Shaikh, S. A. R. A. Zaidi, and M. F. Arain, "Solar drying technologies: A review of design, efficiency, and environmental impacts," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 226, pp. 126–140, 2025.
- [2] A. Afzal, T. Iqbal, K. Ikram, M. N. Anjum, M. Umair, M. Azam, S. Akram, F. Hussain, M. A. ul Zaman, A. Ali, and F. Majeed, "Development of a hybrid mixed-mode solar dryer for product drying," *Heliyon*, vol. 9, 2023.
- [3] D. Kong, Y. Wang, M. Li, and J. Liang, "A comprehensive review of hybrid solar dryers integrated with auxiliary energy and units for agricultural products," *Energy*, vol. 293, 2024.
- [4] M. Sandali, A. Boubekri, D. Mennouche, and N. Gherraf, "Improvement of a direct solar dryer performance using a geothermal water heat exchanger as supplementary energetic supply. An experimental investigation and simulation study," *Renewable Energy*, vol. 135, vol.1, pp. 186–196, 2019.
- [5] M. Islam, M. I. Islam, M. Tusar, and A. H. Limon, "Effect of cover design on moisture removal rate of a cabinet type solar dryer for food drying application," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 769–776, 2019.
- [6] P. Kotchapoom, "Hybrid Solar Power Dryer with Alarm System," *EAU HERITAGE JOURNAL Science and Technology*, vol 16, no.1, pp. 175 – 188, 2022.
- [7] Y. Sriudom, A. Tewata, J. Visedmanee, "Greenhouse Effect Solar Dryer for Banana," *Rattanakosin Journal of Science and Technology*, vol 7, no. 3, pp. 222–235, 2025.
- [8] F. Al. Juhaimi, N. Uslu, M. M. Ozcan, E. E. Babiker, K. Ghafoor, I. M. Ahmed, and O. N. Alsawmahi, "Effects of drying process on oil quality, the bioactive properties and phytochemical characteristics of avocado (Fuerte) fruits harvested at two different

- maturity stages,” *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 45, 2021.
- [9] F. L. Rashid, K. A. Hammoodi, N. M. L. Al Maimuri, M. K. Abdalrahem, A. M. Ashour, A. Bouabidi, S. A. Kadhim, Y. Aryanfar, and A. Chibani, “Recent advancements in hybrid solar dryer: A comprehensive review of integration strategies, performance enhancements, and applications,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 171, 2026.
- [10] C. K. Saha, N. K. Roy, J. Khatun, N. Tasnim, and M. S. Alam, “Solar hybrid dryers for fruits, vegetables, and fish: A comprehensive review on constructional features and techno-economic-environmental analysis,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 68, 2024.
- [11] Y. Sriudom, A. Tewata, and S. Sappaso , “An Experimental Study of Solar Chili Dryer with Volcanic Rock Thermal Storage,” *Rattanakosin Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 21 – 33, 2024.
- [12] A. Tewata, and Y. Sriudom, “An Experimental Study on Increasing Efficiency of Solar Cell Modules by Flat Heat Pipe Cooling,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 83 -94, 2018.
- [13] Y. Sriudom, A. Tewata, S. Sappaso and N. Pratumchai, “An Experimental Study of Solar Panel Efficiency with Water Cooling,” *RMUTP Research Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 1-13, 2021.
- [14] A. E. Elwakeel, M. A. Gameh, A. S. Eissa, and M. B. Mostafa, “Recent advances in solar drying technology for tomato fruits: A comprehensive review,” *International Journal of Applied Energy Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 37–44, 2024.
- [15] A. E. Elwakeel, D. E. M. Wapet, W. A. El. Mahmoud, S. E. Abdallah, M. M. Mahmoud, S. A. El. M. Adjourn, and A. A. Tantawy, “Design and implementation of a PV-integrated solar dryer based on internet of things and date fruit quality monitoring and control,” *International Journal of Energy Research*, vol. 47, pp 15023 – 15040, 2023.
- [16] A. Afzal, T. Iqbal, K. Ikram, M. N. Anjum, M. Umair, M. Azam, S. Akram, F. Hussain, M. A. ul Zaman, A. Ali, and F. Majeed, “Development of a hybrid mixed-mode solar dryer for product drying,” *Heliyon*, vol. 9, no. 3, 2023.
- [17] D. Kong, Y. Wang, M. Li, and J. Liang, “A comprehensive review of hybrid solar dryers integrated with auxiliary energy and units for agricultural products,” *Energy*, vol. 293, 2024