

การพัฒนาตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อง DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE CONTROLLED DRYING CABINET FOR DRIED BANANA (*MUSA ABB CV. 'KLUAI NAMWA MALIONG'*)

ชนิรัตน์ ผึ้งบรรหาร* ศักดิ์ศรี รักไทย อติรัฐ มากสุวรรณ และณัฐกร อินทวิชะ
Chanirat Phungbunhan*, Saksri Rakthai, Atirat Maksuwan and Nuttakorn Intaravicha

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่องสำหรับชุมชน ภายใต้โจทย์ ความแปรผันของวัตถุดิบ และสภาพแวดล้อมที่ทำให้คุณภาพกล้วยอบไม่สม่ำเสมอ การทดลองแบ่งเป็น 2 ระยะ (1) ศึกษาช่วงอุณหภูมิ 48-52, 58-62, 68-72 องศาเซลเซียส และเวลา 12-16.5 ชั่วโมง เพื่อหาความชื้นของผลิตภัณฑ์กล้วยอบเข้าเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.เอส 92-2563 และ (2) ออกแบบและทดสอบ ตู้อบต้นแบบ พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 48-52 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่เหมาะสมคือ 16.5 ชั่วโมง ให้ความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 19.42 ± 2.29 ในการทดสอบตู้อบต้นแบบให้ความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 15.79 ± 0.19 ควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตั้งค่า (setpoint) ที่ 50 องศาเซลเซียส ทั้งสองค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 21 %wb) ภายในตู้อบต้นแบบติดตั้งหลอดทั้งสแตนเลส 100 วัตต์ 2 ดวง เป็นแหล่งความร้อนหลัก เหมาะสมกับแนวคิด “Boutique Technology” แนวคิดนี้เน้นการพัฒนาเทคโนโลยีที่เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพ (Simple but Effective) เน้นการใช้วัสดุท้องถิ่นและอุปกรณ์ที่สามารถซ่อมแซมได้ในระดับครัวเรือน การเลือกใช้หลอดไฟแทนฮีตเตอร์จึงเป็นตัวอย่างของการออกแบบที่สอดคล้องกับบริบทของชุมชน โดยยอมรับข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพความร้อนบางส่วน เพื่อแลกกับความคุ้มค่า ความสะดวก และความสามารถในการพึ่งพาตนเองของผู้ใช้งาน ตู้อบสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 48-52 องศาเซลเซียส ได้อย่างมีเสถียรภาพ และสามารถลดความชื้นของกล้วยให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้น พบว่า เครื่องอบแห้งควบคุมอุณหภูมิสำหรับอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อง ต้นแบบมีต้นทุนการผลิตเพียงประมาณ 2,000 บาท ใช้พลังงานเฉลี่ย 3.3 kWh ต่อรอบการอบ (16.5 ชั่วโมง) หรือคิดเป็นค่าไฟไม่เกิน 20 บาทต่อรอบ และสามารถคืนทุนได้ภายใน 10 รอบการใช้งาน (ประมาณ 2 สัปดาห์)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Faculty of Science and Technology, Pathumwan Institute of Technology, Pathumwan District, Bangkok 10330

*corresponding author e-mail: june_chani@hotmail.com

Received: 6 August 2025; Revised: 2 October 2025; Accepted: 3 October 2025

DOI: <https://doi.org/10.14456/lsej.2025.23>

โดยมีกำไรสุทธิเฉลี่ย 250 บาทต่อรอบ แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าและความเหมาะสมของเทคโนโลยีในการใช้งานระดับครัวเรือนและชุมชนชนบทเพื่อเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร

คำสำคัญ: อุณหภูมิ ความชื้น กลัวยตาก ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

Abstract

This research aimed to develop a temperature-controlled drying cabinet for drying *Musa ABB* cv. “Kluai Namwa Maliong” suitable for community use. The study was conducted in response to the variability of raw materials and environmental conditions that often result in inconsistent quality of dried bananas. The experiment consisted of two phases: (1) investigation of the optimal temperature ranges (48-52, 58-62 and 68-72°C) and drying durations (12–16.5 hours) to achieve moisture content within the Thai Industrial Standard (TIS 92-2563) for dried bananas, and (2) design and testing of the prototype temperature-controlled dryer. The results indicated that the optimal drying condition was 48-52°C for 16.5 hours, producing an average moisture content of $19.42 \pm 2.29\%$. The prototype dryer achieved an average final moisture content of $15.79 \pm 0.19\%$ under a temperature setpoint of 50°C controlled by a microcontroller, both of which met the industrial standard limit ($<21\%$ wb). The prototype dryer utilized two 100-watt tungsten lamps as the main heat source, aligning with the “Boutique Technology” concept—emphasizing simple but effective technology that is affordable, repairable, and based on locally available materials. The use of light bulbs instead of electric heaters exemplifies an appropriate design trade-off between heat efficiency and economic feasibility, enabling community users to operate and maintain the system independently. The dryer maintained a stable temperature within the 48–52°C range and effectively reduced the banana moisture content to the desired standard. The preliminary economic analysis revealed that the prototype dryer cost approximately 2,000 Baht to build, consumed about 3.3 kWh per drying cycle (16.5 hours), costing less than 20 Baht per round, and achieved a payback period of around 10 drying cycles (approximately two weeks), with an average net profit of 250 Baht per round. These findings demonstrate the economic viability and practical suitability of the developed dryer for household- and community-level applications, promoting value addition to local agricultural products such as bananas, mushrooms, and herbs.

Keywords: temperature, moisture, dried banana, drying cabinet

บทนำ

ปัจจุบันการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรนับเป็นกลยุทธ์สำคัญที่สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) ของประเทศ ซึ่งมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและยั่งยืน โดยเฉพาะการแปรรูปผลผลิตให้เป็นสินค้าที่มีมูลค่าสูงสามารถยืดอายุการเก็บรักษาและตอบสนองความต้องการของตลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้จากผลการศึกษาของเป้าหมายการพัฒนาจังหวัดเพชรบูรณ์ 20 ปี Phetchabun Provincial Office (2023) จังหวัดเพชรบูรณ์ซึ่งมีบทบาทสำคัญทางเศรษฐกิจด้านการเกษตร ได้กำหนดแนวทางการพัฒนาภายใต้แผนพัฒนาจังหวัด 20 ปี (พ.ศ. 2566-2585) โดยมุ่งเน้นการส่งเสริมการเกษตรปลอดภัย เกษตรอินทรีย์ และการแปรรูปผลผลิตให้เกิดมูลค่าเพิ่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง “กล้วยน้ำว้า” ซึ่งเป็นพืชที่มีปริมาณการเพาะปลูกมากในจังหวัดเพชรบูรณ์ กล้วยน้ำว้ามะลิอ่อง (*Musa ABB cv. 'Kluai Namwa Maliong'*) เป็นหนึ่งในพันธุ์ที่ได้รับความนิยมสูง ด้วยลักษณะเด่นของผลที่มีเนื้อแน่น รสชาติหวาน มีกลิ่นหอม และไม่มีเมล็ด จึงเหมาะสำหรับการบริโภคสดและการแปรรูป โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์กล้วยตากและกล้วยแผ่นอบที่เป็นที่นิยมของผู้บริโภคทั้งในประเทศและต่างประเทศ ลักษณะจำเพาะของกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อง เช่น ขนาดผลค่อนข้างเล็ก ใ้กลางไม่แข็ง เนื้อเหนียว นุ่ม และมีกลิ่นหอมมากกว่ากล้วยน้ำว้าพันธุ์อื่น ๆ ทำให้สามารถแปรรูปได้ดีโดยไม่สูญเสียคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส จากข้อมูลทางเศรษฐกิจในปี 2558 ของการจำหน่ายกล้วยทั้งผลสดและแปรรูปมีปริมาณ 4,814 ตัน มูลค่า 410.20 ล้านบาท Thai Customs (2015) มีการผลักดันให้เกิดผลิตภัณฑ์แปรรูป เช่น กล้วยตาก ขนม ของที่ระลึก และผลิตภัณฑ์เชิงนวัตกรรมที่สามารถเชื่อมโยงกับการท่องเที่ยว สร้างอัตลักษณ์ท้องถิ่น และเพิ่มรายได้ให้ชุมชน อย่างไรก็ตาม การผลิตสินค้ากล้วยอบแห้งยังมีข้อจำกัดด้านคุณภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อมในการแปรรูปและการควบคุมกระบวนการที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ การอบแห้งเป็นวิธีถนอมอาหารที่ใช้หลักการลดความชื้นในวัตถุดิบเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ และช่วยยืดอายุการเก็บรักษา โดยมีปัจจัยสำคัญได้แก่ ระดับความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ และค่าพลังงานของน้ำ (water activity; aw) ที่ส่งผลต่อความปลอดภัยของอาหาร Pornchaloempong & Rattanapanon (2025) งานวิจัยที่ผ่านมาได้ประยุกต์ใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การใช้ลมร้อน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอินฟราเรด ไมโครเวฟ และระบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแห้ง ตัวอย่างเช่น งานของ Poogungploy (2017) แสดงให้เห็นว่าการใช้ไมโครเวฟสามารถลดเวลาอบแห้งและพลังงานที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Jaekhom et al. (2022) รายงานว่าการใช้คลื่นอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนช่วยให้ได้คุณภาพสินค้าแห้งในระดับที่เหมาะสม และ Tubklang et al. (2021) พบว่าอุณหภูมิการอบที่เหมาะสมจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ ในทำนองเดียวกัน Tubtimsi et al. (2016) ได้ศึกษาการอบกล้วยน้ำว้าโดยใช้คลื่นอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่า อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และเวลาอบ 25 นาที ให้ค่า water activity อยู่ในช่วง 0.55-0.81 ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรม ขณะที่ Aedtem et al. (2024) ศึกษาการอบกล้วยหิน และพบว่ากล้วยที่ผ่านการบ่ม 8 วัน อบที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ให้คะแนนความชอบสูงสุดจากผู้บริโภค เห็นได้ว่าช่วงอุณหภูมิอบแห้งที่มีการศึกษาในประเทศไทยมีงานที่ใช้ไมโครเวฟลดเวลา ลดพลังงาน ใช้อินฟราเรดแบบเดี่ยว แบบร่วมลมร้อนให้คุณภาพเหมาะสม ใช้เตาอบแสงอาทิตย์ช่วงอุณหภูมิ 33-58 องศาเซลเซียส ที่ทำให้ความชื้นลดลงภายในเวลา 4 วัน จากงานที่ยกตัวอย่างมานี้ส่วนมากนิยมใช้ช่วงอุณหภูมิการอบที่ 48-70 องศาเซลเซียส อย่างแพร่หลาย ขึ้นกับขนาดชื้นของวัสดุอบและวิธีการให้ความร้อน อย่างไรก็ตาม ลักษณะจำเพาะที่แปรผันตามพื้นที่ ได้แก่ ระดับการสุกเริ่มต้น ความชื้นเริ่มต้น ค่าของแข็งที่ละลายได้ (TSS) โครงสร้างเนื้อผล และความแตกต่างสายพันธุ์ย่อย ซึ่งล้วนกำหนดพฤติกรรมการอบและคุณภาพสุดท้ายทำให้จำเป็นต้องพิสูจน์สภาวะที่เหมาะสมเฉพาะพื้นที่และพัฒนาต่อบตามบริบทชุมชน

จากความสำคัญดังกล่าวการพัฒนาตู้ควบคุมอุณหภูมินี้จึงมีวัตถุประสงค์คือ 1) ทดลองเพื่อศึกษาระดับอุณหภูมิและระยะเวลาการอบที่ทำให้ค่าความชื้นของเนื้อมะลิเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเอสกลัยอบ (มอก. เอส 95-2563) 2) ออกแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกลัยน้ำวามะลิอ่อง (*Musa ABB cv. 'Kluai Namwa Maliong'*) ดำเนินการวิจัยโดยศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบกลัย และออกแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกลัยน้ำวามะลิอ่อง ผลการศึกษานี้นำไปสู่การได้ระดับอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสมในการผลิตกลัยตากที่เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเอสกลัยอบ อีกทั้งยังสามารถนำผลการศึกษาที่ได้มาพัฒนาต่อยอดเป็นเทคโนโลยีอย่างง่ายเพื่อให้กลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตกลัยตากที่มีลักษณะเฉพาะของพื้นที่ของจังหวัดเพชรบูรณ์ได้ใช้ประโยชน์ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้แบ่งขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. ทดลองเพื่อศึกษาระดับอุณหภูมิและระยะเวลาการอบที่ทำให้ค่าความชื้นของเนื้อมะลิเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเอสกลัยอบ (มอก. เอส 95-2563) มีรายละเอียด ดังนี้

1.1 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบกลัยน้ำวามะลิอ่องโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ประกอบด้วย 3 สิ่งทดลอง 5 ซ้ำ รวม 15 หน่วยทดลอง แต่ละสิ่งทดลองได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ระดับ รายละเอียดดังนี้ ประกอบด้วยตัวแปรต้น ได้แก่ ระดับอุณหภูมิซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ 48-52, 58-62 และ 68-72 องศาเซลเซียส ตัวแปรตาม จำนวน 2 ตัวแปร ได้แก่ น้ำหนักกลัยหลังอบ และร้อยละความชื้นของเนื้อมะลิ ตัวแปรควบคุม จำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (%Brix) โดยใช้เครื่องวัดความหวานแบบกล้อง รุ่น Re-Brix-90 ยี่ห้อ LICHEN บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นของกลัยวัตถุดิบ โดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น ME3002 ยี่ห้อ METTLER TOLEDO วัดค่าสี L a b* ของกลัยวัตถุดิบโดยใช้

เครื่องวัดค่าสี รุ่น ColoeFlex EZ ยี่ห้อ HunterLab ทำการคาลิเบรตเครื่องมือวัดก่อนใช้งานทุกครั้ง และกำหนดระยะเวลาการรอบ 12 ชั่วโมง

1.2 ศึกษาระยะเวลาการรอบที่ทำให้ค่าความชื้นของเนื้อมะลิอ่อนให้เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเนื้อมะลิอ่อน (มอก. เอส 95-2563) โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomize Design, CRD) ประกอบด้วย 4 สิ่งทดลอง 5 ซ้ำ รวม 20 หน่วยทดลอง แต่ละสิ่งทดลองได้รับระยะเวลาการรอบที่แตกต่างกัน 4 ระดับ รายละเอียดดังนี้ ประกอบด้วย ตัวแปรต้น ได้แก่ ระยะเวลาที่ต่างกันซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ระยะเวลา คือ 12, 13.5, 15 และ 16.5 ชั่วโมง ตัวแปรตาม จำนวน 2 ตัวแปร ได้แก่ น้ำหนักกล้วยหลังอบ และร้อยละความชื้นของเนื้อมะลิอ่อน ตัวแปรควบคุม จำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (%Brix) โดยใช้เครื่องมือและวิธีการวัดเช่นเดียวกับข้อ 1.1 และกำหนดอุณหภูมิในการอบ 48-52 องศาเซลเซียส

1.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ข้อมูล แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย (1) เตรียมกล้วยวัตถุดิบ โดยคัดเลือกกล้วยวัตถุดิบที่อยู่ในระยะที่มีความแก่ (mature) ที่ใกล้เคียงกัน โดยคัดเลือกมาในลักษณะที่เป็นเครือ ทำการบ่มให้สุกเองตามธรรมชาติ ระยะการสุกของกล้วยอยู่ในระยะที่ 6 ผิวเปลือกทั่วผลมีสีเหลืองทั้งหมด (2) เตรียมชุดการทดลอง 15 หน่วยทดลอง สำหรับการศึกษาาระดับอุณหภูมิ เตรียมชุดการทดลอง 20 หน่วยทดลอง สำหรับการศึกษาและระยะเวลาการรอบ แต่ละหน่วยทดลองประกอบด้วยผลกล้วยที่ผ่านการคัดเลือกจากขั้นตอนที่ 1 มาปอกเปลือก ลอกเส้นน้ำเลี้ยงออก ล้างสิ่งสกปรกด้วยน้ำสะอาดแล้วนำไปหั่น โดยควบคุมให้แต่ละถุงมีกล้วยที่ถูกหั่นเป็นแผ่นหนา 0.5 เซนติเมตร น้ำหนักรวมเริ่มต้น 50 กรัมต่อถุง นำชิ้นส่วนของกล้วยที่ถูกแบ่งใส่ลงในถุงกระดาษสีน้ำตาลตามจำนวนหน่วยทดลอง วิเคราะห์ความชื้นของกล้วยก่อนนำไปอบ (3) รวบรวมข้อมูลน้ำหนักกล้วยหลังอบเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการรอบตามวิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างเป็นอาหาร ยา เครื่องสำอาง เคมีภัณฑ์ที่ใช้ทางการเกษตร (Association of Official Analytical Chemists: AOAC) AOAC (1990) (4) วิเคราะห์ข้อมูลค่าความชื้นของเนื้อมะลิอ่อนโดยวิเคราะห์การกระจายตัวภายใต้โค้งปกติของชุดข้อมูลด้วย The Kolmogorov-Smirnov One-sample Test วิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย The Kruskal-Wallis One-way Analysis of Variance by Ranks (K-W test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ในกรณีที่ข้อมูลไม่มีการกระจายตัวภายใต้โค้งปกติ หรือวิเคราะห์ เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ในกรณีที่ข้อมูลมีการกระจายตัวภายใต้โค้งปกติ

2. ออกแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อนต้นแบบ มีรายละเอียด ดังนี้

2.1 ศึกษาหลักการและรูปแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อนจากฐานข้อมูลทางวิชาการโดยจำแนกที่มาของเอกสารตาม Somchua (2006) และ Chantavanich (2011) ร่วมกับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางอุณหภูมิของวัสดุฉนวนกันความร้อนบนพื้นฐานของกฎการ

อนุรักษพลังงาน Asako & Nakamura (1982) เพื่อศึกษาผลการถ่ายโอนพลังงานความร้อนภายในวัสดุต่างชนิดกัน Akiyama & Chong (1997)

2.2 ออกแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิเบื้องต้นแบบภายใต้เงื่อนไขของ Boutique Technology (Maksuwan, 2024)

2.3 ประเมินคุณสมบัติการถ่ายโอนความร้อนของวัสดุเชิงคำนวณ เพื่อคัดเลือกวัสดุฉนวนกันความร้อนจากแบบจำลองอุณหพลศาสตร์ Maksuwan (2019)

3. สร้างและทดสอบประสิทธิภาพตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิเบื้องต้นแบบ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิของตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิเบื้องต้นแบบ โดยการเลือกใช้หลอดไฟทังสเตน (Tungsten Lamp) เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในระบบอบแห้งหรืออุปกรณ์ทดลองครั้งนี้ มีเหตุผลเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ที่สอดคล้องกับแนวคิด Boutique Technology ซึ่งมุ่งเน้นความเรียบง่าย ประหยัด เข้าใจง่าย และสามารถซ่อมบำรุงได้ด้วยตนเองในระดับครัวเรือนหรือชุมชน โดยมีเหตุผลสนับสนุน คือ 1) หาซื้อได้ง่ายและราคาประหยัด หลอดไฟทังสเตนเป็นวัสดุทั่วไปที่สามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด ราคาต่อหน่วยต่ำเมื่อเทียบกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าหรือแผ่นทำความร้อน (Heating Element) ช่วยลดต้นทุนการผลิตและต้นทุนซ่อมบำรุงในระยะยาว เหมาะสมกับบริบทของโครงการที่ต้องการส่งเสริมการผลิตเทคโนโลยีระดับชุมชน (Appropriate Technology) 2) ใช้งานและติดตั้งง่าย ระบบการติดตั้งและการเชื่อมต่อของหลอดไฟมีความเรียบง่าย ไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ควบคุมที่ซับซ้อน เช่น รีเลย์ควบคุมอุณหภูมิหลายจุด หรือระบบจ่ายไฟเฉพาะทาง จึงเหมาะกับผู้ใช้งานที่ไม่มีพื้นฐานทางวิศวกรรมมากนัก โดยเฉพาะในโครงการที่มุ่งเน้นให้เกษตรกรหรือกลุ่มแม่บ้านสามารถประกอบและดูแลอุปกรณ์ได้ด้วยตนเอง 3) สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างยืดหยุ่น หลอดไฟให้ความร้อนผ่านการแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) ซึ่งสามารถควบคุมความเข้มได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าหรือจำนวนหลอดที่ใช้ร่วมกัน ทำให้ปรับอุณหภูมิของระบบได้ง่าย เหมาะสำหรับการอบผลิตภัณฑ์เกษตรที่ต้องการอุณหภูมิต่ำถึงปานกลางประมาณ 40-70 องศาเซลเซียส เช่น กล้วยอบแห้ง เห็ดหรือสมุนไพร ซึ่งไม่ต้องการความร้อนสูงมากเหมือนกระบวนการทางอุตสาหกรรม 4) ซ่อมบำรุงและเปลี่ยนอะไหล่ได้ง่ายเมื่อหลอดไฟขาดหรือชำรุด สามารถเปลี่ยนแทนได้ทันทีโดยไม่ต้องใช้ชิ้นส่วนเฉพาะทางเหมือนฮีตเตอร์หรือแผ่นทำความร้อนซึ่งมักต้องสั่งซื้อเฉพาะรุ่น ช่วยลดปัญหาการหยุดชะงักของการใช้งานในชุมชนและเพิ่มความยั่งยืนของระบบในระยะยาว 5) เหมาะสมกับแนวคิด “Boutique Technology” แนวคิดนี้เน้นการพัฒนาเทคโนโลยีที่เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพ เน้นการใช้วัสดุท้องถิ่นและอุปกรณ์ที่สามารถซ่อมแซมได้ในระดับครัวเรือน 6) ข้อพิจารณาเชิงประสิทธิภาพ แม้ว่าหลอดไฟทังสเตนจะมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนต่ำกว่าฮีตเตอร์โดยตรง (ประมาณร้อยละ 85-90 เมื่อเทียบกับร้อยละ 100 ของฮีตเตอร์) แต่สำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือนหรือการทดลองขนาดเล็กที่ไม่ต้องการ

ความร้อนสูงมาก ความแตกต่างดังกล่าวไม่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในเชิงปฏิบัติ อีกทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป ซึ่งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียคุณภาพ จึงทำการติดตั้งหลอดไฟให้ความร้อนขนาดต่างกัน ได้แก่ 40 วัตต์ 60 วัตต์ และ 100 วัตต์ ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ติดตั้งพัดลมระบายความร้อน (Brushless DC Fan) ขนาด 3.5 นิ้ว จำนวน 1 ตัว ติดตั้งด้านหลังบริเวณตรงกลางชิดขอบบนของตู้ เพื่อระบายไอน้ำและความชื้นภายในตู้ติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์บริเวณด้านหลังตู้ ตั้งค่า (setpoint) ที่ 50 องศาเซลเซียส บันทึกระดับอุณหภูมิภายในตู้ในช่วงเวลา 8.00 - 16.00 น. เป็น 5 ช่วงเวลาใน 1 วัน เพื่อประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา ประเมินประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิด้วย Friedman two-way Analysis of Variance by Rank test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.2 ทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมความชื้นของตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อนต้นแบบ โดยนำกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อนที่ผ่านการบ่มในระยะสุกระดับที่ 6 นำมาปอกเปลือกออกหั่นตามแนวยาว หั่น 0.5 เซนติเมตร วางเรียงบนตะแกรงขนาดกว้าง 35 เซนติเมตร และ ยาว 50 เซนติเมตร ที่รองด้วยแผ่นซิลิโคนรองอบ จำนวนตัวอย่าง 28 ชิ้น เรียง 4 แถว แถวละ 7 ชิ้น ระยะห่างการวางชิ้นละ 0.5 เซนติเมตร เข้าทำการอบในตู้ควบคุมอุณหภูมิ โดยบันทึกผล 4 ช่วง คือ ก่อนอบ หลังอบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังอบเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และหลังอบเป็นเวลา 16.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 48-50 องศาเซลเซียส คำนวณค่าความชื้นของเนื้อกล้วยด้วยวิธีมาตรฐาน AOAC นำข้อมูลค่าความชื้นที่ได้ในแต่ละช่วงเวลามาวิเคราะห์ด้วยสถิติ Friedman two-way Analysis of Variance by Rank test

ผลการวิจัย

1. ระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อนรายละเอียดดังนี้

1.1 ร้อยละค่าความชื้นของเนื้อกล้วยเมื่อสิ้นสุดการทดลองภายใต้ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ผลการศึกษาพบว่า สิ่งทดลองที่ 1 ระดับอุณหภูมิ 48-52 องศาเซลเซียส มีร้อยละค่าความชื้นของเนื้อกล้วยสูงที่สุดเท่ากับ 31.49 รองลงมาร้อยละ 30.46, 30.37, 30.31 และ 24.33 ตามลำดับ ร้อยละค่าความชื้นของเนื้อกล้วยเฉลี่ยเท่ากับ 29.39 ± 2.56 สิ่งทดลองที่ 2 ระดับอุณหภูมิ 58-62 องศาเซลเซียส มีร้อยละค่าความชื้นของเนื้อกล้วยสูงที่สุดเท่ากับ 35.83 รองลงมาร้อยละ 24.75, 19.02, 16.92 และ 16.15 ตามลำดับ ร้อยละค่าความชื้นของเนื้อกล้วยเฉลี่ยเท่ากับ 22.54 ± 7.29 และสิ่งทดลองที่ 3 ระดับอุณหภูมิ 68-72 องศาเซลเซียส มีร้อยละค่าความชื้นของเนื้อกล้วยสูงที่สุดเท่ากับ 16.57 รองลงมาร้อยละ 14.99, 14.11, 12.95 และ 10.41 ตามลำดับ ร้อยละค่าความชื้นของเนื้อกล้วยเฉลี่ยเท่ากับ 13.81 ± 2.06 ดังตารางที่ 1 (Table 1)

Table 1 The average percentage of moisture in dried banana at different temperature levels is 12 hour.

Sequence	48-52°C	58-62°C	68-72°C
1	30.46	35.83	10.41
2	31.49	16.15	16.57
3	30.37	19.02	14.99
4	30.31	24.75	14.11
5	24.33	16.92	12.95
Average	29.39±2.56	22.54±7.29	13.81±2.06

1.2 การกระจายของข้อมูลค่าความชื้นของเนื้อมากั่วโดย The Kolmogorov Smirnov One-sample Test และความแตกต่างของค่าร้อยละความชื้นของเนื้อมากั่วเฉลี่ยจากการอบที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วย K-W test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) พบว่า ข้อมูลค่าความชื้นของเนื้อมากั่วจากทั้งสามสิ่งทดลองไม่เป็นการกระจายแบบปกติ ($p < 0.05$) จึงเลือกใช้การทดสอบแบบไม่อิงพารามิเตอร์ (Kruskal–Wallis Test) ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าร้อยละความชื้นเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม ค่า $H = 9.62$ สูงกว่าค่า χ^2 วิฤติ ($df=2$, $\alpha=0.05$) = 5.991 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังตารางที่ 2 (Table 2) แสดงให้เห็นว่าค่าร้อยละความชื้นเฉลี่ยของเนื้อมากั่วมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสิ่งทดลองที่อุณหภูมิ 48–52 องศาเซลเซียส ให้ค่าความชื้นเฉลี่ยอยู่ในช่วงมาตรฐานอุตสาหกรรม และเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบกล้วย เนื่องจากให้ความชื้นที่สม่ำเสมอและเนื้อไม่แข็งจนเกินไป

Table 2 Results of the normality and difference tests for the moisture content of dried banana.

Test Item	Kolmogorov–Smirnov Test			Kruskal–Wallis Test
Treatment	1	2	3	Overall
Temperature Range (°C)	48-52	58-62	68-72	
Dcal	0.237	0.4907	0.1871	
Dcrit ($\alpha=0.05$, N=5)	0.708	0.708	0.708	
H Value	-	-	-	9.62
χ^2_{crit} ($df=2$, $\alpha=0.05$)	-	-	-	5.991

2. ระยะเวลาการอบที่ทำให้ค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยน้ำว้ามะลิแห้งให้เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเอสกกล้วยอบ (มอก. เอส 95-2563)

2.1 ร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยเมื่อสิ้นสุดการทดลองภายใต้ช่วงระยะเวลาการอบที่ต่างกัน 4 ระดับ คือ 12, 13.5, 15 และ 16.5 ชั่วโมง ที่ระดับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า สิ่งทดลองที่ 1 ระยะเวลา 12 ชั่วโมง มีร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยสูงที่สุดเท่ากับ 28.45 รองลงมาร้อยละ 28.00, 26.51, 24.59 และ 21.68 ตามลำดับ ร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยเฉลี่ยเท่ากับ 25.85 ± 2.48 สิ่งทดลองที่ 2 ระยะเวลา 13.5 ชั่วโมง มีร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยสูงที่สุดเท่ากับ 26.22 รองลงมาร้อยละ 25.87, 24.27, 22.44 และ 19.62 ตามลำดับ ร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยเฉลี่ยเท่ากับ 23.68 ± 2.43 และสิ่งทดลองที่ 3 ระยะเวลา 15 ชั่วโมง มีร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยสูงที่สุดเท่ากับ 23.80 รองลงมาร้อยละ 23.66, 21.79, 20.19 และ 17.56 ตามลำดับ ร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยเฉลี่ยเท่ากับ 21.40 ± 2.33 และสิ่งทดลองที่ 4 ระยะเวลา 16.5 ชั่วโมง มีร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยสูงที่สุดเท่ากับ 21.76 รองลงมาร้อยละ 19.71, 18.14 และ 15.73 ตามลำดับ ร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยเฉลี่ยเท่ากับ 19.42 ± 2.29 ดังตารางที่ 3 (Table 3)

Table 3 The percentage of moisture content of dried banana for different periods of time at different temperature levels 50°C.

Sequence	12 hours	13.5 hours	15 hours	16.5 hours
1	21.68	19.62	17.56	15.73
2	24.59	22.44	20.19	18.14
3	28.45	26.22	23.80	21.76
4	26.51	24.27	21.79	19.71
5	28.00	25.87	23.66	21.76
Average	25.85 ± 2.48	23.68 ± 2.43	21.40 ± 2.33	19.42 ± 2.29

2.2 การกระจายของข้อมูลค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยโดย The Kolmogorov-Smirnov One-sample Test และความแตกต่างของค่าร้อยละค่าความชื้นของเนื้อมากกล้วยภายใต้ช่วงระยะเวลาการอบที่ต่างกัน 4 ช่วงเวลาที่ระดับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วย K-W test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) พบว่า ข้อมูลค่าความชื้นของกล้วยจากทุกช่วงเวลาอบไม่เป็นการกระจายแบบปกติ ($p < 0.05$) จึงใช้การทดสอบแบบไม่อิงพารามิเตอร์ (Kruskal-Wallis Test) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าร้อยละความชื้นเฉลี่ยระหว่างช่วงเวลาอบทั้ง 4 ระดับ ผลการทดสอบทางสถิติ Kruskal-Wallis ที่มีค่า H เท่ากับ 9.057 ซึ่งมากกว่าค่าวิกฤติ 5.991 ($df = 3, p < 0.05$) ดังตารางที่ 4 (Table 4) แสดงว่าความชื้นเฉลี่ยของเนื้อมากกล้วยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยช่วงเวลา 16.5 ชั่วโมง เป็นช่วงที่

เหมาะสมที่สุดภายใต้อุณหภูมิ 48–52 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ค่าความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มีความสม่ำเสมอ และคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดีที่สุด

Table 4 Results of normality and difference tests for moisture content under different drying durations of dried banana.

Test item	Kolmogorov–Smirnov test				Kruskal–Wallis test
Treatment	1	2	3	4	Overall
Drying Duration (hours)	12	13.5	15	16.5	
Dcal	0.1608	0.1929	0.2404	0.1893	
Dcrit ($\alpha=0.05$, N=5)	0.708	0.708	0.708	0.708	
H Value	-	-	-	-	9.057
χ^2_{crit} (df=2, $\alpha=0.05$)	-	-	-	-	5.991

3. ผลการออกแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิเบื้องต้นแบบรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุที่สามารถนำมาใช้ประกอบตู้ควบคุมอุณหภูมิ ได้แก่ โพลีคาร์บอเนต กระจกใส พลาสติกชนิด PP และ PE ซึ่งมีคุณสมบัติและราคาที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาจากความสามารถในการกักเก็บความร้อน ราคาความพร้อมของวัสดุในท้องถิ่น ตลอดจนความเหมาะสมกับโครงสร้างของตู้ที่ออกแบบ นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบวัสดุกันความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งกรณีที่ใช้วัสดุชนิดเดียวกันทั้งตู้ และกรณีที่ผสมผสานวัสดุต่างชนิดกันเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการกักเก็บและควบคุมอุณหภูมิภายในตู้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของฝาบนและด้านข้างที่มีการติดตั้งหลอดไฟและพัดลมสำหรับควบคุมการไหลเวียนของอากาศและความร้อนแหล่งพลังงานความร้อนที่นำมาใช้ประกอบด้วย หลอดไฟประเภทหลอดทังสแตน หลอดฮาโลเจน และหลอดอินฟราเรด ซึ่งมีคุณสมบัติการให้ความร้อนแตกต่างกัน โดยเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับขนาดตู้และสภาวะภายในพื้นที่ทดลอง

3.2 กำหนดขนาดของตู้ควบคุมอุณหภูมิ ขนาด 40 x 60 x 60 เซนติเมตร เนื่องจากขนาดดังกล่าวเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการอบกล้วยในปริมาณที่ไม่มากจนเกินไป สอดคล้องกับลักษณะของการทดลองหรือการผลิตขนาดเล็ก ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอบได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังเอื้อต่อการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตู้เบื้องต้นก่อนนำไปปรับปรุงหรือพัฒนาในระดับที่ใหญ่ขึ้นในอนาคต การกำหนดขนาดของตู้มีความกว้าง 40 ยาว 60 เซนติเมตร เป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการจัดวางถาดรองอบที่มีขนาด กว้าง 35 ยาว 50 เซนติเมตร ได้เหมาะสม ซึ่งเป็นถาดและตะแกรงที่เป็นอุปกรณ์ครัวตามครัวเรือนที่หาได้ง่าย ส่วนความสูง 60 เซนติเมตร เป็นขนาดที่เพียงพอต่อการติดตั้งอุปกรณ์ภายใน เช่น หลอดไฟให้ความร้อนหรือพัดลม รวมถึงมีพื้นที่สำหรับการไหลเวียนของอากาศร้อนในแนวตั้ง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้กล้วยแห้งได้สม่ำเสมอ นอกจากนี้ขนาดของตู้ยังเหมาะสมกับวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น เช่น กระจกหรือแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่สามารถสั่งตัด

ตามขนาดดังกล่าวได้โดยไม่สิ้นเปลืองวัสดุ และยังสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย ซึ่งเป็นไปตามแนวทางของ Boutique Technology ที่เน้นความประหยัด ใช้งานง่าย และเหมาะสมกับชุมชน ดังนั้น การกำหนดขนาดตู้อบที่ $40 \times 60 \times 60$ เซนติเมตร จึงเป็นขนาดที่ผ่านการพิจารณาทั้งด้านเทคนิค ความสะดวกในการใช้งาน ต้นทุน และความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่และวัสดุท้องถิ่นอย่างรอบด้าน

4. การประเมินคุณสมบัติการถ่ายโอนความร้อนของวัสดุเพื่อคัดเลือกวัสดุที่เก็บความร้อนที่มีค่าการนำความร้อนรวม (k_T) ที่แตกต่างกันสำหรับออกแบบโครงสร้างของตู้อบกล้วย 4 กรณี ได้แก่ 1) กระจก 5 ด้าน โพลีคาร์บอเนต 1 ด้าน 2) กระจก 4 ด้าน โพลีคาร์บอเนต 2 ด้าน 3) กระจก 6 ด้าน และ 4) โพลีคาร์บอเนต 6 ด้าน จากภาพที่ 1 (Figure 1) และภาพที่ 2 (Figure 2) พบว่า กระจกทั้ง 6 ด้านสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนได้ดีที่สุด แต่เนื่องจากกระจกทั้ง 6 ด้าน มีน้ำหนักมาก ต้นทุนสูง และโครงสร้างเปราะแตกง่าย ไม่เหมาะกับการใช้งานของเกษตรกร ดังนั้นจึงเลือกกรณีการใช้วัสดุผสมผสาน กระจก 4 ด้าน และโพลีคาร์บอเนต 2 ด้าน ซึ่งสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนได้ดีในลำดับรองลงมาสำหรับนำมาสร้างตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิเบื้องต้นแบบ ภายได้เงื่อนไขของ Boutique Technology ดังภาพที่ 3 (Figure 3)

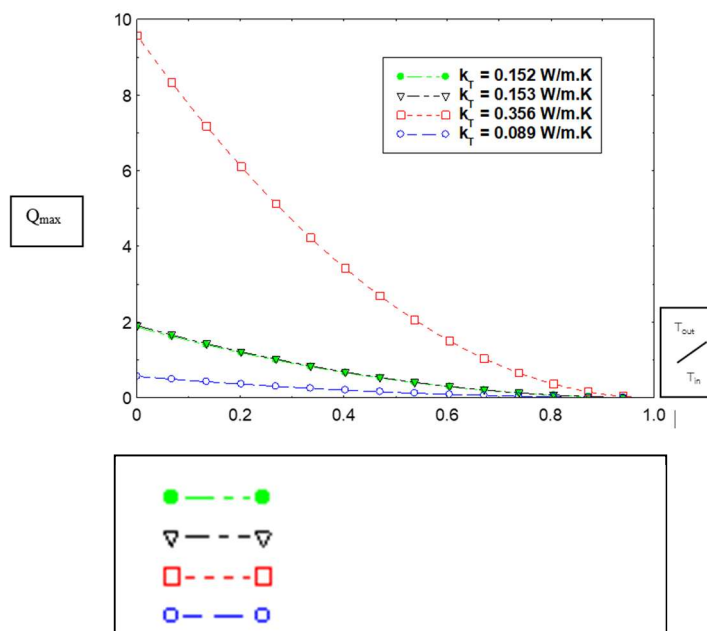


Figure 1 Convection temperature properties of thermal insulation materials with overall thermal conductivity k_T .

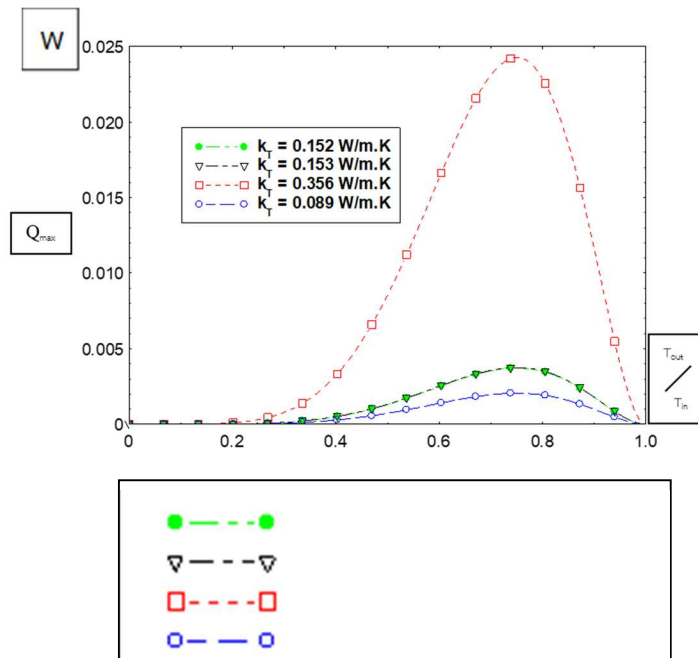


Figure 2 Thermal Radiance Temperature Properties of Thermal Insulation Materials with overall thermal conductivity k_t .

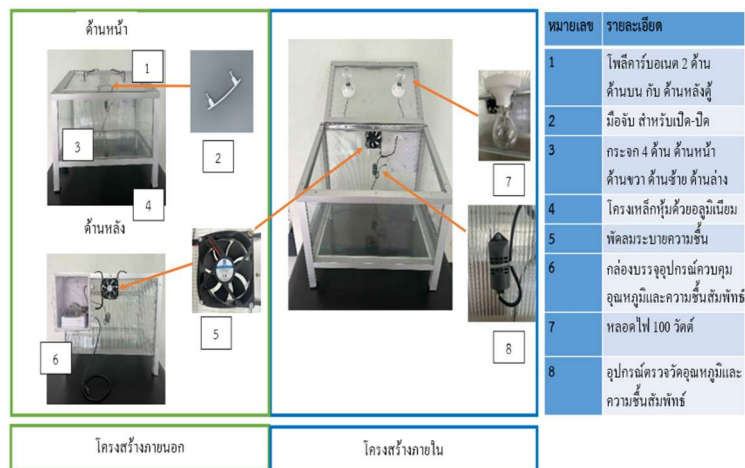


Figure 3 Draft plan of the temperature control cabinet for drying bananas the master.

5. การทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิของตู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้า มะลิอ่อนต้นแบบ ดังตารางที่ 5 (Table 5)

Table 5 The temperature of the cabinet controls the temperature for drying bananas according to different sizes of bulbs.

Time (Hrs)	Temperature inside the cabinet (°C) /Lamp size (watt)		
	40 Watts	60 Watts	100 Watts
08.00	25.4	25.7	26.3
10.00	34.5	40.6	46.6
12.00	36.3	42.0	47.3
14.00	37.8	43.1	48.7
16.00	38.4	43.8	49.5
Average	34.78±4.73	39.04±6.75	43.68±8.74

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเทคโนโลยีควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้าพันธุ์มะลิอ่อน การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในตู้ที่ใช้หลอดไฟขนาด 40, 60 และ 100 วัตต์ พบว่า เมื่อกำลังวัตต์ของหลอดไฟเพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายในตู้เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยในช่วงเริ่มต้นของวัน (เวลา 8.00 น.) อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง (25.4-26.3 องศาเซลเซียส) แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงบ่าย โดยตู้ที่ใช้หลอดไฟ 100 วัตต์ สามารถทำให้อุณหภูมิสูงสุดถึง 49.5 องศาเซลเซียส ณ เวลา 16.00 น. เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิตลอดวัน พบว่า หลอดไฟ 40 วัตต์ ให้ค่าเฉลี่ย 34.78±4.73 องศาเซลเซียส หลอดไฟ 60 วัตต์ ให้ค่าเฉลี่ย 39.04±6.75 องศาเซลเซียส และหลอดไฟ 100 วัตต์ ให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 43.68±8.74 องศาเซลเซียส แสดงถึงแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างกำลังวัตต์และอุณหภูมิภายในตู้ ผลการทดสอบสมมติฐานด้วย Friedman Two-Way Analysis of Variance by Rank พบว่าค่าสถิติทดสอบ (χ^2_r เท่ากับ 10.00 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติ Critical Value) มากกว่าค่าวิกฤติ 5.991 (df = 2, $\alpha = 0.05$) บ่งชี้ว่ากลุ่มทดลองทั้งสามมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า กำลังวัตต์ของหลอดไฟส่งผลต่ออุณหภูมิภายในตู้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ ให้ผลดีที่สุดในการรักษาอุณหภูมิในช่วง 48-52 องศาเซลเซียส เหมาะสมสำหรับการอบกล้วยหรืองานแปรรูปเกษตรที่ต้องการความร้อนคงที่ระดับปานกลางถึงสูง ค่าทางสถิติชี้ให้เห็นว่า กำลังวัตต์ของหลอดไฟส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิภายในตู้โดยตรง และเป็นปัจจัยที่ควรพิจารณาในการออกแบบระบบให้ความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพ

6. การทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมความชื้นของเนื้อกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อน ดังตารางที่ 6 (Table 6)

Table 6 Moisture value (percentage) of the dried banana according to the drying period in the temperature control cabinet for drying bananas.

Duration	Row	Humidity value	The Overall average of each period
Before baking	1	68.18± 0.80	68.55± 0.30
	2	68.56±1.16	
	3	68.45±0.87	
	4	69.01±1.02	
Bake for 8 hours	1	37.49± 6.19	35.89±1.16
	2	34.22±6.55	
	3	36.04±5.87	
	4	35.82±4.14	
Bake for 16 hours	1	16.51±2.17	15.90± 0.54
	2	15.11±0.84	
	3	15.73±1.35	
	4	16.26±1.14	
Baked for 16.5 hours	1	16.02±0.85	15.79 ± 0.19
	2	15.61±0.69	
	3	15.59±0.60	
	4	15.96±0.46	

จากตารางที่ 6 (Table 6) เมื่อวิเคราะห์ด้วยสถิติทดสอบสมมติฐาน The friedman two-way Analysis of variance by rank test พบว่า ค่าร้อยละความชื้นของเนื้อกล้วยในแต่ละช่วงเวลาของการอบ ได้แก่ ก่อนอบ หลังอบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังอบเป็นเวลา 16 ชั่วโมง และหลังอบเป็นเวลา 16.5 ชั่วโมง ด้วยสถิติ Friedman Two-Way Analysis of Variance by Rank ค่าสถิติทดสอบมีค่าเท่ากับ 11.10 ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ในตารางมาตรฐานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.815 และมีค่า p-value เท่ากับ 0.011 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละความชื้นของกล้วยในแต่ละช่วงเวลาอบ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ กล้วยที่อบในแต่ละช่วงเวลา มีปริมาณความชื้นที่ไม่เท่ากันอย่างชัดเจน และช่วงเวลาในการอบส่งผลต่อความชื้นของกล้วยจึงทำให้ระยะเวลาในการอบถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ลักษณะทางกายภาพของกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อน ดังภาพที่ 4 (Figure 4) เมื่ออบครบเวลา 16.5 ชั่วโมง โดยผู้ควบคุมอุณหภูมิสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อน ลักษณะทางกายภาพของกล้วยน้ำว้าอบแห้ง ยังคงรักษารูปร่างของผลกล้วยตามแนวยาวไม่มีการหดตัวหรือ

บิดเบี้ยวมากนัก ลักษณะของกล้วยแต่ละชิ้นมีความแบนราบสม่ำเสมอ แสดงถึงการควบคุมความร้อนที่มีความสม่ำเสมอระหว่างการอบ ผิวสัมผัสแห้ง สะอาด ไม่มีร่องรอยของคราบน้ำตาลเหนียวหรือสิ่งสกปรก พื้นผิวมีลักษณะเป็นมันเล็กน้อย บ่งชี้ถึงการเกิด Maillard reaction บางส่วนในระดับที่ไม่มาก ซึ่งช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความน่ารับประทานโดยไม่ไหม้เกรียม กล้วยมีสีเหลืองทองอมน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลกลางทั่วทั้งชิ้น สีค่อนข้างสม่ำเสมอ สะท้อนให้เห็นถึงการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงไม่มีร่องรอยของการแห้งกรังเป็นจุดหรือขอบแข็งเกินไป แสดงถึงความชื้นที่ลดลงอย่างสม่ำเสมอและไม่เกิดการไหม้ การจัดเรียงกล้วยบนแผ่นซิลิโคนรองอบที่มีช่องอากาศถ่ายเทได้ดี และทำให้เนื้อกล้วยไม่เกาะติดกับวัสดุรองอบ



Figure 4 Dried banana for drying 16.5 hours.

การคำนวณสมรรถนะการอบแห้ง (Drying Performance Indicators) ในการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการอบกล้วยน้ำว้าพันธุ์มะลิอ่อน ได้ทำการคำนวณตัวชี้วัดหลัก 3 รายการ ได้แก่ 1) อัตราการอบแห้ง (Drying Rate: DR) 2) พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง (Specific Energy Consumption: SEC) และ 3) อัตราการสกัดความชื้นจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate: SMER) ซึ่งคำนวณจากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นเฉลี่ยของกล้วยในแต่ละช่วงเวลาอบ ดังนี้

1. อัตราการอบแห้ง (Drying Rate: DR) อัตราการอบแห้งคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นเฉลี่ยระหว่างช่วงเวลาอบ โดยใช้สมการที่ (1)

$$DR = \frac{M_i - M_f}{t_f - t_i}$$

โดยที่ M_i และ M_f คือ ค่าความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้นและสิ้นสุดของแต่ละช่วง (%wet basis) และ $(t_f - t_i)$ คือ ระยะเวลาในการอบ (ชั่วโมง)

2. พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง (Specific Energy Consumption: SEC)

SEC หมายถึง ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากกล้วย 1 กิโลกรัม คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$SEC = \frac{P \times t}{m_{\text{water}}}$$

m_{water}

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้ารวมของหลอดให้ความร้อน (กิโลวัตต์) t คือ ระยะเวลาอบแห้งทั้งหมด (ชั่วโมง) และ m_{water} คือ มวลของน้ำที่ระเหยออก (กิโลกรัม)

3. อัตราการสกัดความชื้นจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate: SMER)

SMER เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอบ คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$SMER = \frac{m_{\text{water}}}{P \times t}$$

$P \times t$

โดยที่ m_{water} คือ มวลของน้ำที่ระเหยออก (กิโลกรัม)

จากผลการคำนวณในตารางที่ 7 (Tabel 7) พบว่า อัตราการอบแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 0-8 ชั่วโมง (4.083 %/h) ซึ่งเป็นช่วงที่มีการระเหยน้ำออกจากเนื้อกล้วยอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งลดลงเหลือ 2.499 %/h ในช่วง 8-16 ชั่วโมง และลดลงเหลือเพียง 0.220 %/h ในช่วงสุดท้าย (16-16.5 ชั่วโมง) แสดงให้เห็นถึงการเข้าสู่ระยะอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) ในด้านการใช้พลังงาน พบว่า ค่า SEC รวมเท่ากับ 5.27 kWh/kg น้ำที่ระเหย และค่า SMER รวมเท่ากับ 0.19 kg/kWh ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระดับเหมาะสม สำหรับระบบอบแห้งต้นแบบที่ใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน โดยส่วนใหญ่ของการระเหยน้ำเกิดขึ้นในช่วง 8 ชั่วโมงแรก ซึ่งเป็นช่วงที่กระบวนการอบมีประสิทธิภาพสูงสุด

Table 7 Drying Performance Indicators.

Drying interval (h)	Mid-time (h)	Δ Moisture (%wb)	DR (%wb/h)	Energy used (kWh)	Water evaporated (kg)	SEC (kWh/kg)	SMER (kg/kWh)
0-8	4.0	32.66	4.083	1.60	0.50944	3.141	0.318
8-16	12.0	19.99	2.499	1.60	0.11660	13.722	0.073
16-16.5	16.25	0.11	0.220	0.10	0.00049	204.71	0.0049
Overall	-	52.76	3.198	3.30	0.62653	5.267	0.1899

ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของตู้อบแห้งควบคุมอุณหภูมิสำหรับอบกล้วยน้ำว้า มะลิอ่อน พบว่า เครื่องอบต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นจากวัสดุพื้นฐานที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น มีต้นทุนการผลิตประมาณ 2,000 บาท ซึ่งต่ำกว่าเครื่องอบเชิงพาณิชย์ทั่วไป อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

ต่ำ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยเพียง 3.3 kWh ต่อรอบการอบ (16.5 ชั่วโมง) คิดเป็นค่าไฟฟ้าไม่เกิน 20 บาทต่อรอบ เมื่อวิเคราะห์ต้นทุนรวม (ค่าไฟฟ้า + วัตถุดิบ + ค่าแรง + ค่าเสื่อมราคา) ที่ระดับการอบขนาดเล็ก (1–5 กิโลกรัมต่อรอบ) ต้นทุนต่อหน่วยยังค่อนข้างสูง แต่เมื่อเพิ่มกำลังการผลิตเป็น 10 กิโลกรัมต่อรอบ จะเกิดผลประหยัดต่อขนาด (Economies of Scale) ช่วยลดต้นทุนต่อหน่วยลงอย่างชัดเจน และสามารถสร้างกำไรสุทธิได้ประมาณ 250 บาทต่อรอบ ซึ่งคิดเป็นระยะเวลาคืนทุนเพียง 10 รอบการอบ หรือประมาณ 2 สัปดาห์ หากดำเนินการอบทุกวัน ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าตู้อบต้นแบบนี้มีความคุ้มค่าในการลงทุนและสามารถสร้างผลตอบแทนได้จริงในระดับครัวเรือนหรือกลุ่มแม่บ้านในชุมชน ทั้งยังมีข้อเด่นด้านการซ่อมบำรุงง่าย ใช้วัสดุและเทคโนโลยีที่เข้าใจได้โดยไม่ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเฉพาะทาง จึงเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการส่งเสริมการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ชุมชน เพื่อเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร เช่น กล้วย เห็ด หรือสมุนไพร

อภิปรายผล

จากผลการศึกษาระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ค่าความชื้นเฉลี่ยต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Kruskal–Wallis, $p < 0.05$) ยืนยันว่าอุณหภูมิมีผลชัดเจนต่อคุณภาพความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยช่วงอุณหภูมิ 48–52 องศาเซลเซียส ให้ความชื้นสม่ำเสมอและเข้าเกณฑ์มาตรฐานกล้วยอบได้ดีที่สุด นอกจากนี้การทดสอบระยะเวลาที่อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้ระยะเวลาในการอบ 16.5 ชั่วโมง ให้ความชื้นต่ำสุดและสม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณาในบริบทของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงจากการใช้งานเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอยู่ในช่วง 30–40 องศาเซลเซียส และเครื่องอบแบบบังคับที่สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 45–65 องศาเซลเซียส ตามรายงานของ Taykhao & Teekasap (2013) และ Nabnean (2020) ที่รายงานว่าเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ให้ช่วงอุณหภูมิภายในประมาณ 33–58 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่สูงและคงที่มากขึ้นช่วยเร่งการลดความชื้นได้จริง อีกทั้งยังมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Faksri et al. (2024) ที่แสดงแนวโน้มความชื้นลดลงต่อเนื่องตาม อุณหภูมิและเวลา และเข้าใกล้จุดสมดุลเมื่ออบนานขึ้น เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Borirak et al. (2021) ที่ได้ศึกษากระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน ตั้งอยู่กับที่ใช้ตู้กระจก มีการสร้างลมร้อนจากฮีตเตอร์แบบครีป ขนาดกำลังไฟฟ้า 1800 วัตต์ ซึ่งทำงานโดยใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิ เปิดทดสอบ 24 ชั่วโมง ได้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อมีค่าเท่ากับ 51.86 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่สูงกว่ามากและมีความต่อเนื่องกว่า ขณะที่ตู้อบต้นแบบของงานนี้ใช้หลอดไฟทังสเตนกำลังต่ำ จึงมีความผันผวนตามสภาพแวดล้อมที่สูงกว่า แม้เครื่องอบแห้งควบคุมอุณหภูมิการอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อนต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะสามารถทำงานได้จริงภายใต้สภาพแวดล้อมระดับครัวเรือน และสามารถทำให้ความชื้นของกล้วยอบสุดท้ายอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 21 %wb) ได้ซึ่งค่าเฉลี่ยอุณหภูมิทั้งวันของตู้อบต้นแบบอยู่ที่ 43.68 ± 8.74 องศาเซลเซียส

แต่ข้อมูลระยะเวลาแสดงว่า ช่วงบ่ายหลายชั่วโมงอุณหภูมิอยู่ในย่าน 48–52 องศาเซลเซียส (เช่น อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 49.5 องศาเซลเซียส เวลา 16.00 น.) ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการระเหยน้ำได้มีประสิทธิภาพ และเพียงพอให้ความชื้นปลายกระบวนการเข้าเกณฑ์มาตรฐาน การเฉลี่ยทั้งวันทำให้ค่าเฉลี่ยต่ำลง เพราะรวมช่วงเริ่มต้นเช้าที่อุณหภูมิใกล้อุณหภูมิห้อง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดเชิงระบบ ได้แก่ (1) ค่ากำลังของหลอดไฟให้ความร้อนต่ำ (2) การสูญเสียความร้อนของผนังตู้หรือเกิดช่องว่างในช่วงรอยต่อของวัสดุหุ้มปิดตู้ (3) การกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอในแนวการวางสิ่งทดลองกับระยะห่างของหลอดไฟที่ให้พลังความร้อนออกมา ข้อจำกัดเหล่านี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตู้ เนื่องจากเครื่องต้นแบบมีขนาดเล็กและปริมาตรภายในจำกัด ทำให้อุณหภูมิภายในตู้มีความไวต่ออุณหภูมิแวดล้อมภายนอก อีกทั้งยังไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID หรือ duty-cycle ที่สามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 48–52 องศาเซลเซียส อย่างต่อเนื่องได้ตลอดการอบ ขณะเดียวกันฉนวนกันความร้อนและการซีลของตู้ยังไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนภายในตู้เพื่อยกระดับประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างเสถียรและเหมาะสมกับการใช้งานจริงในระดับชุมชน จึงมีข้อเสนอแนะให้ดำเนินการปรับปรุงในหลายด้าน ได้แก่ การเพิ่มฉนวนและการซีลขอบตู้ด้วยวัสดุอย่างโฟมพอลิหรือแถบกันรั่ว (weatherstrip) เพื่อรักษาความร้อนภายใน การปรับเพิ่มกำลังหลอดไฟ

โดยสรุป เครื่องอบแห้งควบคุมอุณหภูมิด้วยหลอดไฟต้นแบบในงานวิจัยนี้ถือเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือน หรือกลุ่มแม่บ้านในชุมชนชนบท ด้วยจุดเด่นด้านต้นทุนต่ำ ใช้วัสดุท้องถิ่น ขนาดของตู้เหมาะสมสำหรับการแปรรูป ผลผลิตทางการเกษตรในครัวเรือนหรือการแปรรูปผลิตภัณฑ์สำหรับชุมชน และสามารถพัฒนาเพิ่มเติมให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่าเครื่องอบเชิงพาณิชย์ได้ หากปรับปรุงระบบควบคุมอุณหภูมิและการกระจายความร้อนให้เหมาะสมยิ่งขึ้นในอนาคต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานนี้มีคุณภาพและความสะอาด ถูกสุขลักษณะ

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิและระยะเวลาการอบที่เหมาะสมต่อการลดความชื้นของกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อนให้อยู่ในเกณฑ์ที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เอสกล้วยอบ (มอก. เอส 95-2563) ตลอดจนออกแบบและพัฒนาตู้ควบคุมอุณหภูมิต้นแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานจริงในบริบทชุมชน ผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อน คือ ช่วง 48–52 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการอบที่เหมาะสมคือ 16.5 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดค่าร้อยละความชื้นของเนื้อกล้วยให้อยู่ในระดับต่ำกว่าค่าความชื้นสูงสุดที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเอสกล้วยอบ (มอก. เอส 95-2563) โดยไม่ทำให้เนื้อสัมผัสของกล้วยแห้งจนเกินไป ในส่วนของการออกแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิ พบว่า วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตตู้ ได้แก่ โพลีคาร์บอเนต

และกระจกใส โดยแบบผสมกระจก 4 ด้าน และโพลีคาร์บอเนต 2 ด้าน ให้สมดุลระหว่างประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อน ความแข็งแรง และความสะดวกในการใช้งานจริง ร่วมกับการใช้หลอดทั้งสแตนขนาด 100 วัตต์ เป็นแหล่งให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตู้อบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีขนาดกะทัดรัด เหมาะกับกลุ่มผู้ผลิตขนาดเล็กหรือระดับครัวเรือนในชุมชน ในด้านเศรษฐศาสตร์ของตู้อบแห้งควบคุมอุณหภูมิสำหรับอบกล้วยน้ำว้ามะลิองค์มีต้นทุนการผลิตเพียงประมาณ 2,000 บาท ใช้พลังงานเฉลี่ย 3.3 kWh ต่อรอบการอบ (16.5 ชั่วโมง) หรือคิดเป็นค่าไฟไม่เกิน 20 บาทต่อรอบ และสามารถคืนทุนได้ภายใน 10 รอบการใช้งาน (ประมาณ 2 สัปดาห์) โดยมีกำไรสุทธิเฉลี่ย 250 บาทต่อรอบ แสดงให้เห็นถึงคุณค่าและความเหมาะสมของเทคโนโลยีในการใช้งานระดับครัวเรือน และชุมชนชนบทเพื่อเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร งานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่สามารถระบุแนวโน้มทางเทคนิคที่เหมาะสมในการอบกล้วยตากให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน แต่ยังนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบที่สามารถต่อยอดเป็นเทคโนโลยีอย่างง่ายในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร ทั้งยังสอดคล้องกับวิถีการผลิตอาหารแปรรูปของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งจะช่วยส่งเสริมให้ชุมชนสามารถผลิตกล้วยตากได้มีคุณภาพตามสิ่งแวดล้อมธรรมชาติที่เป็นความเฉพาะของพื้นที่ และสร้างมูลค่าเพิ่มแก่ผลิตภัณฑ์ได้อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และอุปกรณ์พื้นฐานในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ และขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการสนับสนุนช่วยเหลือในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Aedtem P, Kamani N, Srisuk S, Suwanbandit K, Phalachai P, Ratanasiriwat P. The Effect of Ripening in *Musa sapientum* Lin. 'Kluai Hin' and Baking Conditions on Quality of Rolled Banana. YRU Journal of Science and Technology 2024;9(3):12-21.
- Akiyama M, Chong QP. Numerical Analysis of Natural Convection with Surface Radiation in a Square Enclosure. Numerical Heat Transfer Part A: Applications 1997;32(4):419-433.
- AOAC. Official Methods of Analysis. 25nd ed. Virginia; 1990.
- Asako Y, Nakamura H. Heat Transfer in a Parallelogram Shaped Enclosure. Bulletin of the JSME 1982; 25(207):1412-1418.
- Borirak T, Kotchapoom P, Sathienrungrasit W, Pooyoo N. The Hybrid Solar Dryer Cabinet. Veridian E-Journal Science and Technology Edition Eastern Asia University 2021;15(1):180-195.
- Chantavanich S. Qualitative Research Methods. Bangkok: Dansuttha Karn Phim; 2011.
- Faksri I, Imerb K, Lasudta N, Lasri S. Science Project Title: Drying kinetics of Ducasse Banana using tray and oven dryers. 2024. Available at:<https://kip.kmitl.ac.th/projects/clqlvq7e>. Accessed June 12, 2025.

- Jaekhom S, Namkhat A, Teeboonma U, Pumchumpol S, Witinantakit K, Boonthum K. Black Galingale Drying Using Hybrid Techniques. Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University. 4th Edition 2022;4(3):266-284.
- Maksuwan A. The Analysis of Variance Process and Non-Parametric Statistical Tests in Boutique Agricultural Experiments. Pathum Thani: Rangsit University Press; 2004.
- Maksuwan A. Application of the heat transfer for evaluated urban heat island intensity. Veridian E-Journal Science and Technology Silapakorn Univesity 2019;6(1):31-46.
- Nabnean S, Nimnuan P, Sanorchit O. Solar drying of banana using household solar dryer. Journal of Knowledge Exchange 2020;1(1):19-31.
- Phetchabun Provincial Office. Phetchabun Province 20-Year Development Goals (2023–2042), 2023. Available at: https://www.phetchabun.go.th/fileupload/download_plan/1692838578wrwgur2q.pdf. Accessed June 12, 2025.
- Poogungploy P. Effect of Black Galingale Drying by Microwave-Hot Air Combination on Drying Behavior, Temperature, Color, Shrinkage and Specific Energy Consumption. Journal of Science and Technology Mahasarakham University 2017;36(6):661-667.
- Pornchaloempong P, Rattanapanon N. Water activity, 2025. Available at: Water activity /Food Wiki | Food Network Solution. Accessed June 12, 2025.
- Somchua P. An Analysis of Learning Evaluation Processes in Science Strand: A Multi-Case Study Research Master Teachers and A Quantitative Research. M.S. thesis Chulalongkorn University; 2006.
- Taykhao A, Teekasap S. Natural Convection and Forced Convection Solar Dryers. Veridian E-Journal, Science and Technology Edition, Eastern Asia University 2013;7(1):23–31.
- Thai Customs. The Agricultural Statistic of Thailand, 2015. Available at: http://organic.dit.go.th/FIE/CONTENT_FILE/256010251137581209704.pdf. Accessed June 12, 2025.
- Thai Industrial Standards Institute Ministry of Industry. Thai SMEs Standard TIS S 95–2563: Dried Banana. 2020.
- Tubklang R, Sumana B, Hirankerd W. Effects of Drying Temperature and Time on Product Qualities of Canded Santol. Research Journal 2021;12(1):1-11.
- Tubtimsi P, Kengkunthot R, Silversmith D. The production of dried Musa sapientum Linn, by Infrared combine with hot air. Academic Meeting at Kamphaeng Phet Rajabhat University. 3rd 2016;3(1):535-546. Available at: <https://www.tisi.go.th/assets/website/pdf/tiss/95-2563.pdf>. Accessed June 12, 2025.