

การศึกษาผลของพารามิเตอร์ควบคุมต่อสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดโกโก้ ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

Studying Control Parameters Effects on Performance of Drying Cocoa Bean with Heat Pump Dryer

จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล อนูรัตน์ เทวตา อภิรักษ์ ชัดวิลาส เจษฎา วิเศษมณี และ ไพโรจน์ จันทร์แก้ว*

Chakkraphan Thawonngamyingsakul Anurat Tevata Aphirak Khadwilard

Jedsada Visedmanee and Phairoach Chunkaew*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ประเทศไทย

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Thailand

*E-mail: phairoac@rmutl.ac.th Tel. (+66)867324742

(Received 01/09/2024, Revised 07/05/2025, Accepted 28/06/2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ควบคุมต่อสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ซึ่งอัตราการอบแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ และคุณภาพด้านสีถูกวิเคราะห์สำหรับช่วงที่สมรรถนะการอบแห้งเมล็ดโกโก้ พารามิเตอร์ควบคุมประกอบด้วย อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C และความเร็วลม 1.5, 3.5 และ 5.5 m/s โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กซึ่งควบคุมระบบอากาศแบบปิดโดยใช้อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60% วัตถุดิบใช้เมล็ดโกโก้ที่ผ่านกระบวนการหมักจำนวน 1 กิโลกรัม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น $142.42 \pm 0.52\%$ (มาตรฐานแห้ง) และทดสอบจนถึงความชื้นสุดท้าย $6.09 \pm 0.56\%$ (มาตรฐานแห้ง) ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้ง และสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้น แต่อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะลดลง และกรณีสภาวะความเร็วคงที่จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิพบว่า อัตราการอบแห้ง และสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้น แต่อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะลดลง ส่วนคุณภาพสีเมื่ออุณหภูมิและความเร็วเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลง แต่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น สุดท้ายควรใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 1.5 m/s เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูงสุดและคุณภาพของเมล็ดโกโก้อบแห้งเป็นไปตามความต้องการของกลุ่มอาชีพ

คำสำคัญ: เมล็ดโกโก้ สมรรถนะการอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

Abstract

The objective of this research was to study the effects of controlled parameters on the performance of drying cocoa beans with a heat pump dryer. The drying rate, the coefficient of heat pump performance, the specific moisture extraction rate, and color quality were analyzed to indicate the drying performance of cocoa beans. The controlled parameters included temperatures of 40, 50, and 60 °C and velocities of 1.5, 3.5, and 5.5 m/s using a small heat pump dryer. A closed air system with 60% of the air passing across the evaporator was used in all tests. One kilogram of fermented cocoa beans was used as the raw material. It had an initial moisture content of $142.42 \pm 0.52\%$ (dry basis) and it was dried until the final moisture content of $6.09 \pm 0.56\%$ (dry basis). The results showed that at the same temperature, the drying rate and the coefficient of heat pump performance increased as the velocity increased, but the specific moisture extraction rate

decreased. In the case of constant velocity and then increasing the temperature, the drying rate and the coefficient of heat pump performance increased but the specific moisture extraction rate decreased. For the color quality, when the temperature and velocity increased, it was found that the brightness value (L^*) and yellowness value (b^*) decreased, but the redness value (a^*) increased. Finally, the condition of 40 °C and 1.5 m/s should be used because it gave the highest specific moisture extraction rate and the quality of dried cocoa beans met the needs of professional groups.

Keywords: Cocoa beans, Drying performance, Heat pump dryer

1. บทนำ

จากการลงพื้นที่ปัญหาหนึ่งในขั้นตอนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากโกโก้คือขั้นตอนการลดความชื้นของเมล็ดโกโก้ที่ผ่านขั้นตอนขบวนการหมักซึ่งกลุ่มอาชีพใช้ตากแห้งโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิอบแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศได้ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ด้อยคุณภาพลง คณะผู้วิจัยจึงมีประสบการณ์ด้านเทคโนโลยีการอบแห้งจึงเสนอแนวทางแก้ไขโดยใช้เทคโนโลยีเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ซึ่งขั้นตอนแรกคือการศึกษาลักษณะของพารามิเตอร์ควบคุมต่อสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการสำหรับใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสำหรับกลุ่มอาชีพดังกล่าว

โกโก้เป็นพืชทางเลือกชนิดหนึ่งที่สามารถปลูกเป็นพืชทดแทนและเป็นพืชแซมในสวนผสม เป็นพืชที่ดูแลง่าย เจริญเติบโตเร็ว ทนแล้ง และให้ผลผลิตสูง มีกลิ่นหอมเมื่อแปรรูป และเป็นที่ต้องการของตลาด ผลโกโก้สุก หลังการเก็บเกี่ยว เมล็ดสดยังไม่เป็นช็อกโกแลต เมล็ดจะเปลี่ยนเป็นช็อกโกแลตในระหว่างขั้นตอนการหมักเมล็ดโกโก้ เกษตรกรผู้ปลูกโกโก้จะหมักเมล็ดโกโก้สดแบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดและความต้องการของตลาดหรือผู้บริโภค Laongsri (2020) ได้แนะนำในคู่มือองค์ความรู้เรื่องโกโก้ว่าการหมักเมล็ดโกโก้สดใช้เวลา 6 วัน โดยทำการกลับกองเมล็ดโกโก้ในวันที่ 2 และวันที่ 4 ของการหมัก สำหรับให้จุลินทรีย์ทำหน้าที่ทั่วถึงทั้งหมดในกระบวนการหมัก จากนั้นตากแดดจนเหลือความชื้นในเมล็ด 5–7 % แห่งสัปดาห์แล้ว สามารถเก็บรักษาและรอจำหน่ายสามารถเก็บได้นานนับปี ระยะเวลาในการทำให้เมล็ดโกโก้แห้งจะมีผลต่อรสชาติและคุณภาพของเมล็ดโกโก้แห้งมาก หากเมล็ดโกโก้แห้งช้า อาจเกิดเชื้อราแทรกเข้าในเมล็ด ทำให้รสชาติโกโก้เปลี่ยนไปได้ การตากแดดเหมาะสำหรับประเทศที่มีการเก็บเกี่ยวโกโก้ในฤดูแล้ง การตากเมล็ดโกโก้จากบนลานดินหรือลานซีเมนต์รองด้วยพลาสติก หรือตากบนแคร่ไม้หรือตะแกรงพลาสติกยกสูงจากพื้น และมีหลังคาพลาสติกคลุม การตากแห้งโดยวิธีนี้ใช้เวลาประมาณ 7 วัน Hii et al. (2006) ทำการวิจัยปริมาณการอบแห้งเมล็ดโกโก้ที่แตกต่างกัน คือ 20, 30 และ 60 กิโลกรัม ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พบว่าใช้ เวลา 5, 7.5 และ 9.5 วัน ตามลำดับ ส่วนเครื่องอบแห้งกรณีประยุกต์ใช้ระดับวิสาหกิจชุมชน ส่วนใหญ่จะลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงโดยการใช้อุปกรณ์อบแห้งชีวมวล (Chunkaew et al., 2024; Khadwilard et al., 2024) ส่วนกรณีกลุ่มผู้ปลูกรายใหญ่ที่ต้องเก็บเกี่ยวโกโก้ในฤดูฝน ซึ่งมีฝนตกชุกและทำการตากแดดได้ยาก จึงใช้เตาอบเพื่ออบเมล็ดโกโก้ให้แห้ง โดยที่นิยมใช้มี 2 แบบได้แก่ (1) เตาอบชนิดไม่ใช้พัดลม ได้แก่ เตาอบแบบชามัว ซึ่งเตาอบที่ใช้ระบบส่งผ่านความร้อนโดยด้านล่างของเตาสร้างด้วยท่อเหล็กสำหรับใส่เชื้อเพลิงและมีปล่องระบายควันทางด้านหลัง เตาอบชนิดนี้ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 2 วัน ที่อุณหภูมิ 60–80 °C โดยระยะเวลาในการอบแห้งจะช้าหรือเร็ว ขึ้นอยู่กับความหนาของเมล็ดโกโก้ในถาดอบด้วย (2) เตาอบชนิดใช้พัดลมมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบชามัว เนื่องจากมีพัดลมเป่าร้อนเข้าสู่ถาดได้ทั่วถึง (Horticultural Research Institute, 2021)

เทคโนโลยีเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่มีข้อดีคือ มีสมรรถนะสูง สามารถอบแห้งในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ใช้ระบบอากาศแบบปิด (Achariyaviriya et al., 2005) เนื่องจากมีเครื่องทำระเหยดึงน้ำออกจากอากาศ ขณะเดียวกัน สามารถนำความร้อนคืนกลับเข้ามาในระบบปั๊มความร้อน ข้อเสียคือ ไม่สามารถใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง ซึ่งจากบทความเผยแพร่ที่ใช้ระบบปั๊มความร้อนอย่างเดียว โดยไม่มีขดลวดความร้อนช่วยเสริม สามารถอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสุด 60 °C โดยใช้ระบบอากาศหมุนวนแบบปิด (Chunkaew, 2021; Guan et al., 2025) ส่วนกรณีการเปรียบเทียบการอบแห้งในมะกรุตที่อุณหภูมิเดียวกัน

เครื่องอบแห้งแบบขดลวดความร้อน มีการใช้พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะมากกว่าเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (Sanpang et al., 2022) นอกจากนี้ มีบทความที่เผยแพร่เกี่ยวกับการอบแห้งเมล็ดโกโก้ โดยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนเสริมด้วยขดลวดความร้อน ซึ่งอบแห้งที่อุณหภูมิ 56 °C ใช้เวลา 26 ชั่วโมง (Hii et al., 2013) และ ทดสอบการอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยเทคโนโลยีปั๊มความร้อน พบว่า เมื่อความชื้นเมล็ดโกโก้ลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงเมล็ดโกโก้เพิ่มขึ้น (Hii et al., 2012) จากบทความของ Herman et al. (2018) ทดสอบอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยระบบลมร้อนภายใต้สภาวะ (อุณหภูมิ, ความเร็วลม) ดังนี้: 30 °C, 0.6 m/s; 40 °C, 0.6 m/s; 50 °C, 0.6 m/s; 60 °C, 0.3 m/s; 60 °C, 0.6 m/s; และ 60 °C, 1 m/s พบว่า ใช้เวลาในการอบแห้ง 40.5, 35.8, 25.5, 20.8, 20.8 และ 20.8 ชั่วโมง ตามลำดับ และจากงานวิจัยการอบแห้งเมล็ดโกโก้แบบลมร้อน (Chungsiriporn et al., 2023) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 50, 60, 70 และ 80 °C และความเร็วลมที่ 0.05, 0.067, 0.085 และ 0.1 m/s ผลการทดลองพบว่า ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้ง โดยใช้เวลาและมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และใช้ความเร็วลม 0.1 m/s

ด้วยปัญหาฤดูกาลของประเทศไทย ฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูแล้ง ส่งผลให้บางช่วงเวลาไม่สามารถตากเมล็ดโกโก้ได้ จึงเป็นปัญหาของเกษตรกรที่ปลูกโกโก้ เนื่องจากแสงแดดที่อ่อนลงในวันที่ฝนตกหรือมีเมฆมาก ทำให้ไม่สามารถตากเมล็ดโกโก้ได้ตามที่ตั้งไว้ ซึ่งจากการลงสำรวจพื้นที่กลุ่มอาชีพแปรรูปผลิตภัณฑ์โกโก้ จังหวัดตาก พบว่ามีความต้องการแก้ปัญหาในส่วนนี้ และจากการลงพื้นที่สอบถามผู้ประกอบการกลุ่มอาชีพแปรรูปผลิตภัณฑ์โกโก้ ตำบลชะเนงือ อำเภอแม่ระมาด จังหวัดตาก เกี่ยวกับข้อมูลเกี่ยวกับการใช้พาราโบลาโดม พบว่า เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์สูงส่งผลให้อุณหภูมิในพาราโบลาโดมสูงเกินไป ซึ่งส่งผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์โกโก้ต่ำลงเช่นกัน เทคนิคการอบแห้งด้วยเทคโนโลยีปั๊มความร้อนที่มีจุดเด่นคือ สามารถอบแห้งเป็นระบบปิด ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งต่ำ เนื่องจากน้ำในอากาศถูกดึงออกที่เครื่องทำระเหย อีกทั้งมีสมรรถนะสูง และสามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบอัดไอมาดัดแปลงใช้งานได้

ดังนั้นบทความนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ควบคุมต่อสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน สำหรับเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสำหรับกลุ่มอาชีพแปรรูปผลิตภัณฑ์โกโก้ จังหวัดตาก

2. วิธีการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

Figure 1 แสดงภาพเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กผนังชุดด้วยฉนวนใยแก้ว ซึ่งพัฒนาจาก Chunkaew (2021) โดยถอดวาล์วไฟฟ้าในระบบปั๊มความร้อนที่ติดตั้งอยู่ก่อนสิ้นลวดความดันออก เพื่อแก้ปัญหาวาล์วไฟฟ้าไม่ทำงาน ซึ่งส่งผลให้ความดันด้านสูงสูงขึ้นและเครื่องอัดทำงานหนัก นอกจากนี้ ได้เปลี่ยนโบลเวอร์ให้สามารถลดความเร็วรอบลงได้ โดยการปรับความถี่จากอินเวอร์เตอร์ ระบบปั๊มความร้อนใช้เครื่องอัดแบบหุ้มปิด ยี่ห้อ Kultorn AE1360Y ขนาด 497 W โดยเครื่องควบแน่นสามารถถ่ายเทความร้อนได้ 1,800 W และเครื่องทำระเหยสามารถถ่ายเทความร้อนได้ 1,300 W ซึ่งเป็นอุปกรณ์ของรถยนต์ หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน คือ เมื่อเปิดให้ระบบปั๊มความร้อนทำงาน เครื่องควบแน่นถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศตามที่ตั้งอุณหภูมิไว้ ความร้อนในอากาศถ่ายเทไปยังวัสดุอบแห้ง ส่งผลให้น้ำในเมล็ดโกโก้ระเหยเป็นไอ และอุณหภูมิที่ออกจากห้องอบแห้งลดลง แต่อัตราน้ำในอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น อากาศที่ออกจากห้องอบแห้งจะผ่านเครื่องทำระเหย 40% (และอากาศ 60% ถูกบาสฟาสข้ามเครื่องทำระเหย) ทำให้อากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยมีอุณหภูมิลดลง ส่งผลให้อากาศที่ปนอยู่กระทบต่อเย็นของเครื่องทำระเหยควบแน่นกลายเป็นของเหลว และถูกนำออกไปทิ้งด้านนอกของเครื่องอบแห้ง เหตุผลที่อากาศถูกบาสฟาสข้ามเครื่องทำระเหย เนื่องจากปริมาณความร้อนที่อยู่ในอากาศออกจากห้องอบแห้งมีจำนวนมาก หากไม่บาสฟาส น้ำที่อยู่ในสถานะไอในอากาศร้อน จะไม่สามารถกลั่นตัวเป็นสถานะของเหลวที่เครื่องทำระเหยได้ สุดท้ายเมื่อน้ำที่ผิววัสดุอบแห้งลดลง น้ำที่อยู่ด้านในวัสดุอบแห้งจะซึมออกมาสู่ผิววัสดุอบแห้ง ส่วนอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ TOHO รุ่น TTM-004 เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์เครื่องอัดให้หยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ควบคุม

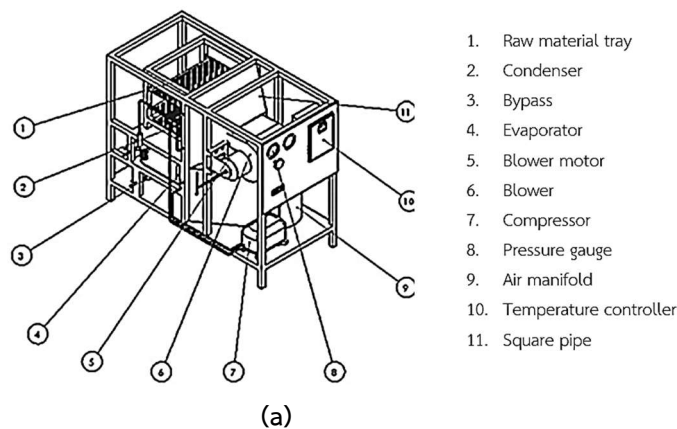


Figure 1 Small heat pump dryer for testing: (a) Pre-renovated heat pump dryer (adapted from Chunkaew, 2021); (b) Renovated heat pump dryer.

2.2 ตัวแปรที่ศึกษา

ประกอบด้วยความเร็วลม 1.5, 3.5 และ 5.5 m/s และอุณหภูมิที่ 40, 50 และ 60 °C การควบคุมช่วงของค่าตัวแปรค่อนข้างสูงเนื่องจากต้องการเห็นความแตกต่างของสมรรถนะ ค่าสูงสุดของความเร็วและอุณหภูมิที่เลือกใช้เป็นขีดจำกัดสูงสุดที่เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสำหรับใช้ทดสอบที่สามารถทำได้

2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

Figure 2 แสดงปริมาณเมล็ดโกโก้ที่ผ่านกระบวนการหมักใช้เวลา 6 วัน ครั้งละ 1000 กรัม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 119.97–165.56% (มาตรฐานแห้ง) ซึ่งในแต่ละการทดสอบทำการควบคุมสภาวะการอบแห้งจนความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 7% (มาตรฐานแห้ง) (Laongsri, 2020)



Figure 2 Fermented cocoa beans (1,000 g) prepared for testing.

2.4 เครื่องมือตรวจวัดสำหรับเก็บข้อมูล

- (1) เครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ LG รุ่น CN1530 ชั่งได้มากที่สุด 3 kg ความละเอียด 0.1 g
- (2) เครื่องวัดอุณหภูมิรุ่น TM-1947SD สามารถวัดอุณหภูมิได้ 4 ช่อง ความละเอียด 0.1 °C และสามารถบันทึกข้อมูลระหว่างการทดลองได้
- (3) เครื่องวัดความชื้นอากาศยี่ห้อ UNI-T รุ่น U333S ความละเอียด 0.1%RH (ช่วงอุณหภูมิวัด -10 ถึง 60 °C)
- (4) เครื่องวัดกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh meter) ระดับความแม่นยำ: $\pm 2\%$
- (5) เครื่องวัดความเร็วรุ่น AMF028 ความละเอียด 0.1 m/s ระดับความแม่นยำ: $\pm 3\%$
- (6) เครื่องวัดสียี่ห้อ Linshang รุ่น LS170

2.5 ขั้นตอนการทดสอบและเก็บข้อมูล

2.5.1 การเตรียมเมล็ดโกโก้

นำเมล็ดโกโก้ที่ผ่านการหมักจำนวน 1,000 g มาเรียงในถาดทั้ง 3 ถาด โดยใช้เมล็ดโกโก้ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และจัดวางบนถาดโดยไม่ให้เมล็ดโกโก้ทับซ้อนกัน เพื่อให้เมล็ดโกโก้สัมผัสกับอากาศร้อนได้สะดวก ซึ่งส่งผลให้ความชื้นในเมล็ดโกโก้ลดลงได้รวดเร็ว (Figure 3)



Figure 3 Arrangement of cocoa beans on the trays

2.5.2 การนำเมล็ดโกโก้เข้าเครื่องอบแห้ง

เปิดเครื่องหลังจากปิดประตูห้องอบแล้ว และทำการบันทึกผลการทดลองครั้งแรก

2.5.3 การเก็บข้อมูลน้ำหนักเมล็ดโกโก้

ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักเมล็ดโกโก้ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบต่อเนื่อง ในช่วงเวลาทุก 15 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทุก 1 ชั่วโมง ตลอดจนจะได้ความชื้นสุดท้าย

2.5.4 การเก็บข้อมูลค่าอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้ามอเตอร์เครื่องอัดและมอเตอร์โบลเวอร์

ทำการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องดิจิตอลโวลต์แอมป์มิเตอร์ในหน่วย kWh และ kW ทุก 15 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทุก 1 ชั่วโมง ตลอดจนถึงความชื้นสุดท้าย

2.5.5 การเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิ

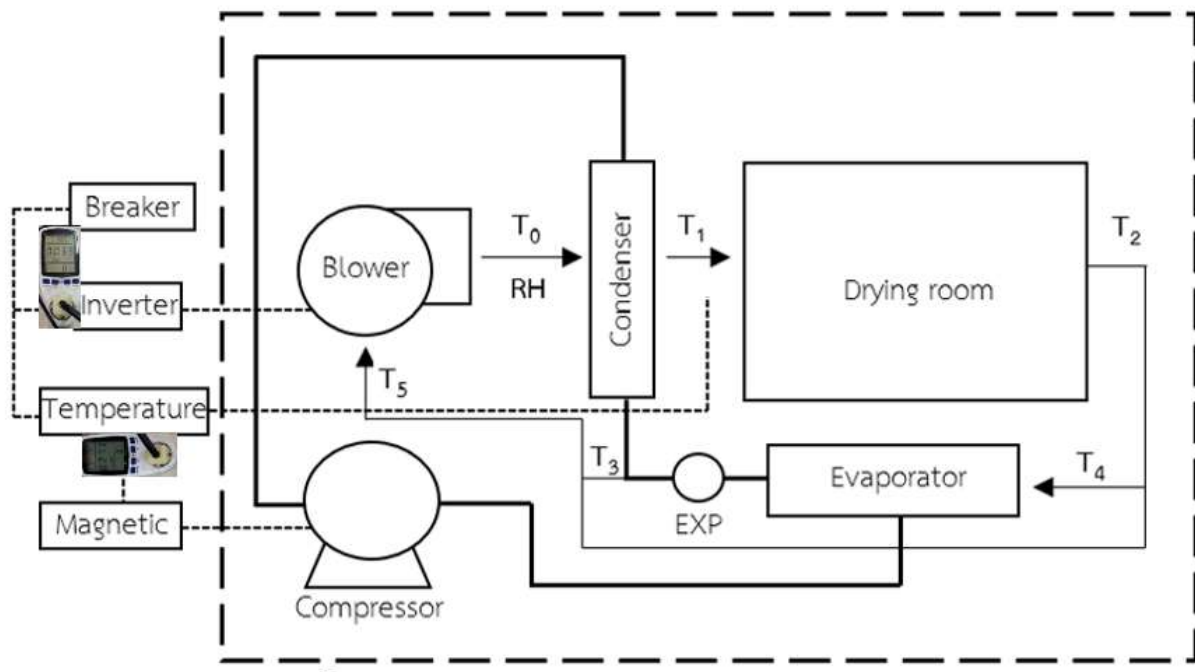
ทำการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิรุ่น TM-1947SD และเก็บข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเครื่องวัดยี่ห้อ UNI-T รุ่น U333S โดยตำแหน่งการติดตั้งแสดงใน Figure 4 เก็บข้อมูลในช่วงเวลา 15 นาที ใช้เวลา 3 ชั่วโมง และทุก 1 ชั่วโมง ตลอดจนถึงความชื้นสุดท้าย

2.5.6 การเก็บข้อมูลค่าสีเมล็ดโกโก้หลังการอบแห้ง

เก็บข้อมูลค่าสีเมล็ดโกโก้หลังการอบแห้งซึ่งแสดงด้วยค่า L^* , a^* และ b^* โดยเครื่องวัดสียี่ห้อ Linshang รุ่น LS170

2.5.7 การทำซ้ำการทดสอบ

ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ รวม 27 การทดสอบ



RH (Air relative humidity measurement location) T_0 (Air temperature before entering the condenser)

T_1 (Air temperature before entering the dryer) T_2 (Air drying chamber outlet temperature)

T_3 (Air evaporator outlet temperature)

T_4 (Air temperature before entering the evaporator)

T_5 (Air temperature before entering the blower)

Figure 4 Temperature and relative humidity measurement locations in the heat pump dryer.

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำค่าที่เก็บผลการทดลองมาวิเคราะห์ข้อมูลในการอบแห้งประกอบไปด้วย อัตราการอบแห้ง ตามสมการที่ (1) อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะตามสมการที่ (2) ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (Coefficient of Performance) ตามสมการที่ (3) และคุณภาพด้านสี

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (1)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg/h), W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (kg), W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg) และ t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

$$SMER = \frac{W_i - W_f}{P_E} \quad (2)$$

เมื่อ $SMER$ คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (kg/h) และ P_E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)

$$COP_h = \frac{\dot{Q}_{ac}}{W_{comp}} \quad (3)$$

เมื่อ COP_h คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (-), $\dot{Q}_{ac}$ คือ ความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kW) และ W_{comp} คือ งานของเครื่องอัดจากการตรวจวัดทางด้านไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เครื่องอัด (kW) และความร้อนที่เครื่องควบแน่นคำนวณได้ตามสมการที่ (4)

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{m}_a C_a (T_{co} - T_{ci}) + \dot{m}_a W_d C_v (T_{co} - T_{ci}) \quad (4)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{ac}$ คือ อัตราความร้อนของเครื่องควบแน่น (kW), T_{ci} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น ($^{\circ}\text{C}$), T_{co} คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องควบแน่น ($^{\circ}\text{C}$), W_d คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dryair}}$), C_a คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง ($\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$), C_v คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น ($\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$) และ $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งผ่านเครื่องควบแน่น (kg/s)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลของอุณหภูมิและความเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้ง

การอบแห้งเมล็ดโกโก้ของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนขนาดเล็ก เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 $^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.5, 3.5 และ 5.5 m/s โดยสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60% ในการอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้าย พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 $^{\circ}\text{C}$ และความเร็วลม 1.5, 3.5 และ 5.5 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 660 นาที (11 ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิ 50 $^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1.5 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 540 นาที (9 ชั่วโมง) ในขณะที่ความเร็ว 3.5 และ 5.5 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 480 นาที (8 ชั่วโมง) สุดท้ายที่อุณหภูมิ 60 $^{\circ}\text{C}$ และความเร็วลม 1.5 และ 3.5 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 480 นาที (8 ชั่วโมง) ส่วนที่ความเร็ว 5.5 m/s ใช้เวลาในการอบแห้ง 420 นาที (7 ชั่วโมง) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chungsiriporn et al. (2023) ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนจากขดลวดความร้อน 60 $^{\circ}\text{C}$ ที่ความเร็ว 0.1 m/s พบว่าใช้เวลาอบแห้ง 485 นาที ดังนั้นการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า เนื่องจากอัตราใช้ความร้อนเร็วกว่าและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศร้อนที่ต่ำ และจากที่มีการดึงน้ำออกจากระบบที่เครื่องทำระเหย ส่งผลให้อัตราความร้อนมีค่ามากกว่าเครื่องอบแห้งลมร้อนจากขดลวดความร้อน แต่ก็มีแนวโน้มเดียวกัน จาก Figure 5 พบว่าช่วงเริ่มต้นอัตราการอบแห้งสูงและลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งทุกสภาวะ เนื่องจากช่วงแรกน้ำอยู่ที่ผิวเมล็ดโกโก้ เมื่อน้ำหนักลดลงน้ำที่อยู่ด้านในเมล็ดโกโก้ค่อย ๆ ซึมผ่านมาที่ผิว ส่งผลให้ในช่วงหลังมีอัตราการอบแห้งน้อย ดังนั้นอุณหภูมิและความเร็วเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิและความเร็วเพิ่มส่งผลให้ความร้อนในอากาศก่อนอบแห้งมีค่าสูง ทำให้น้ำที่อยู่ในเมล็ดโกโก้สามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นสถานะไอได้มากขึ้นตาม Figure 6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่อบแห้งจากเทคโนโลยีอื่น เช่น กรณีใช้อุณหภูมิอบแห้งมากขึ้นระยะเวลาในการอบแห้งพบว่ามีน้อยลง การอบแห้งกล้วยทั้งลูกด้วยเครื่องอบแห้งใช้ชีวมวล (Chunkaew et al., 2018) การอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยลมร้อนจากขดลวดความร้อน (Herman, et al., 2018) รวมถึงสอดคล้องกับการอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R32 ที่ อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 $^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 1, 1.5 และ 2 m/s (Somsila et al., 2023) และสอดคล้องกับการอบแห้งหัวไชเท้าขาวหั่นเป็นชิ้นด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนร่วมกับวงล้อฟัฟฟูที่อุณหภูมิ 35, 40 และ 45 $^{\circ}\text{C}$ ที่ความเร็วลม 1 m/s (Yan et al., 2025)

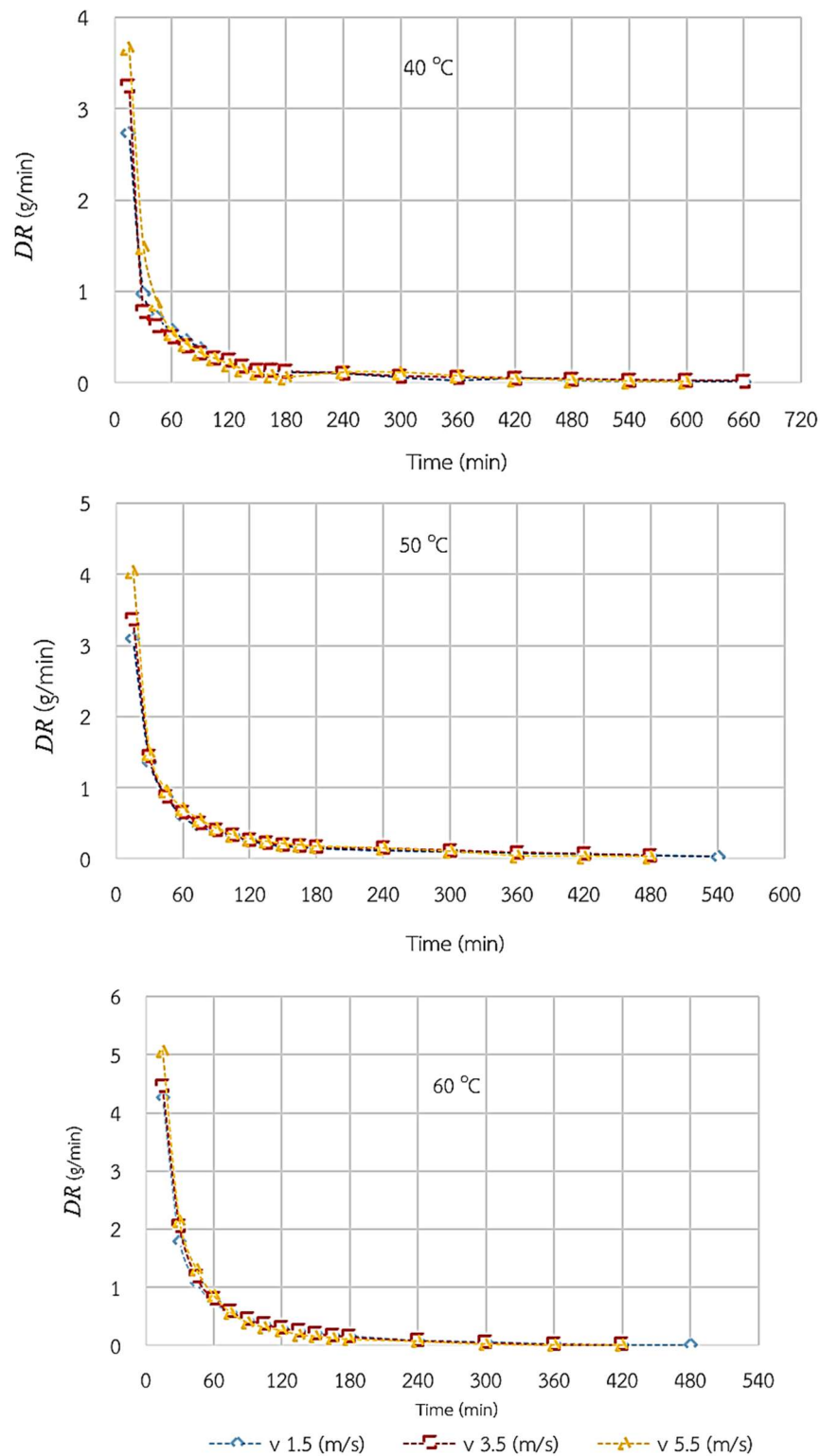


Figure 5 Effects of temperature (40, 50, and 60 °C) and air velocity on the change of drying rate over drying time

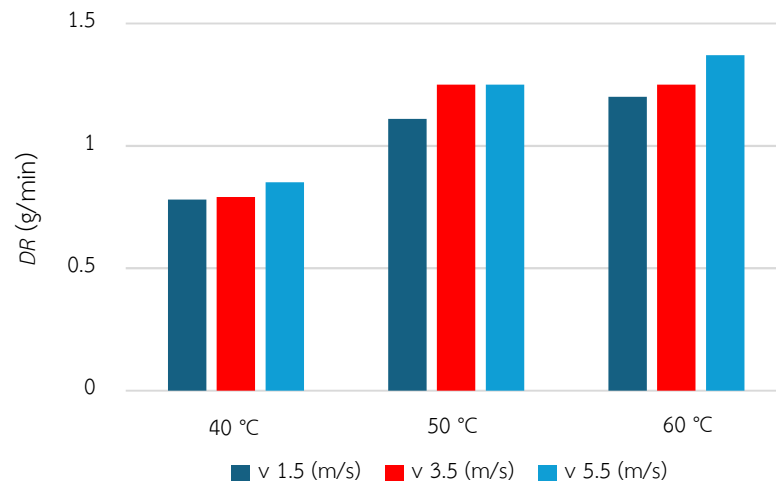


Figure 6 Drying rate test results at temperatures of 40, 50, and 60 °C with air velocities of 1.5, 3.5, and 5.5 m/s

3.2 ผลของอุณหภูมิและความเร็วต่ออัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER)

จาก Figure 7 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิและความเร็วเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิและความเร็วเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้อบแห้งลดลงแต่กำลังงานของมอเตอร์เครื่องอัดมีค่ามากขึ้นตามความเร็วและอุณหภูมิ และกำลังงานของมอเตอร์โบลเวอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่ใช้ งาน เนื่องจากต้องปรับความถี่ใช้งานของมอเตอร์โบลเวอร์มากขึ้นตามสอดคล้องกับการอบแห้งกล้วยน้ำว้าสไลด์ที่ 60 °C กับอัตราการไหลได้สามระดับคือที่ 0.117, 0.128 และ 0.140 m³/s ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (Chunkaew, 2021) แต่ไม่สอดคล้องกับการอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R32 ที่ อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 °C ความเร็วลม 1, 1.5 และ 2 m/s (Somsila et al., 2023) เนื่องจากการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิต่างกันซึ่งงานวิจัยนี้มอเตอร์เครื่องอัดทำงานตลอดเวลาเมื่ออุณหภูมิถึงจุดควบคุมจะบายพาสสารทำงานไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก แต่เครื่องอบแห้งที่ใช้ทดสอบใช้การควบคุมให้หยุดการทำงานของมอเตอร์เครื่องอัด

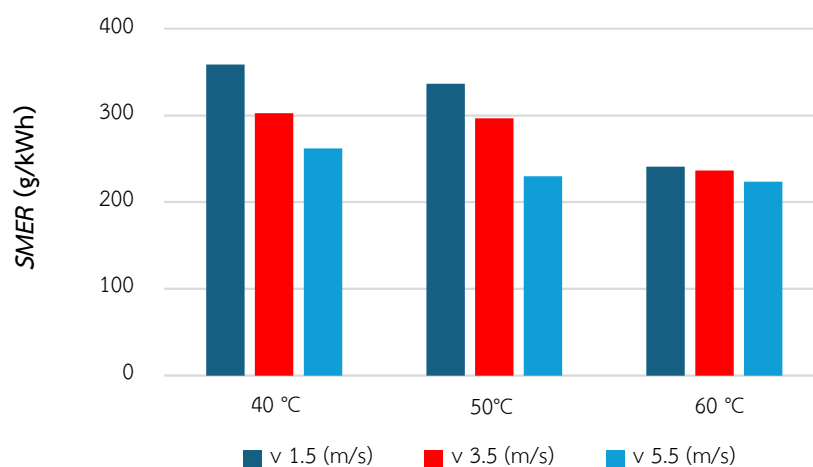


Figure 7 Specific moisture extraction rate test results at temperatures of 40, 50, and 60 °C with air velocities of 1.5, 3.5, and 5.5 m/s

3.3 ผลของอุณหภูมิและความเร็วต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (Coefficient of performance, COP_h)

พฤติกรรมสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเมื่อปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและความเร็ว พบว่า เมื่อพิจารณาตามเวลาการอบแห้งสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP_h) ทุกความเร็ว ในช่วงแรกจะเริ่มสูงขึ้น เนื่องจากเริ่มเปิดเครื่องอบแห้งอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นจนถึงจุดที่ต้องการ ซึ่งช่วงนี้ระบบยังไม่คงตัว เนื่องจากมีความร้อนบางส่วนต้องจ่ายให้โครงสร้าง และความร้อนอีกส่วนใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดโกโก้ เมื่อระบบเครื่องอบแห้งคงตัวและเมล็ดโกโก้มีความชื้นลดลง แนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนจะมีค่าลดลง (Figure 8) และจาก Figure 9 แสดงค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบ พบว่า ผลของอุณหภูมิทุกความเร็ว ที่อุณหภูมิ 60 °C ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนสูงสุด รองลงมาที่อุณหภูมิ 50 °C และต่ำสุดที่อุณหภูมิ 40 °C เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง จะทำให้ความดันและอุณหภูมิของสารทำงานด้านส่งของเครื่องอัดไอน์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้งานของเครื่องอัดไอ (W_{comp}) และอัตราการความร้อนที่เครื่องควบแน่น (Q_{ac}) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเร็วพบว่าความเร็วเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการอบแห้งกล้วยน้ำว้าสดที่อุณหภูมิ 60 °C กับอัตราการไหลได้สามระดับ คือ 0.117, 0.128 และ 0.140 m³/s ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (Chunkaew, 2021)

3.4 สรุปผลการทดสอบสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 1.5, 3.5 และ 5.5 m/s มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR) 0.78±0.008, 0.79±0.007 และ 0.85±0.002 g/min ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (SMER) 358.77±20.98, 302.55±1.02 และ 261.72±14.23 g/kWh ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP_h) 0.85±0.23, 1.56±0.39 และ 2.01±0.49 ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 1.5, 3.5 และ 5.5 m/s มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR) 1.11±0.005, 1.25±0.007 และ 1.25±0.002 g/min ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (SMER) 336.57±13.53, 296.65±15.34 และ 229.65±10.39 g/kWh ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP_h) 2.45±0.74, 2.93±0.74 และ 3.36±0.86 ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลม 1.5, 3.5 และ 5.5 m/s มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR) 1.20±0.002, 1.25±0.007 และ 1.37±0.004 g/min ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (SMER) 240.74±11.30, 236.21±14.40 และ 223.36±7.78 g/kWh ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP_h) 3.94±0.08, 4.48±0.20 และ 5.17±0.10 ตามลำดับ

3.5 ผลของอุณหภูมิและความเร็วต่อคุณภาพด้านสีของเมล็ดโกโก้

จาก Table 1 เมื่ออุณหภูมิและความเร็วเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลง แต่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิและความเร็วเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความร้อนที่ใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลมากขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรทั่วไป เช่น การอบแห้งลำไยด้วยลมร้อนอุณหภูมิสูง (Chunthaworn et al., 2012; Khadwilard et al., 2025) และการเปลี่ยนสีของกระเจี๊ยบเขียวที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ซึ่งเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลง แต่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น (Dadali et al., 2007) และลักษณะสีเมล็ดโกโก้อบแห้งที่ความชื้นสุดท้ายดัง Figure 10

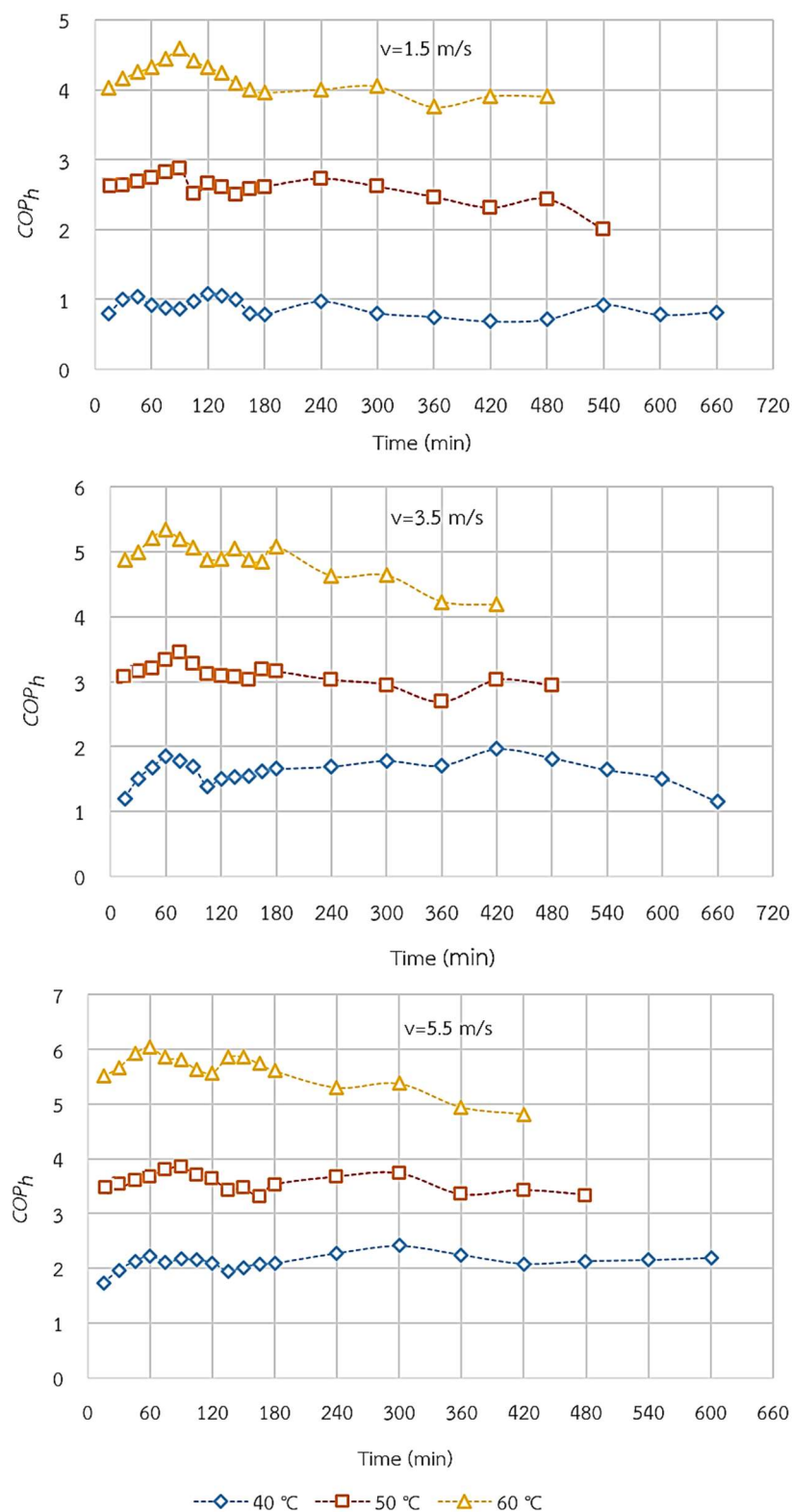


Figure 8 Effects of temperature (40, 50, and 60 °C) and air velocities on the change of heat pump performance coefficient over drying time.

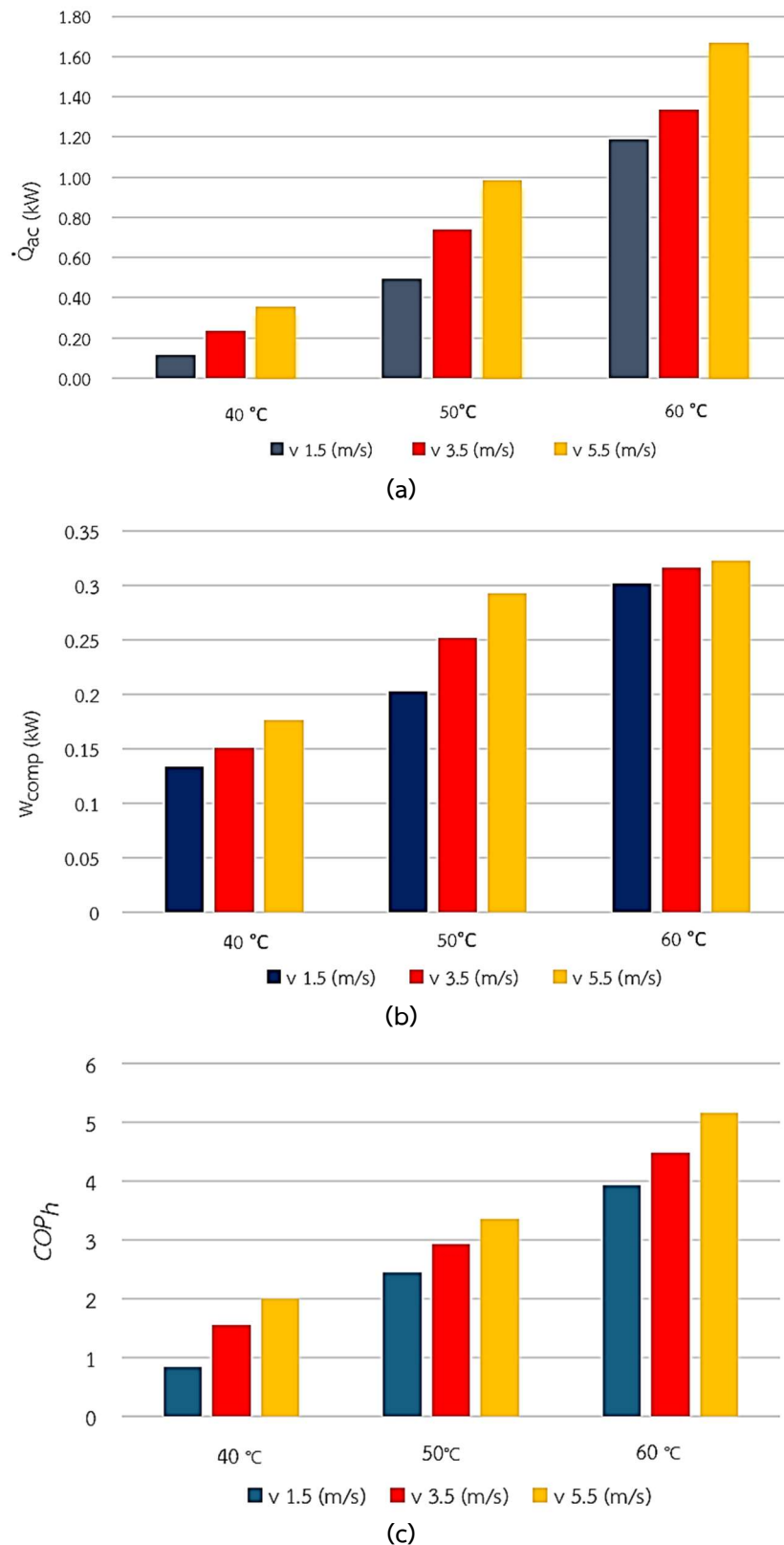


Figure 9 Comparison (a) $\dot{Q}_{ac}$, (b) W_{comp} , and (c) COP_h at 40, 50, and 60 °C with velocities of 1.5, 3.5, and 5.5 m/s.

Table 1 Comparison of the effects of temperature and velocity on the color quality of cocoa beans

Temperature (°C)	Velocity (m/s)	Average color value		
		L*	a*	b*
40	1.5	47.51±1.70 ^e	14.35±1.30 ^b	25.87±1.86 ^d
	3.5	46.82±2.09 ^e	15.11±1.97 ^{b,c}	25.55±1.45 ^d
	5.5	44.01±0.66 ^d	15.59±0.89 ^{b,c}	25.15±1.96 ^d
50	1.5	41.44±0.73 ^c	15.68±1.12 ^{b,c,d}	20.72±1.26 ^c
	3.5	40.28±0.42 ^{b,c}	16.63±1.14 ^{c,d}	20.52±1.31 ^c
	5.5	39.68±0.58 ^b	17.03±2.09 ^{d,e}	20.18±1.94 ^c
60	1.5	39.05±0.34 ^b	17.16±1.42 ^{d,e}	20.07±1.34 ^c
	3.5	37.31±0.47 ^a	18.10±2.04 ^{e,f}	19.00±1.63 ^{b,c}
	5.5	37.28±0.43 ^a	18.38±0.89 ^f	18.14±1.15 ^{a,b}
Before drying	-	59.81±4.38 ^f	7.57±2.11 ^a	17.13±2.33 ^a

Note that different characters in the same column are significantly different at the 95% confidence level



Figure 10 Comparison of cocoa bean color at temperatures of 40, 50, and 60 °C with air velocities of 1.5, 3.5, and 5.5 m/s.

4. สรุป

การศึกษาผลของพารามิเตอร์ควบคุมต่อสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยนวัตกรรมเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนพบว่า เมื่ออุณหภูมิและความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้ง (DR) เพิ่มขึ้น, อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ ($SMER$) ลดลง และค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP_h) เพิ่มขึ้น และผลการทดสอบคุณภาพด้านสีของเมล็ดโกโก้อบแห้งที่แสดงในค่าความสว่าง L^* ค่าสีแดง a^* และค่าสีเหลือง b^* ของเมล็ดโกโก้พบว่าเมื่ออุณหภูมิและความเร็วเพิ่มขึ้น พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลง แต่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะควรใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 40 °C ความเร็วลม 1.5 m/s เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูงสุด นั้นหมายถึงมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าสภาวะอื่น และสอดคล้องกับความต้องการของกลุ่มอาชีพแปรรูปผลิตภัณฑ์โกโก้ ตำบลชะโน้อ อำเภอมะรุมมาต จังหวัดตาก ที่ต้องการอบแห้งที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปและไม่ต่ำเกินไป เพื่อให้ได้เมล็ดโกโก้อบแห้งที่มีคุณภาพ

งานครั้งต่อไปควรวิจัยเกี่ยวกับสมรรถนะด้านคุณภาพของเมล็ดโกโก้อบแห้งด้านอื่น ๆ เช่น คุณค่าทางอาหาร ธาตุอาหารหลัก และสารต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น และการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสำหรับกลุ่มอาชีพแปรรูปผลิตภัณฑ์โกโก้ จังหวัดตาก ที่ต้องเหมาะสมกับปริมาณวัตถุดิบของเมล็ดโกโก้และอุปกรณ์ของระบบปั๊มความร้อนที่ต้องเลือกมาประยุกต์ใช้ ซึ่งมีประเด็นที่ควรต้องศึกษา คือ ผลการประยุกต์การควบคุมการทำงานมอเตอร์เครื่องอัดแบบแปรผันต่อสมรรถนะของการอบแห้งเมล็ดโกโก้ด้วยนวัตกรรมเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน และการประยุกต์ใช้แผงโซลาร์เซลล์เป็นพลังงานไฮบริดสำหรับลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund ; FF) ปีงบประมาณ 2567 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาสำหรับวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพผลผลิตเมล็ดโกโก้ด้วยนวัตกรรมในพื้นที่จังหวัดตาก

6. เอกสารอ้างอิง

- Acharyaviriyaya, A., Acharyaviriyaya, S., Namsanguan, Y., & Chunkaew, P. (2005). Modified heat pump dryer for longan flesh drying. In *Proceedings of the IADC 2005 3rd InterAmerican Drying Conference*, C-6.
- Chungsiriporn, J., Pongyeela, P., & Chairerk, N. (2023). The influence of temperature and air velocity on the hot air drying of cocoa bean. *Journal of Engineering, RMUTT*, 21(1), 11-20. [in Thai]
- Chunkaew P., Khadwilard A., Tavata A., Thawonngamyingsakul, Ch., & Kosalanun, S. (2024). Flue gas control parameter effects of biomass carbonization with heating coil on the production of lotus charcoal for odor absorption. *Frontiers in Engineering Innovation Research*, 22(2), 93-103. [in Thai]
- Chunkaew P., Tavata A., Khadwilard A., & Sriudom Y. (2018). Bananas drying performance with a developed hot air dryer using waste heat from charcoal production process. *RMUTP Research Journal*, 12(1), 147-158.
- Chunkaew, P. (2021). Development and valuation of mini heat pump dryer for slice banana. *RMUTP Research Journal*, 15(1), 179-192. [in Thai]
- Chunthaworn, S., Acharyaviriyaya, S., Acharyaviriyaya, A., & Namsanguan, K. (2012). Color kinetics of longan flesh drying at high temperature. *Procedia Engineering*, 32, 104 – 111.
- Dadali, G., Kiliç Apar, D., & Özbek, B. (2007). Color change kinetics of okra undergoing microwave drying. *Drying Technology*, 25(5), 925–936. <https://doi.org/10.1080/07373930701372296>

- Guan, Ch., Wu, W., Zeng, T., & Hou, Y. (2025). Study on intermittent drying process of lemon slices employing a closed-loop transcritical CO₂ heat pump system. *International Journal of Refrigeration*, 172, 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.01.034>
- Herman, Chr., Spreutels, L., Turomza, N., Konagano, E.M., & Haut, B. (2018). Convective drying of fermented Amazonian cocoabeans (*Theobroma cacao* var. Forasteiro). *Experiments and mathematical modeling. Food and Bioproducts Processing*, 108, 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.01.002>
- Hii, C.L., Rahman, R.A., Jinap, S., & Che Man, YB. (2006). Quality of cocoa beans dried using a direct solar dryer at different loadings. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 1237–1243. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2475>
- Hii, C.L., Law, C.L., & Suzannah, S. (2012). Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying. *Journal of Food Engineering*, 108, 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.08.017>
- Hii, C.L., Law, C.L., & Law, M.C. (2013). Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. *Applied Thermal Engineering*, 54, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.010>
- Horticultural Research Institute. (2021). *Academic document: Knowledge management, cocoa production technology*. Horticultural Research Institute, Department of Agriculture, Bangkok. [in Thai]
- Khadwilard, A., Chunkaew, P., & Kosalanun, S. (2024). Experimental analysis and optimization of power generation by waste heat thermoelectric module of biomass dryer for lighting. *Science & Technology Asia*, 29(4), 119–127.
- Khadwilard, A., Chunkaew, P., Thawonngamyingsakul, Ch., & Kosalanun, S. (2025). Development of multi-level hot air temperature dryer cooperation with biomass heat collection system for longan flesh. *Science & Technology Asia*, 30(2), 155–166
- Laongsri, S. (2020). *Cocoa knowledge*. Agricultural Research Promotion Office, Maejo University. [in Thai]
- Sanpang, P., Tanongkankit, Y., & Khongkrapan, P. (2022). Effects of drying with heat pump, heater and heat pump in combination with heater on quality of kaffir lime leaves and energy consumption. *RMUTP Research Journal*, 17(2), 15–27. [in Thai]
- Somsila, P., Pumchumpol, S., Teeboonma, U., & Namkhat, A. (2023). Performance evaluation of heat pump dryer using R32 refrigerant. *Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal*, 207–222. [in Thai]
- Yan, J., Han, W., Wei, B., Liu, Y., Gao, L., Wang, L., Wang, S., Zhu, M., & Huo, Z. (2025). Drying characteristics of white radish slices under heat pump–low-temperature regenerative wheel collaborative drying. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, Article 105950. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105950>