

การกำหนดสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมของกล้วยตากโดยใช้ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

Determination of Optimal Hot-Air Drying Conditions for Dried Bananas Using Design of Experiments

ชนาธิป กาลจักร¹ ยุทธณรงค์ จงจันทร² จตุพล พิสิษฐ์ศักดิ์³ ภูมิ พรประเสริฐ⁴ เกียรติศักดิ์ พระเนตร⁵
ดนัย สอนสุภาพ⁶ สราวุธ อิศรานูวัฒน์⁷ และ สมภาร ดอนจันดา^{8*}

Chanathip Kalchuk¹, Yuthanarong Jongjun², Jatuphon Pisitsak³, Peema Pornprasert⁴,
Kiattisak Pranet⁵, Danai Sornsuphap⁶, Sarawut Itsaranuwat⁷ and Sompan Donchanda^{8*}

^{1,6}สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น

^{2,3}สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์และกระบวนการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

⁴สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

⁵สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

⁷สาขาวิชาออกแบบผลิตภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

^{8*}สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

^{1,6}Department of Industrial Technical Education Faculty of Technical Education Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen Campus

^{2,3}Department of Logistics and Process Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

⁴Department of Technology Engineering, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchatani Rajabhat University

⁵Department of Logistics Management, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchatani Rajabhat University

⁷Department of Product Design, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

^{8*}Department of Mechanical and Production Engineering, Faculty of Industrial Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University

*Email: donchandasompan@gmail.com

Received: December 1, 2025; Revised: April 7, 2026; Accepted: April 9, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาความไม่คงที่ของคุณภาพผลิตภัณฑ์กล้วยตากของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนคนรักวังตะเคียน ซึ่งเป็นผลมาจากการพึ่งพาพลังงานจากแสงอาทิตย์ตามธรรมชาติในกระบวนการอบแห้ง เพื่อควบคุมสภาวะการผลิตให้ได้มาตรฐาน ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลาได้อย่างแม่นยำและคงที่หลังจากพัฒนาอุปกรณ์แล้ว ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีทางสถิติของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลักสองประการ ได้แก่ อุณหภูมิการอบที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการอบที่ 4, 6, และ 8 ชั่วโมง ตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการประเมินคุณภาพ คือ ความชื้น (%wb) และคะแนนเนื้อสัมผัสของกล้วยตาก ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (p-value < 0.05) ยืนยันว่าทั้งอุณหภูมิและเวลาในการอบมีปฏิสัมพันธ์และอิทธิพลหลักต่อคุณสมบัติเชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยสภาวะการอบที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 20% (wb) และคะแนนเนื้อสัมผัสที่ดีที่สุด (4.5 จาก 5) งานวิจัยนี้เสนอแนวทางที่สามารถใช้ได้จริงและยั่งยืน โดยการบูรณาการการออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมได้เข้ากับการใช้หลักการทางสถิติเพื่อยกระดับมาตรฐานคุณภาพและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนอย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิจัยนี้สามารถลดความแปรปรวนของคุณภาพผลิตภัณฑ์ และเป็นแนวทางมาตรฐานที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตของวิสาหกิจชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : กล้วยตาก, สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม, ความชื้น, การออกแบบการทดลอง

Abstract

This research focuses on addressing the issue of quality instability in the dried banana products of the "Khon Rak Wang Takiang" community enterprise, which results from reliance on natural solar energy in the drying process. To standardize the production process, the researcher designed and developed a hot-air drying device that can precisely and consistently control temperature and time. After the development of the equipment, the researcher applied statistical methods for factorial design to analyze the influence of two main factors: drying temperature at 50°C, 60°C, and 70°C, and drying time at 4, 6, and 8 hours. The response variables used for quality evaluation were moisture content (%wb) and texture score of the dried bananas. The statistical analysis (p -value < 0.05) clearly confirmed that both drying temperature and time have significant interactions and main effects on the quality attributes of the product. The optimal drying condition was determined to be 60°C for 6 hours, resulting in a final moisture content of 20% (wb) and the best texture score of 4.5 out of 5. This research presents a practical and sustainable approach by integrating a controllable drying device with statistical principles to enhance quality standards and improve the production process of the community enterprise efficiently. The findings of this study can reduce variability in product quality and serve as a standard guideline that can be effectively applied in the production processes of community enterprises.

Keywords : Dried Bananas, Optimal Drying Conditions, Moisture Content, Design of Experiments

1. บทนำ

การผลิตกล้วยตากเป็นหนึ่งในกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในชุมชนท้องถิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ซึ่งถือเป็นกลไกสำคัญในการสร้างรายได้และส่งเสริมเศรษฐกิจฐานรากของประเทศ อย่างไรก็ตาม หนึ่งในปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์กล้วยตาก คือ การพึ่งพาพลังงานจากแสงอาทิตย์ตามธรรมชาติในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งมีความผันแปรตามสภาพอากาศและไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิหรือระยะเวลาในการอบได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพไม่คงที่ ทั้งในด้านความชื้น เนื้อสัมผัส และอายุการเก็บรักษา กลุ่มวิสาหกิจชุมชนคนรักวังตะเคียน อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นหนึ่งในกลุ่มที่ประสบปัญหาดังกล่าวมาโดยตลอด แม้จะมีความเชี่ยวชาญในการผลิตกล้วยตากจากประสบการณ์ แต่ข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีการอบแห้งยังเป็นอุปสรรคต่อการยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานที่ยอมรับในเชิงพาณิชย์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการพัฒนาอุปกรณ์อบแห้งหรือวิธีการอบแห้งในหลายรูปแบบ โดยเฉพาะการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งที่ได้รับการศึกษาและพัฒนามาแล้วมากมาย เช่น งานวิจัยของ ถกกรัตน์ ทักขิมา ปิยุพงษ์ ยุงเพชร และ ปณิธิ สุวรรณอมรเลิศ [1] ที่พัฒนาอุปกรณ์อบแห้งเพื่อผลิตปลาตากแดดเดียว โดยใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ “รุ่นหลังเต่า”

ซึ่งผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีและสามารถคงความสดใหม่ได้ในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ยังขาดการนำเสนอวิธีการควบคุมสภาวะอย่างเป็นระบบผ่านการออกแบบการทดลอง (DOE) ซึ่งจะช่วยให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพอย่างต่อเนื่อง อีกตัวอย่างหนึ่ง คือ งานวิจัยของกรมส่งเสริมการเกษตร [2] ที่พัฒนาผลิตภัณฑ์เกษตรแปรรูปของวิสาหกิจชุมชน โดยเน้นการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ กระบวนการผลิต และมาตรฐานคุณภาพสินค้า วิสาหกิจชุมชนที่เข้าร่วมโครงการได้รับการสนับสนุนทางด้านเทคนิคและงบประมาณเพื่อนำไปพัฒนากระบวนการผลิตและเพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตรแปรรูป ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิสาหกิจชุมชนสามารถเพิ่มศักยภาพทางการตลาดและความสามารถในการแข่งขันได้ แต่ยังขาดการควบคุมและจัดการกระบวนการผลิตให้มีความสม่ำเสมอในการผลิตสินค้าให้ได้มาตรฐานการวิจัยนี้จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาอุปกรณ์อบแห้งที่สามารถควบคุมสภาวะการผลิตได้อย่างแม่นยำ โดยการออกแบบและประยุกต์ใช้ระบบอบลมร้อนที่สามารถกำหนดอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบได้อย่างชัดเจน ซึ่งจะช่วยลดความแปรปรวนในการผลิตและยกระดับมาตรฐานคุณภาพของกล้วยตากให้คงที่ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตได้จริงในกลุ่มวิสาหกิจชุมชน แม้จะมีการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งในหลายแง่มุม แต่ยังขาดการใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (DOE) อย่างเป็น

ระบบในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตของวิสาหกิจชุมชน โดยการนำ DOE มาใช้ในงานวิจัยนี้จะช่วยในการค้นหาสภาวะการอบที่เหมาะสมที่สุดและสามารถควบคุมการผลิตได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์อบแห้งที่สามารถควบคุมสภาวะได้และการประยุกต์ใช้ DOE เพื่อยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์กล้วยตาก และสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในวิสาหกิจชุมชนอย่างยั่งยืน

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนและกำหนดสภาวะการอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์กล้วยตากโดยการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) เป้าหมายเพื่อยกระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนอย่างยั่งยืน

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต

การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตเป็นแนวทางสำคัญในการลดต้นทุน เพิ่มผลผลิต และควบคุมคุณภาพสินค้าให้ได้มาตรฐานสม่ำเสมอ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระบบการผลิตแบบ (Lean Manufacturing) ที่ช่วยลดของเสียและเพิ่มความรวดเร็ว การบริหารจัดการคุณภาพโดยรวม (Total Quality Management) [3] ที่เน้นการพัฒนาในด้านคุณภาพต่อเนื่องและแนวคิดหลักการในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตซิกซิกมา (Six Sigma) [4] ช่วยลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำนอกจากนี้ยังมีการใช้ระบบอัตโนมัติและระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Automation & Internet of Things) เป็นทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังมีแนวคิดในการบริหารจัดการวัตถุดิบ (Material Requirement Planning) ช่วยลดของเสียจากการใช้วัตถุดิบสำหรับการผลิตปลาแดดเดียว การนำเทคโนโลยีอบแห้งที่ควบคุมความชื้นแทนการพึ่งพาแสงแดด สามารถช่วยลดระยะเวลาในการผลิตและเพิ่มคุณภาพของสินค้าให้ได้มาตรฐานการตลาดที่สูงขึ้น [5]

2.2 ความชื้นสุดท้าย

ความชื้นสุดท้าย (Final Moisture Content) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพ อายุการเก็บรักษา และความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อบแห้ง เช่น อาหารแปรรูป เมล็ดพืช และสมุนไพร หากค่าความชื้นสูงกว่าที่กำหนดอาจก่อให้เกิดการเจริญของจุลินทรีย์หรือเชื้อรา ในขณะที่ค่าความชื้นที่ต่ำเกินไปอาจทำให้ผลิตภัณฑ์เปราะบางและเสียคุณค่าทางโภชนาการ [6] ความชื้นสมดุล (Equilibrium

Moisture Content: EMC) ทำหน้าที่ควบคุมความเสถียรของผลิตภัณฑ์ในสภาวะแวดล้อม โดยช่วยลดปัญหาการดูดซับหรือสูญเสียความชื้นในระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้การอบแห้งแบบดั้งเดิม เช่น การตากแดด แม้จะประหยัดพลังงาน แต่มีข้อจำกัดด้านการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น จึงมักให้ผลผลิตที่ไม่สม่ำเสมอ ในทางกลับกันการอบแห้งด้วยลมร้อนหรือการใช้เตาอบควบคุมอุณหภูมิสามารถลดระยะเวลาในการอบ และให้ค่าความชื้นสุดท้ายที่แม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเมื่อผสานกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้น และระบบ IoT ที่ช่วยควบคุมกระบวนการได้แบบเรียลไทม์ [7] ยิ่งกว่านั้นอุปกรณ์วัดความชื้น เช่น Moisture Meters หรือเทคนิค Near-Infrared Spectroscopy (NIR) ยังช่วยยืนยันคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างแม่นยำ

2.3 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยการตั้งคำถาม 5 Whys

การตั้งคำถาม “ทำไม ทำไม” (5 Whys) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์รากเหง้าของปัญหา (Root Cause Analysis) ที่พัฒนาโดย Sakichi Toyoda และใช้ในระบบ Toyota Production System (TPS) โดยมีหลักการตั้งคำถามซ้ำ ๆ ด้วยคำว่า “ทำไม” อย่างน้อย 5 ครั้ง เพื่อค้นหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา เทคนิคนี้ช่วยให้องค์กรสามารถระบุสาเหตุเชิงลึกและแก้ไขได้อย่างตรงจุด เช่น หากเครื่องจักรหยุดทำงาน การถามคำถาม “ทำไม” ครั้งแรกอาจพบว่าสาเหตุคือมอเตอร์ขัดข้อง แต่เมื่อถามต่อไปอีก อาจพบว่าสาเหตุที่แท้จริงคือการขาดแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ข้อดีของเทคนิคนี้คือความเรียบง่าย ใช้งานได้ทันที และเหมาะสมสำหรับปัญหาที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม เมื่อนำไปใช้กับปัญหาที่ซับซ้อน ควรใช้ร่วมกับเครื่องมืออื่น เช่น Ishikawa Diagram เพื่อความแม่นยำมากขึ้น หลังจากวิเคราะห์ด้วย 5 Whys แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการแก้ไขปัญหาด้านเหตุ เช่น การจัดทำแผน PM หรืออบรมพนักงานเพื่อป้องกันการเกิดซ้ำ ทำให้เทคนิคนี้เป็นเครื่องมือสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตอย่างยั่งยืน [8]

2.4 กำหนดแนวทางการแก้ไขด้วยการตั้งคำถาม 5W1H

เทคนิค 5W1H เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา โดยใช้คำถาม 6 ข้อ ได้แก่ What (ทำอะไร), Why (ทำไม), Who (ใคร), Where (ที่ไหน), When (เมื่อไหร่) และ How (อย่างไร) เพื่อตรวจสอบและระบุสาเหตุรากเหง้าของปัญหา เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบและเข้าใจถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหา ช่วยในการตัดสินใจที่มีข้อมูลสนับสนุนอย่างเพียงพอ งานวิจัยของ [9] นำเทคนิคนี้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

เฟอร์นิเจอร์เพื่อระบุสาเหตุของความสูญเสีย เช่น การขนย้ายวัสดุที่ไม่จำเป็นและการใช้ทรัพยากรอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ 5W1H สามารถลดของเสียลงได้ถึง 15% และเพิ่มกำลังการผลิตได้ถึง 20% โดยการตั้งคำถามเชิงโครงสร้างช่วยในการระบุปัญหาหลักและแนวทางการปรับปรุงอย่างตรงจุด นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังช่วยลดการใช้พลังงานและทรัพยากร ซึ่งส่งเสริมความยั่งยืนในอุตสาหกรรมการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์

การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์เป็นกระบวนการที่รวมหลักการทางวิศวกรรม ศาสตร์วัสดุ และนวัตกรรมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพและใช้งานได้จริง การออกแบบเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้และข้อกำหนดทางเทคนิค จากนั้นนักวิจัยจะใช้แนวคิดทางทฤษฎี เช่น ทฤษฎีฟังก์ชันเพื่อศึกษาคุณสมบัติวัสดุและเทคนิคปัญญาประดิษฐ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบ การพัฒนาอุปกรณ์มักต้องอาศัยกระบวนการทดลองและการทดสอบซ้ำเพื่อปรับปรุงการทำงานเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง เช่น เครื่องกลไฟฟ้า พลศาสตร์ของไหล และการประมวลผลสัญญาณ มีบทบาทสำคัญในกระบวนการพัฒนา นอกจากนี้ การออกแบบที่ดีต้องคำนึงถึงความยั่งยืนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันการพัฒนาอุปกรณ์ใหม่ได้รับอิทธิพลจากแนวโน้มอุตสาหกรรม 4.0 ซึ่งเน้นการผลิตอัจฉริยะและการใช้วัสดุขั้นสูงในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ [10]

2.6 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) เป็นวิธีทางสถิติที่ใช้วางแผนและวิเคราะห์การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (independent variables) และตัวแปรตอบสนอง (response variables) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์ ลดความคลาดเคลื่อน และค้นหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต ตัวอย่างของเทคนิคในการออกแบบการทดลองที่ใช้บ่อยๆ ได้แก่ แบบแฟกทอเรียลสมบูรณ์ (Full Factorial Design) ซึ่งคล้ายงานวิจัยของ Avci, A., Çetinbaş, A., & Karakaya, H. [11] ได้ประยุกต์ใช้ แบบแฟกทอเรียลสมบูรณ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของผลสตรอว์เบอร์รี่ในระบบ Solar Chimney Collector โดยวิเคราะห์ผลของ อุณหภูมิและเวลาในการอบ ต่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ พบว่าการวางตำแหน่งผลิตภัณฑ์ภายในระบบอบและระดับพลังงานความร้อนที่จ่าย มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการลดความชื้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือ

สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง และควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้อย่างแม่นยำ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและเพิ่มคุณภาพของสินค้าสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย จึงมีงานวิจัยมากมายที่เป็นแนวทางในการปรับปรุง เช่น

งานวิจัย Chaudhari และ Salve [12] ทำการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารและสินค้าเกษตรต่าง ๆ โดยเน้นไปที่หลักการทำงานประเภทของเครื่องอบแห้งและประสิทธิภาพของระบบที่แตกต่างกัน งานวิจัยระบุว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้ง ลดการสูญเสียสารอาหาร และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์มากกว่าการตากแดดแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมความร้อนและการไหลเวียนของอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง บทความนี้ยังได้เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบแอคทีฟ (ที่ใช้พัดลมช่วย) และแบบพาสซีฟ (อาศัยการไหลเวียนอากาศธรรมชาติ) พร้อมทั้งเน้นถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มของแสงแดด ผลการศึกษาพบว่า การนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น ระบบเซ็นเซอร์และพลังงานทดแทนมาใช้ร่วมกันสามารถช่วยให้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานได้ดียิ่งขึ้น สุดท้าย ผู้วิจัยเสนอแนะว่าควรพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบเครื่องอบแห้งให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและความต้องการของผู้ใช้ในแต่ละพื้นที่เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดงาน

งานวิจัยของ Luginasin, Peña และ Dumlaog [13] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลายชั้น (Multilevel Solar Dryer) ที่มีการผนวกเข้ากับ Internet of Things (IoT) เพื่อควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และเวลาแบบเรียลไทม์ ระบบนี้ใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดสถานะและส่งข้อมูลไปยัง ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control System) เพื่อปรับการทำงานของพัดลมและช่องระบายอากาศได้ทันที จึงเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแม่นยำสูงในการควบคุมความชื้น การใช้ IoT ทำให้สามารถ มอนิเตอร์และจัดการกระบวนการจากระยะไกลผ่านแอปพลิเคชัน พร้อมจัดเก็บข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์และปรับปรุงในเชิงประสิทธิภาพ ลดเวลาการอบได้เฉลี่ย 20%–30% เมื่อเทียบกับวิธีเดิมและรักษาคุณภาพด้านสีและพื้นผิวได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ถือเป็นตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ IoT เพื่อยกระดับการผลิตทางการเกษตรให้มีประสิทธิภาพ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สํารวจกระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตกล้วยตากของชุมชนคนรักวังตะเคียน เริ่มต้นจากการคัดเลือก กล้วยน้ำว้า ที่มีคุณภาพดี โดยเลือกผลที่มีอายุการสุกประมาณ 5-7 วันหลังการตัดจากต้น มีลักษณะเปลือกสีเหลืองอมเขียว เนื้อแน่น ไม่ช้ำ และไม่มีร่องรอยของการเน่าเสีย ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กล้วยที่ตัดจากต้นและพร้อมแปรรูป

กล้วยที่ใช้ในการทดลองมีน้ำหนักเฉลี่ยต่อผลประมาณ 100-150 กรัม และมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 65-70% ซึ่งเหมาะสมต่อการนำมาศึกษากระบวนการลดความชื้นด้วยวิธี การตากแดดแบบธรรมชาติ ปัจจุบันกลุ่มวิสาหกิจชุมชนยังคงใช้วิธี การตากแดดจากธรรมชาติ เป็นหลัก โดยนำกล้วยที่ปอกเปลือกแล้ววางเรียงบนถาดตากในที่โล่งแจ้ง ให้ได้รับแสงแดดโดยตรง กระบวนการถ่ายเทความร้อนเกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้เกิดการระเหยน้ำออกจากเนื้อกล้วยอย่างค่อยเป็นค่อยไป แม้ว่าวิธีการตากแดดจะเป็นวิธีที่ประหยัดและไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าแต่ก็มีข้อจำกัดในด้านการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งอาจทำให้คุณภาพของกล้วยตากไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละวัน เช่น แดดจัด เมฆมาก หรือฝนตก ซึ่งอาจทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่แห้งสนิท เกิดเชื้อรา หรือสูญเสียคุณลักษณะทางกายภาพขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบในการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การตากกล้วยของชุมชนในปัจจุบัน

3.2 วิเคราะห์ปัญหาด้วยเทคนิค 5 Whys

จากการสำรวจกระบวนการผลิตกล้วยตากของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนคนรักวังตะเคียน พบว่าปัญหาหลักคือความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ และ ระยะเวลาการตากที่ใช้เวลานาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการพึ่งพาแสงแดดธรรมชาติในการอบแห้ง ทำให้ไม่สามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้อย่างสม่ำเสมอและแม่นยำ เพื่อให้เข้าใจรากของปัญหาอย่างละเอียด ผู้วิจัยได้ใช้ เทคนิค 5 Whys เพื่อวิเคราะห์สาเหตุเชิงลึก โดยการตั้งคำถาม “ทำไม” ซ้ำ ๆ จนสามารถระบุสาเหตุหลักได้ดังนี้:

คำถาม: ทำไมกล้วยตากจึงมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ

คำตอบ: เพราะระยะเวลาในการตากแต่ละครั้งไม่คงที่

คำถาม: ทำไมระยะเวลาการตากจึงไม่คงที่

คำตอบ: เพราะต้องพึ่งพาแสงแดดธรรมชาติ

คำถาม: ทำไมแสงแดดจึงแปรปรวน

คำตอบ: เพราะสภาพอากาศเปลี่ยนแปลง เช่น มีเมฆ ฝน หรือแดดไม่สม่ำเสมอ

คำถาม: ทำไมจึงไม่มีวิธีควบคุมสภาพการตากให้คงที่ได้

คำตอบ: เพราะยังไม่มีระบบอบแห้งที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้

คำถาม: ทำไมยังไม่มีการใช้ระบบอบแห้งที่ควบคุมได้

คำตอบ: เพราะชุมชนยังคงใช้วิธีดั้งเดิมที่ไม่ต้องพึ่งพาเครื่องจักรหรือเทคโนโลยีระบบ

ผลการวิเคราะห์: สาเหตุหลักที่ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอคือการพึ่งพาสภาพอากาศธรรมชาติทำให้ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอย่างเหมาะสม ส่งผลให้การผลิตกล้วยตากไม่เป็นไปตามมาตรฐานและมีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์

จากการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเทคนิคการตั้งคำถาม 5 Whys พบปัญหาหลักคือความชื้นของผลิตภัณฑ์ไม่คงที่ สาเหตุสำคัญเกิดจากการพึ่งพาสภาพอากาศธรรมชาติที่แปรปรวนขาดระบบควบคุมความร้อนและความชื้นที่เหมาะสม และมีการจัดการปริมาณการผลิตไม่สอดคล้องกับพื้นที่ตาก ส่งผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ลดลงและไม่เป็นมาตรฐาน ผู้วิจัยเลือกใช้เทคนิคการตั้งคำถาม 5W1H กำหนดแนวทางแก้ไข ดังนี้

1. แก้ไขปัญหาความชื้นสุดท้าย:

What: ปัญหาความชื้นไม่คงที่ เสี่ยงต่อเชื้อราและคุณภาพ

Why: พึ่งพาแสงธรรมชาติ ไม่มีระบบควบคุมความชื้น

Who: ทีมวิจัยและสมาชิกวิสาหกิจชุมชน

Where: ที่ทำการวิสาหกิจชุมชนคนรักวังตะเคียน

When: พัฒนาและทดสอบภายใน 1 เดือน

How: พัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนพลังงานทดแทนและทดสอบการอบกล้วยให้มีความชื้นตามมาตรฐาน

2. แก้ไขปัญหาการใช้เวลาตกนาน:

What: ความชื้นไม่คงที่ เสี่ยงต่อเชื้อราและคุณภาพ

Why: พืชสภาพอากาศธรรมชาติ ไม่มีระบบควบคุม

Who: ทีมวิจัยและสมาชิกวิชาหลัก

Where: ที่ทำการวิสาหกิจชุมชนคนรักวังตะเคียน

When: พัฒนาและทดสอบภายใน 1 เดือน

How: พัฒนาอุปกรณ์อบลมร้อนพลังงานทดแทนและทดสอบการอบกล้วยให้ได้ความชื้นตามมาตรฐาน

จากข้อมูล ผู้วิจัยได้ดำเนินการ จัดสร้างอุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาลาโบลาดม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อุปกรณ์อบลมร้อนแบบพาลาโบลาดมต้นแบบ

ตารางที่ 1 ตัวแปรในการทดลอง

Factors	Levels	Responses
อุณหภูมิ	50°C, 60°C, 70°C	ความชื้น (%wb)
เวลา	4 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง	คะแนนเนื้อสัมผัส

3.4 การประเมินคุณภาพ

การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์กล้วยตากจะใช้ การประเมินเชิงประสาทสัมผัส (Sensory Evaluation) ร่วมกับการวัดเชิงวัตถุ (Instrumental Measurement) เช่น การใช้เครื่องมือวัดความชื้นและการทดสอบเนื้อสัมผัสของกล้วยตาก เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการประเมินคุณภาพ ผู้วิจัยจะ:

- เพิ่มจำนวนผู้ประเมิน: จำนวนผู้ประเมินจะเพิ่มขึ้นเป็น 10-15 คน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือ
- ใช้การวิเคราะห์ความสอดคล้องของผู้ประเมิน: ใช้ Cronbach's alpha เพื่อประเมินความสอดคล้อง
- การใช้เครื่องมือวัดความชื้น: เครื่องมือวัดความชื้นจะถูกใช้ควบคู่ไปกับการประเมินเชิงประสาทสัมผัส เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการประเมิน

3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ผู้วิจัยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab และวิธี ANOVA (Analysis of Variance) เพื่อ

3.3 การออกแบบการทดลองและการเก็บข้อมูล

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design 3^2 ซึ่งเป็นการออกแบบที่ช่วยวิเคราะห์ผลกระทบจากหลายปัจจัยพร้อมกัน เพื่อกำหนดสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งกล้วยตาก

รายละเอียดของการออกแบบการทดลอง (DOE):

- ประเภทการทดลอง: Full Factorial Design (3^2)
- ระดับของปัจจัย: อุณหภูมิ: 50°C, 60°C, 70°C
- เวลา: 4 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง
- จำนวนชุดทดลองทั้งหมด: 9 ชุดทดลอง (เนื่องจากมี 3 ระดับของอุณหภูมิ $\times$ 3 ระดับของเวลา)
- การสุ่มลำดับการทดลอง: เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการลำดับทดลอง ผู้วิจัยทำการสุ่มลำดับการทดลอง
- การทำซ้ำ: การทดสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อชุดการทดลอง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความแม่นยำในการเก็บข้อมูล

เหตุผลในการเลือกการทำซ้ำ: การทำซ้ำช่วยลดความแปรปรวนจากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ และทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ดังตารางที่ 1

ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้อาจสามารถตัดสินใจเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ ประกอบด้วย

- ซอฟต์แวร์ที่ใช้: Minitab
- วิธีการที่ใช้: ANOVA (Analysis of Variance)
- เกณฑ์การตัดสินใจสำคัญ: ใช้ $\alpha = 0.05$ เพื่อพิจารณาว่าผลลัพธ์มีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่

3.6 สรุปวิธีวิจัย

การ Full Factorial Design 3^2 ร่วมกับการประเมินคุณภาพและการวิเคราะห์ทางสถิติ ผู้วิจัยสามารถกำหนดสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งกล้วยตากเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพคงที่และลดเวลาในการอบ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ช่วยลดความแปรปรวนในกระบวนการผลิตและยกระดับมาตรฐานคุณภาพของผลิตภัณฑ์กล้วยตากในวิสาหกิจชุมชน

3.7 ผลการทดลอง

ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการทดลอง:

การทดลอง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความชื้นสุดท้าย (%wb)	ลักษณะ/รสชาติ	ต้นทุนพลังงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
1	50	4	30	เนื้อนุ่มมาก, สีดี, แต่ความชื้นสูงไป	ต่ำ
2	50	6	25	คงโครงสร้างเนื้อกล้วย, สีสวย, เหนียวนุ่มดีที่สุดใน	ปานกลาง
3	50	8	20	เนื้อเริ่มแข็งขึ้นเล็กน้อย, สีเข้มขึ้น	ปานกลาง
4	60	4	25	เนื้อเริ่มแข็ง, แห้งเร็วเกินไป	ปานกลาง
5	60	6	20	เนื้อเหนียวนุ่ม, สีเหลืองทองสวย, รสชาติดีที่สุดใน	สูง
6	60	8	15	เนื้อค่อนข้างแข็ง, สีเริ่มคล้ำ	สูง
7	70	4	20	เนื้อแข็งมาก, รสชาติเริ่มเปลี่ยน	สูง
8	70	6	15	เนื้อแข็งกระด้าง, รสชาติแห้งเกินไป	สูง
9	70	8	10	เนื้อแห้งกรอบ, บางส่วนอาจไหม้เกรียม	สูงมาก

3.8 สรุปผลการทดลอง

การทดลองอบกล้วยตากมีการควบคุมอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการอบ พบว่ามีผลกระทบโดยตรงต่อความชื้นสุดท้ายและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยรายละเอียดผลการทดลองและการวิเคราะห์สถิติมีดังนี้:

3.8.1 การวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้คือ ANOVA (Analysis of Variance) เพื่อทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการอบต่อค่าความชื้นสุดท้ายและคะแนนคุณภาพของกล้วยตาก โดยค่า p-value สำหรับแต่ละปัจจัยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปปัจจัยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย

ปัจจัย	ค่า p-value	R ²	R ² (adj)
อุณหภูมิ	0.001	0.85	0.82
เวลา	0.005	0.87	0.83
ปฏิสัมพันธ์	0.03	0.89	0.86

จากตารางที่ 3 ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ในทุกปัจจัยและปฏิสัมพันธ์ ซึ่งแสดงว่ามีผลกระทบทางสถิติที่มีนัยสำคัญต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ R² และ R²(adj) สูงแสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง

อุณหภูมิ, เวลา และคุณภาพผลิตภัณฑ์ อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือในการคาดการณ์ผลลัพธ์จากปัจจัยที่ศึกษา

3.8.2 การวิเคราะห์ผลคะแนนคุณภาพสำหรับเนื้อสัมผัสและสีของกล้วยตากได้รับการประเมินและนำเสนอในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ SD ดังตารางที่ 4

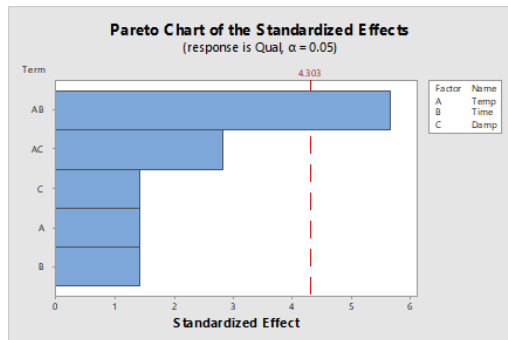
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คะแนนคุณภาพ

การทดลอง	คะแนนเนื้อสัมผัส (เฉลี่ย $\pm$ SD)	คะแนนสี (เฉลี่ย $\pm$ SD)
1	3.2 $\pm$ 0.3	4.1 $\pm$ 0.2
2	4.1 $\pm$ 0.2	4.5 $\pm$ 0.1
3	3.8 $\pm$ 0.4	4.3 $\pm$ 0.3
4	2.5 $\pm$ 0.3	3.2 $\pm$ 0.4

4. การยืนยันผลทางสถิติ

4.2 การวิเคราะห์แผนภูมิพาเรโต

การทดลองและการพิจารณาความสัมพันธ์ทั้งหมดจาก 3 ปัจจัยหลัก (Main Factors) สามารถแสดงผลกระทบที่มีต่อผลิตภัณฑ์ได้ด้วยแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ดังแสดงใน รูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภูมิพาเรโตของผลกระทบมาตรฐาน

จากรูปที่ 4 แผนภูมิพาเรโตของผลกระทบมาตรฐาน (Standardized Effects) แสดงให้เห็นขนาดและนัยสำคัญทางสถิติของผลกระทบจากปัจจัยหลัก (อุณหภูมิ, เวลา, ความชื้น) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านั้นต่อตัวแปรตาม (Response: คุณภาพของกล้วยตาก) โดยพิจารณาที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ (เส้นประสีแดง) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ามีเพียง 3 ผลกระทบที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการควบคุมคุณภาพของกล้วยตาก:

- 1) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา: ผลกระทบที่มีขนาดใหญ่ที่สุดและมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างชัดเจน
- 2) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้น: ผลกระทบที่มีขนาดรองลงมาและมีนัยสำคัญทางสถิติ
- 3) ปัจจัยหลักอุณหภูมิ: เป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ปัจจัยเวลา (Time) ความชื้น (Damp) และปฏิสัมพันธ์อื่น ๆ (เช่น TC, ATC) ไม่ส่งผลต่อคุณภาพกล้วยตากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่าผลกระทบต่ำกว่าเส้น t-valueวิกฤต โดยความชื้นมีผลกระทบต่ำที่สุด แสดงว่าไม่ได้มีบทบาทสำคัญในการควบคุมคุณภาพ และอาจต้องพิจารณาปัจจัยหรือเทคนิคอื่นเพิ่มเติม แสดงดังรูปที่ 5

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	11.5000	2.3000	9.20	0.101
Linear	3	1.5000	0.5000	2.00	0.350
Temp	1	0.5000	0.5000	2.00	0.293
Time	1	0.5000	0.5000	2.00	0.293
Damp	1	0.5000	0.5000	2.00	0.293
2-Way Interactions	2	10.0000	5.0000	20.00	0.048
Temp*Time	1	8.0000	8.0000	32.00	0.030
Temp*Damp	1	2.0000	2.0000	8.00	0.106
Error	2	0.5000	0.2500		
Total	7	12.0000			

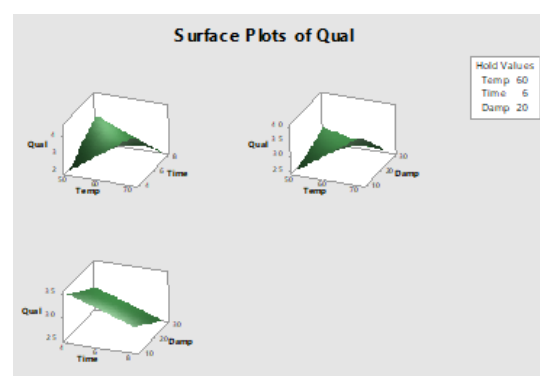
Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.5	95.83%	85.42%	33.33%

Regression Equation in Uncoded Units

Qual = -21.25 + 0.4250 Temp + 2.875 Time + 0.275 Damp - 0.05000 Temp*Time - 0.00500 Temp*Damp

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากรูปที่ 5 พบว่าค่าความแปรปรวนจากการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ผลของ R-sq มีค่าเท่ากับ 95.83% และ R-sq (adj) มีค่าเท่ากับ 85.42% ซึ่งมากกว่า 70% แสดงว่าการทดลองนี้มีความถูกต้องและเหมาะสม และปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบกล้วยตาก มีค่า P-Value เท่ากับ 0.030 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและเวลาของเครื่องอบกล้วยตากนั้นส่งผลต่อคุณภาพของกล้วยตาก (Response) ของการทดลองมากที่สุด โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องอบกล้วยตากที่อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 6 ชั่วโมง และ ปรับความชื้นสุดท้าย 20% จึงจะเหมาะสม จึงจะทำให้ระดับความเนื้อสัมผัสเหนียวนุ่มไม่แข็งไม่ละ สีทองสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟ Surface Plots

5. อภิปรายผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) เพื่อกำหนดสภาวะการอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์กล้วยตาก ได้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมสูงในการอธิบายความแปรปรวนของคุณภาพผลิตภัณฑ์ ($R^2 = 95.83\%$) ซึ่งเป็นการยืนยันทางสถิติที่ชัดเจน ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และแผนภูมิพาเรโต ชี้ชัดว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ($\text{Temp} \cdot \text{Time}$) มีผลกระทบสูงสุดต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ และมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P = 0.030$) โดยสมการการถดถอยแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาไปพร้อมกันในระดับสูงจะส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งหมายความว่าความสมดุลระหว่างอุณหภูมิและเวลาเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพกล้วยตาก การปรับปรุงกระบวนการอบจึงต้องมุ่งเน้นไปที่การควบคุมปฏิสัมพันธ์นี้ โดยผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจะเป็นที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ตามเกณฑ์สูงสุด คล้ายกับงานวิจัย Avila et al. [14] ที่ใช้ Response Surface Methodology (RSM) ในการหาจุดเหมาะสมที่สุดในการอบแห้งกล้วยตาก โดยพบว่าอุณหภูมิและเวลาในการอบมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ เช่น สีและความแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปในงานวิจัยที่ย้ำถึงอิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการอบกล้วยตากในสองมิติที่เชื่อมโยงกัน:

5.2.1 การควบคุมคุณภาพในทางปฏิบัติ ผู้วิจัยควรนำผลการถดถอย ที่ได้ไปใช้กำหนดเป็นมาตรฐานในการควบคุมกระบวนการ (Process Control) ที่มีความเข้มงวด โดยเฉพาะการใช้ชุดค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Conditions) คือ อุณหภูมิ 60°C และเวลา 6 ชั่วโมง ควบคู่กับการตรวจสอบ ความชื้นสุดท้าย อย่างต่อเนื่อง การดำเนินการนี้จะช่วยลดความแปรปรวนของคุณภาพที่เคยเกิดจากการพึ่งพาปัจจัยธรรมชาติ

5.2.2 ขยายขอบเขตการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ควรใช้ Response Surface Methodology (RSM) เพื่อปรับช่วงของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ (เช่น อุณหภูมิและเวลา) ให้ละเอียดขึ้น เพื่อให้ได้จุดสูงสุดของพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) ที่สามารถนำไปสู่การตั้งค่าที่ให้คุณภาพดีที่สุทธอย่างแท้จริง นอกจากนี้ ควรขยายแบบจำลองโดยการรวม ต้นทุนพลังงาน และ ประสิทธิภาพ

ในการอบแห้ง เป็นตัวแปรตอบสนองร่วม เพื่อให้การหาจุดเหมาะสมที่สุดไม่เพียงแต่ตอบโจทย์ด้านคุณภาพเท่านั้น แต่ยังตอบโจทย์ด้านเศรษฐศาสตร์การผลิตได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น, มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ และ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านทรัพยากรและบุคลากรงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนคนรักวังตะเคียน ที่ให้ความร่วมมือในการทดลองและอนุเคราะห์ข้อมูลอย่างดียิ่ง ตลอดจนผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการประเมินผล ซึ่งคุณูปการเหล่านี้คือรากฐานสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในเชิงปฏิบัติ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Takshima, P. Yungphet, and P. Suwanamonlert, "The development of community enterprise sun-dried catfish product using a 'Turtle-back model' solar drying oven," *Rajabhat University Uttaradit Academic Journal: Science and Technology for Local Development*, vol. 18, no. 2, pp. 40–46, Jul.–Dec. 2023.
- [2] Department of Agricultural Extension, "The development of community enterprise processed agricultural products," Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand, Rep., 2020.
- [3] H. Fatorachian and H. Kazemi, "A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: Theoretical operationalisation framework," *Production Planning & Control*, vol. 29, no. 8, pp. 633–644, 2018, doi: 10.1080/09537287.2018.1424960.
- [4] J. Antony, "Lean Six Sigma for small and medium-sized enterprises: A roadmap for change," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 36, no. 3, pp. 415–439, Mar. 2019.
- [5] T. E. Vollmann, W. L. Berry, and D. C. Whybark, "Integrated material planning and execution in

- modern industries,” *Production and Inventory Management Journal*, vol. 56, no. 2, pp. 78–95, May 2020.
- [6] M. V. Zambrano, B. Dutta, D. G. Mercer, and H. L. MacLean, “Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review,” *Trends in Food Science & Technology*, vol. 88, pp. 484–496, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.04.006.
- [7] B. P. Carter and A. J. Fontana Jr., “Measurement of water activity, moisture sorption isotherm, and moisture content of foods,” in *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2020, pp. 145–169.
- [8] A. Supriyatna and L. Okdinawati, “Optimizing operational efficiency through improved crushing & loading strategies at PT Girimulya Resource,” *Asian Journal of Engineering, Social and Health*, vol. 3, no. 11, pp. 2485–2504, Nov. 2024.
- [9] T. Udonsathian and W. Worapun, “Enhancing analytical thinking in grade 8 science education: Integrating 5E inquiry-based and 5W1H techniques,” *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, vol. 11, no. 5, pp. 62–69, May 2024.
- [10] C. Su, H. Wu, L. Dai, Z. Zhang, S. Li, and Y. Hu, “Nonclassical heat transfer and recent progress,” *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 147, no. 3, Art. no. 032502, Mar. 2025.
- [11] A. Avcı, A. Çetinbaş, and H. Karakaya, “Analysis of strawberry drying behavior under a solar chimney collector using a full factorial experimental design,” *Heat Transfer*, vol. 54, no. 1, pp. 245–263, Jan. 2025.
- [12] A. D. Chaudhari and S. P. Salve, “A review of solar dryer technologies,” *International Journal of Research in Advent Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 223–231, Jan. 2014.
- [13] J. V. B. Luginasin, R. A. S. Peña, S. M. G. Dumlaio, and E. Q. B. Macabebe, “IoT-enabled multilevel solar dryer for agriculture,” in *2023 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoTIS)*, Bali, Indonesia, Nov. 28–30, 2023, pp. 21–27.
- [14] S. A. Avila, B. M. Rengifo, and C. P. Rincón, “Optimization of oven drying conditions of banana (*Musa spp.*, AAA Group, cv 'Luvhele' and 'Mabonde') using response surface methodology,” *Agrociencia*, vol. 52, no. 4, pp. 539–555, May–Jun. 2018.