

การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์

Design and Performance Analysis of an Automatic Mould Forming Machine for Steamed Sticky Rice

วิศิษฐ์ศรี วียะรัตน์¹ ศิริชัย ต่อสกุล² อภินันท์ วัลภา² ขวลิต อินปัญโญ² และ สุธิวัสส์ แววดี้^{2*}

¹คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอลำลูกเกด จังหวัดปทุมธานี 12120

Wisitsree Wiyaratn¹ Sirichai Torsakul² Apinun Wanlapa² Chawalit Inpunyo² and Suthiwat Waewdee^{2*}

¹Faculty of Industrial Education and Technology King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Pracha Uthit Road, Bang Mod Subdistrict, Thung Khru District, Bangkok 10140

²Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

39 Moo 1, Khlong Hok Subdistrict, Khlong Luang District, Pathum Thani Province 12120

*Corresponding author Email: suthiwat_w@mail.rmutt.ac.th

(Received: May 29, 2026; Revise: June 24, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ โดยประยุกต์ใช้ระบบนิวเมติกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติผ่าน โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต ลดแรงงาน และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ เครื่องต้นแบบถูกออกแบบด้วยระบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปที่สามารถขึ้นรูปข้าวต้มมัดได้ครั้งละ 3 ชิ้นต่อรอบการทำงาน และทำงานร่วมกับระบบป้อนถั่วดำและระบบลำเลียงอัตโนมัติ การทดลองถูกออกแบบตามหลัก การออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาผลของแรงกด เวลาในการอัดขึ้นรูป และความเร็วสายพาน ลำเลียงที่มีต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยประเมินจากความหนาแน่น อัตราของเสีย ความสม่ำเสมอของรูปทรง และกำลังการผลิต ผลการทดลองพบว่าแรงกดที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 140–150 นิวตัน และสามารถให้เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานดีสูงสุด 97–98 เปอร์เซ็นต์ โดยเครื่องสามารถผลิตข้าวต้มมัดได้เฉลี่ย 800–850 ชิ้นต่อชั่วโมง หรือมากกว่า 6,400 ชิ้นต่อวัน ภายใต้อัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ระบบอัตโนมัติยังสามารถลดจำนวนแรงงานในสายการผลิตได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรมอาหารพื้นถิ่น และสามารถยกระดับกระบวนการผลิตสู่ระบบอัตโนมัติในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติ ระบบนิวเมติกส์ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ แรงกดในการอัดขึ้นรูป กำลังการผลิต

Abstract

This research aimed to design and analyze the performance of an automatic mold-forming machine for steamed Sticky Rice by integrating a pneumatic system with a Programmable Logic Controller (PLC)-based automation system in order to increase production capacity, reduce labor requirements, and improve

product consistency. The prototype machine was designed with a mold-forming mechanism capable of forming three pieces per operating cycle and integrated with automatic black bean feeding and conveyor systems. A Design of Experiment (DOE) approach was employed to investigate the effects of compression force, forming time, and conveyor speed on product quality. The response variables included product density, defect rate, shape uniformity, and production capacity. Experimental results revealed that the optimal compression force ranged between 140–150 N, resulting in the highest percentage of acceptable products at 97–98 percent. The developed system achieved an average production capacity of 800–850 pieces per hour, or more than 6,400 pieces per day, with a defect rate lower than 5 percent. Furthermore, the automated production line reduced labor requirements by more than 60 percent compared with the conventional manual process. The findings demonstrate that the developed automatic mold-forming machine has strong potential for practical implementation in traditional food industries and can significantly enhance production efficiency and support the transformation toward smart food manufacturing systems.

Keywords: Automatic Khao Tom Mud Forming Machine, Pneumatic System, Programmable Logic Controller, Compression Force, Production Capacity

1. บทนำ

ข้าวต้มมัดเป็นอาหารพื้นถิ่นของประเทศไทยที่ได้รับความนิยมมาอย่างยาวนาน โดยมีลักษณะเด่นคือการนำข้าวเหนียวผสมกะทิห่อด้วยใบตองร่วมกับไส้กล้วยหรือถั่วดำ ก่อนนำไปนึ่งจนเกิดรสชาติและกลิ่นเฉพาะตัว ปัจจุบันข้าวต้มมัดไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการจำหน่ายในรูปแบบดั้งเดิมเท่านั้น แต่ยังได้รับการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมรับประทานในถุงรีทอร์ทเพาซ์ (Retort Pouch) เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เพิ่มความสะดวกในการบริโภค และรองรับการขยายตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ ดังแสดงในรูปที่ 1

กระบวนการผลิตข้าวต้มมัดยังคงอาศัยแรงงานคนเป็นหลักในหลายขั้นตอน ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดด้านกำลังการผลิต ความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ และต้นทุนแรงงาน การพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับกระบวนการขึ้นรูปจึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ควบคุมคุณภาพ และรองรับการขยายตัวของตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ



รูปที่ 1 ข้าวต้มมัดบรรจุลงในถุงรีทอร์ทเพาซ์ [1]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีระบบอัตโนมัติ หุ่นยนต์ และปัญญาประดิษฐ์ ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดต้นทุนแรงงาน และควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยระบบอัตโนมัติสามารถช่วยลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิต และเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมคุณภาพของ

อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2-3] นอกจากนี้ ระบบควบคุมผ่าน Programmable Logic Controller (PLC) ยังเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในสายการผลิตอาหาร เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหลายหน่วยได้อย่างแม่นยำ มีความยืดหยุ่นสูง และรองรับการทำงานร่วมกับระบบนิวเมติกส์และเซนเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเกี่ยวกับระบบอัตโนมัติสำหรับอาหารพื้นถิ่นไทยยังมีจำนวนจำกัด และส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นเฉพาะระบบลำเลียงหรือการบรรจุภัณฑ์ ขณะที่งานด้าน “การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อาหารที่มีลักษณะอ่อนตัวและเสียรูปได้ง่าย” ยังขาดการศึกษาเชิงวิศวกรรมอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการวิเคราะห์แรงกด การออกแบบแม่พิมพ์ และการควบคุมความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการขึ้นรูปอัตโนมัติ ทั้งนี้วัสดุอาหารประเภทข้าวเหนียวมีคุณสมบัติเป็นวัสดุอ่อนตัว (Compliant Food Material) ที่ไวต่อแรงกดและการเสียรูป ทำให้การออกแบบระบบจับยึดและขึ้นรูปมีความซับซ้อนสูง [5]

กระบวนการขึ้นรูปข้าวต้มมัดถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทั้งในด้านรูปร่าง ความหนาแน่น การกระจายตัวของไส้ และความเสียหายของชิ้นงาน หากแรงกดไม่เหมาะสมอาจทำให้ข้าวต้มมัดเกิดการแตกเสียรูป หรือมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพและการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้น การออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ที่สามารถควบคุมแรงกด ระยะเวลา และจังหวะการขึ้นรูปได้อย่างแม่นยำ จึงเป็นประเด็นสำคัญทางวิศวกรรมอาหารและวิศวกรรมเครื่องกล

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ โดยใช้ระบบนิวเมติกส์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด ความเร็วในการขึ้นรูป และคุณภาพของชิ้นงาน รวมถึงประเมินสมรรถนะของเครื่องในด้านกำลังการผลิต ความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ และอัตราของเสีย ทั้งนี้ผลการวิจัยคาดว่าจะสามารถพัฒนาองค์ความรู้ด้านการออกแบบเครื่องจักรอาหารพื้นถิ่นอัตโนมัติ และเป็นแนวทางในการยกระดับอุตสาหกรรมอาหารชุมชนสู่ระบบการผลิตอัจฉริยะในอนาคต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมุ่งเน้นการออกแบบ พัฒนา และวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ ที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบ PLC และระบบนิวเมติกส์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดแรงงาน และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การขึ้นรูปกับคุณภาพของชิ้นงานผ่านกระบวนการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) และการวิเคราะห์เชิงสถิติ

อุตสาหกรรมอาหารสมัยใหม่ได้มีการประยุกต์ใช้ระบบอัตโนมัติอย่างแพร่หลาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดความผิดพลาดจากแรงงานมนุษย์ และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ โดยเฉพาะระบบควบคุมผ่าน PLC ซึ่งสามารถควบคุมลำดับการทำงานของเครื่องจักรหลายหน่วยได้แบบทันทีทันใด [4], [6] ระบบดังกล่าวนิยมใช้ในสายการผลิตอาหารประเภทการขึ้นรูป การบรรจุ และการลำเลียง เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การทำงานได้ง่าย และรองรับการทำงานร่วมกับเซนเซอร์และระบบนิวเมติกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7]

เทคโนโลยีการขึ้นรูปอาหารเป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารแปรรูป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมรูปร่าง ขนาด และความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ กระบวนการขึ้นรูปนิยมใช้ระบบกลไกและระบบนิวเมติกส์ในการสร้างแรงกดหรือแรงอัด เพื่อให้วัสดุอาหารเกิดการยึดเกาะและคงรูปร่างตามแม่พิมพ์ที่กำหนด [8-9]

การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องจักรอาหารนิยมใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตอบสนอง เช่น แรงกด ความเร็วสายพาน ระยะเวลาอัด และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการผลิต [10]

งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า การควบคุมแรงกดและเวลาการขึ้นรูปอย่างเหมาะสมสามารถช่วยลดอัตราของเสีย เพิ่มความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ และเพิ่มกำลังการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การประยุกต์ใช้ DOE และการวิเคราะห์เชิงสถิติในงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญต่อการยืนยันสมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น และช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือทางวิชาการของงานวิจัยในระดับวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรมอุตสาหกรรมอาหาร

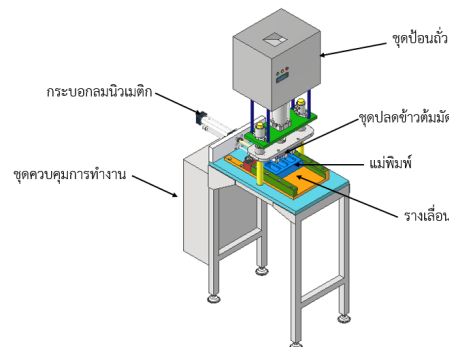
2.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดขึ้นรูป

เครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติถูกออกแบบในรูปแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป (Mould Forming System) โดยใช้โปรแกรมสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรแบบสามมิติ (3D CAD Design) และใช้หลักการออกแบบเชิงวิศวกรรมอาหารร่วมกับวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อให้สามารถรองรับวัสดุอาหารที่มีความชื้นสูงและเสียรูปได้ง่าย

โครงสร้างของเครื่องจักรประกอบด้วย: ชุดป้อนถั่ว แม่พิมพ์ ชุดปลดข้าวต้มมัด กระบอกนิวเมติกส์

แม่พิมพ์ถูกออกแบบให้สามารถขึ้นรูปข้าวต้มมัดได้ครั้งละ 3 ชิ้นต่อรอบการทำงาน โดยใช้วัสดุ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอาหาร SUS304 เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและลดการสะสมของจุลินทรีย์

การออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ เพื่อสร้างรูปร่างข้าวต้มมัดที่มีความสม่ำเสมอทั้งขนาด รูปทรง และความแน่นของการห่อ โดยอาศัยการทำงานของกระบอกลมนิวเมติกส์ที่ขับเคลื่อนแม่พิมพ์ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องห่อข้าวแบบเฉพาะ พร้อมกับชุดป้อนเมล็ดถั่วดำซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบน เพื่อหยดถั่วดำในตำแหน่งกึ่งกลางของข้าวอย่างแม่นยำก่อนกระบวนการกดขึ้นรูป ตัวแม่พิมพ์ออกแบบให้ถอดเปลี่ยนได้ รองรับการผลิตขึ้นรูปขนาดต่าง ๆ หรือรูปทรงพิเศษ และติดตั้งบนรางเลื่อนเพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าออกของแผ่นข้าว โดยกลไกชุดปลดข้าวต้มมัดจะทำหน้าที่ดันชิ้นงานขึ้นจากแม่พิมพ์หลังการอัดเสร็จเพื่อลำเลียงไปยังขั้นตอนบรรจุ ทั้งนี้ ระบบควบคุมอัตโนมัติจะสั่งจังหวะการทำงานอย่างแม่นยำให้กลไกการป้อนถั่วและการกดขึ้นรูปทำงานสัมพันธ์กันตลอดกระบวนการผลิต โดยเน้นให้แรงกดของกระบอกลมอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้ไส้ฉีกหรือข้าวแตกร้าว ซึ่งออกแบบตามหลักการออกแบบแม่พิมพ์และการจำลองโพลีเมอร์ด้วยซอฟต์แวร์ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารแบบกึ่งเปียกอย่างข้าวต้มมัดแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติ

2.2 การสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติ

การสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ ในรูปแบบงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องจักรที่สามารถขึ้นรูปข้าวต้มมัดให้มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ พร้อมทั้งสามารถใส่เมล็ดถั่วดำในตำแหน่งที่แม่นยำภายในผลิตภัณฑ์ โดยโครงสร้างหลักของเครื่องผลิตจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอาหาร เพื่อให้ปลอดภัยต่อการสัมผัสอาหาร แม่พิมพ์ขึ้นรูปถูกออกแบบตามลักษณะของข้าวต้มมัดแบบดั้งเดิม และติดตั้งบนฐานเลื่อนที่สามารถเข้า-ออกจากพื้นที่กดเพื่ออำนวยความสะดวกในการขึ้นรูปและปลดชิ้นงาน ชุดขับเคลื่อนกลไกกระบอกลมนิวเมติกส์ หรือเซอร์โวมอเตอร์ควบคุมแรงกดอย่างแม่นยำเพื่อไม่ให้ข้าวเสียรูปหรือไส้ทะลัก ชุดป้อนเมล็ดถั่วดำทำงานร่วมกับระบบหยดแบบแรงโน้มถ่วงหรือสกรูพิดเดอร์ พร้อมเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งแผ่น

ข้าวก่อนปล่อยถ่วงลงในจุดศูนย์กลางของแม่พิมพ์ กลไกชุดปลดชิ้นงานหลังขึ้นรูปออกแบบให้ทำงานโดยอัตโนมัติด้วยลิฟต์ดันด้านล่างหรือระบบสไลด์ด้านข้าง ส่งต่อข้าวต้มมัดที่ขึ้นรูปสมบูรณ์สู่ขั้นตอนการบรรจุ ทั้งระบบควบคุมผ่าน PLC ที่สามารถกำหนดจังหวะเวลา ความเร็ว และแรงกดในแต่ละรอบการทำงานแสดงดังรูปที่ 2 โดยมีการออกแบบด้วยซอฟต์แวร์ CAD และวิเคราะห์แรงกดในเชิงกล (FEA) เพื่อความปลอดภัย ความแม่นยำ และประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการผลิตจริง



รูปที่ 3 เครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติ

3. กรอบการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมุ่งเน้นการออกแบบ พัฒนา และวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ ที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบ PLC และระบบนิวเมติกส์สำหรับควบคุมแรงกดในการขึ้นรูป โดยสามารถปรับแรงดันลมได้ในช่วง 0.3–0.7 MPa เพื่อควบคุมแรงอัดของแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของข้าวเหนียวและไส้ภายในผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 4 เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดแรงงาน และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การขึ้นรูปกับคุณภาพของชิ้นงาน

3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองใช้แบบ 3 ปัจจัย 3 ระดับ ดังตารางที่ 1 เพื่อศึกษาผลของแรงกด เวลาในการอัดขึ้นรูป และความเร็วสายพานลำเลียงที่มีต่อคุณภาพของข้าวต้มมัด โดยการทดลองถูกออกแบบตามหลัก Design of Experiment (DOE) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น ได้แก่ แรงกดในการขึ้นรูป เวลาในการอัดขึ้นรูป และความเร็วสายพานลำเลียง กับตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ความหนาแน่นของชิ้นงาน อัตราของเสีย ความสม่ำเสมอของรูปทรง และกำลังการผลิต โดยแต่ละเงื่อนไขการทดลองถูกทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล

การเก็บข้อมูลดำเนินการจากการทดลองจริงของเครื่องต้นแบบในสายการผลิตเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป ทั้งนี้สมรรถนะของระบบถูกประเมินจากกำลังการผลิต ความแม่นยำของชิ้นงาน ความสม่ำเสมอของความหนาแน่น และเสถียรภาพของระบบควบคุม โดยกำหนดเป้าหมายให้เครื่องสามารถผลิตข้าวต้มมัดได้ไม่น้อยกว่า 800 ชิ้นต่อชั่วโมง และมีอัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

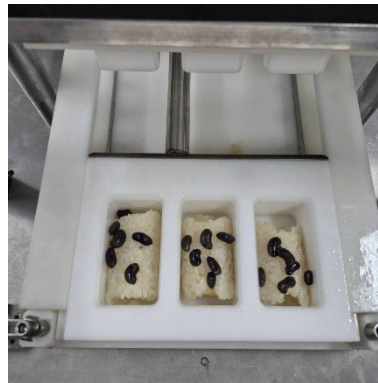
การประเมินตัวแปรตอบสนองประกอบด้วย ความหนาแน่นของชิ้นงาน อัตราของเสีย ความสม่ำเสมอของรูปทรง และกำลังการผลิต โดยความหนาแน่นคำนวณจากมวลและปริมาตรของชิ้นงานที่วัดด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล ส่วนอัตราของเสีย

ความสม่ำเสมอของรูปทรง และกำลังการผลิตประเมินจากการผลิตจริงภายใต้แต่ละเงื่อนไขการทดลอง และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ 1 ตัวแปรต้นที่มีต่อคุณภาพของข้าวต้มมัด

ตัวแปรต้น	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
แรงกดในการขึ้นรูป (นิวตัน)	120	140	160
เวลาในการอัดขึ้นรูป (วินาที)	1.2	1.5	1.8
ความเร็วสายพาน (เมตรต่อนาที)	0.50	0.55	0.60

การเก็บข้อมูลดำเนินการจากการทดลองจริงของเครื่องต้นแบบในสายการผลิตเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป ทั้งนี้สมรรถนะของระบบถูกประเมินจากกำลังการผลิต ความแม่นยำของชิ้นงาน ความสม่ำเสมอของความหนาแน่น และเสถียรภาพของระบบควบคุม โดยกำหนดเป้าหมายให้เครื่องสามารถผลิตข้าวต้มมัดได้ไม่น้อยกว่า 800 ชิ้นต่อชั่วโมง และมีอัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์



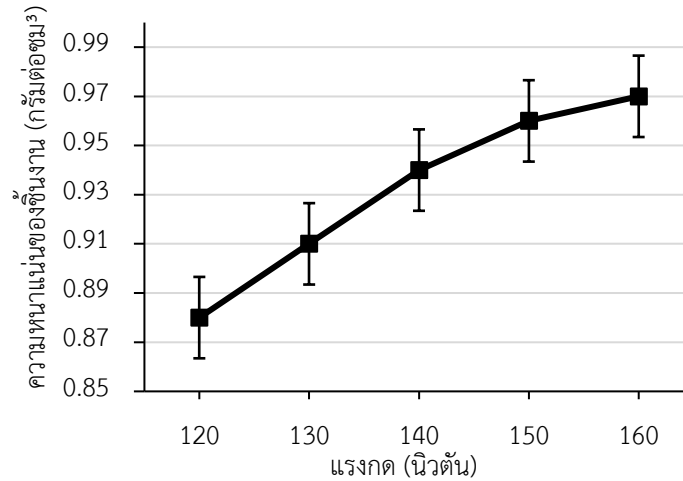
รูปที่ 4 ชิ้นข้าวต้มมัดหลังจากผ่านแม่พิมพ์

4. ผลการทดลอง

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ทำขึ้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการขึ้นรูปข้าวต้มมัดให้ได้ขนาดและรูปร่างที่สม่ำเสมอ โดยเครื่องอัดขึ้นรูปในงานวิจัยนี้ทำงานแบบ ระบบแม่พิมพ์กลไกกดอัดด้วยกระบอกนิวเมติกส์ (Pneumatic Mould Forming System) ซึ่งทำหน้าที่รับวัตถุดิบจากชุดป้อนและรีดแผ่นข้าว เครื่องป้อนกล้วย และเครื่องป้อนไส้ ตามลำดับ ก่อนเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นข้าวต้มมัดที่มีรูปทรงและขนาดตามต้องการ

4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์

ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วในการอัดขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ อยู่ในช่วง 12–15 รอบต่อนาที หรือประมาณ 720–900 ชิ้นต่อชั่วโมง โดยแต่ละรอบใช้เวลาเฉลี่ย 3.8–4.5 วินาทีต่อชิ้นงาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นข้าวและปริมาณไส้ในแต่ละสูตรการผลิต สำหรับ ความเร็วในการป้อนชิ้นข้าวต้มมัดเข้าสู่แม่พิมพ์ ถูกปรับให้สัมพันธ์กับการรีดแผ่นข้าวที่มีความเร็วเฉลี่ย 0.55 เมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 5 เพื่อให้กระบวนการอัดและป้อนทำงานประสานกันโดยไม่เกิดการทับซ้อนหรือค้างในช่องแม่พิมพ์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความหนาแน่นของขึ้นข้าวต้มมัด

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์แรงกดและคุณภาพขึ้นข้าวต้มมัด

ลำดับ	แรงกด (นิวตัน)	เปอร์เซ็นต์ขึ้นงานดี (เปอร์เซ็นต์)	หมายเหตุ
1	120	92	ข้าวต้มมัดมีลักษณะไม่แน่นมาก ข้าวหลวมเล็กน้อย
2	130	94	พื้นผิวเรียบ ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
3	140	97	ความหนาแน่นสม่ำเสมอที่สุด เหมาะสมต่อการผลิตต่อเนื่อง
4	150	98	ข้าวแน่นและเกาะตัวดี แต่เริ่มมีการอัดแน่นเกิน
5	160	96	พบแนวโน้มน้ำแตกเล็กน้อยจากแรงกดสูง

แรงและระยะเวลาในการกดอัดขึ้นรูปเป็นตัวแปรสำคัญของคุณภาพขึ้นข้าวต้มมัด โดยผลการทดสอบพบว่า แรงกดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 120-150 นิวตัน และ ระยะเวลาในการกดอัดแต่ละรอบอยู่ที่ 3 วินาที ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการทำให้ข้าวเหนียวเกาะตัวแน่น โดยไม่ทำให้ไส้เคลื่อนหรือทะลุออกจากแผ่นข้าว ขนาดของขึ้นข้าวต้มมัดที่ได้มีความยาวเฉลี่ย 75 มิลลิเมตร ความกว้าง 30 มิลลิเมตร และความหนา 15 มิลลิเมตร โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน ± 1.5 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 2 พบว่าแรงกดมีผลโดยตรงต่อความหนาแน่นและคุณภาพของขึ้นข้าวต้มมัด โดยเมื่อแรงกดเพิ่มจาก 120 นิวตัน เป็น 140 นิวตัน ความหนาแน่นของขึ้นงานเพิ่มขึ้นต่อเนื่องและมีค่าความสม่ำเสมอสูงสุดในช่วงแรงกด 140-150 นิวตัน ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์ของขึ้นงานดีสูงสุด (97-98เปอร์เซ็นต์) ทั้งนี้แรงกดที่เกิน 150 นิวตัน พบแนวโน้มน้ำแตกของข้าวเหนียวจากการอัดแน่นเกินพอดี ทำให้คุณภาพลดลงเล็กน้อย ดังนั้นค่าที่เหมาะสมสำหรับการทำงานจริงคือแรงกดประมาณ 140-150 นิวตัน ซึ่งให้สมดุลระหว่างความหนาแน่น ความสม่ำเสมอ และความเร็วในการผลิตได้ดีที่สุด

4.1.1 ผลของเวลาในการอัดขึ้นรูปต่อคุณภาพขึ้นข้าวต้มมัด

ผลการทดลองพบว่าเวลาในการอัดขึ้นรูปมีผลต่อความสมบูรณ์ของขึ้นงานและความหนาแน่นของข้าวต้มมัดอย่างชัดเจน โดยเมื่อกำหนดเวลาอัดขึ้นรูปที่ 1.2 วินาที พบว่าขึ้นงานบางส่วนมีลักษณะการยึดเกาะของข้าวเหนียวไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ขึ้นงานดีเฉลี่ยอยู่ที่ 93 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การเพิ่มเวลาอัดขึ้นรูปเป็น 1.5 วินาที ช่วยให้ข้าวเหนียวกระจายตัวและยึดเกาะกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ขึ้นงานดีเพิ่มขึ้นเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนาแน่นของขึ้นงานสม่ำเสมอมากที่สุด ดังตารางที่ 3

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเวลาอัดขึ้นรูปเป็น 1.8 วินาที พบแนวโน้มการอัดแน่นมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการเสียรูปของชิ้นงานบางส่วน และทำให้เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานที่ลดลงเหลือ 96 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เวลาอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวต้มมัดด้วยเครื่องดันแบบคือ 1.5 วินาที ซึ่งให้สมดุลระหว่างคุณภาพชิ้นงานและประสิทธิภาพการผลิต

ตารางที่ 3 ผลของเวลาอัดขึ้นรูปต่อคุณภาพชิ้นงาน

เวลาอัดขึ้นรูป (วินาที)	เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานดี (เปอร์เซ็นต์)
1.2	93
1.5	98
1.8	96

4.1.2 ผลของความเร็วย้ายพานลำเลียงต่อสมรรถนะการผลิต

ผลการทดลองพบว่าความเร็วย้ายพานลำเลียงมีผลต่อความต่อเนื่องของการป้อนวัตถุดิบและกำลังการผลิตของระบบ โดยที่ความเร็วย้ายพาน 0.50 เมตรต่อวินาที ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องแต่ยังมีกำลังการผลิตเฉลี่ยเพียง 760 ชิ้นต่อชั่วโมง เนื่องจากอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่แม่พิมพ์ค่อนข้างต่ำ

เมื่อเพิ่มความเร็วย้ายพานเป็น 0.55 เมตรต่อวินาที พบว่าระบบสามารถประสานการทำงานระหว่างชุดป้อนวัตถุดิบชุดป้อนถั่ว และชุดอัดขึ้นรูปได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้กำลังการผลิตเพิ่มขึ้นเป็นเฉลี่ย 820 ชิ้นต่อชั่วโมง และมีอัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4

สำหรับความเร็วย้ายพานที่ 0.60 เมตรต่อวินาที แม้ว่ากำลังการผลิตจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่พบปัญหาการวางตำแหน่งวัตถุดิบคลาดเคลื่อนและการเข้าสู่แม่พิมพ์ไม่สมบูรณ์ในบางรอบการผลิต ส่งผลให้อัตราของเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความเร็วย้ายพานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตข้าวต้มมัดด้วยเครื่องดันแบบคือ 0.55 เมตรต่อวินาที ซึ่งให้กำลังการผลิตสูงและมีความเสถียรของระบบดีที่สุด

ตารางที่ 4 ผลของความเร็วย้ายพานต่อกำลังการผลิต

ความเร็วย้ายพาน (เมตรต่อวินาที)	กำลังการผลิต (ชิ้นต่อชั่วโมง)	อัตราของเสีย (เปอร์เซ็นต์)
0.50	760	6.2
0.55	820	4.3
0.60	835	5.8

4.2 การเปรียบเทียบกำลังคนระหว่างกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมและสายการผลิตอัตโนมัติ

การประเมินสมรรถนะของระบบการผลิตดำเนินการโดยคำนวณกำลังการผลิตรวมต่อวัน ตามสมการที่ (1) ส่วนต้นทุนแรงงานรวม และต้นทุนแรงงานต่อหน่วย คำนวณตามสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบการผลิตแบบดั้งเดิมและระบบการผลิตอัตโนมัติ ได้ทำการวิเคราะห์ร้อยละการเพิ่มขึ้นและร้อยละการลดลงของตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องโดยใช้สมการที่ (4) และ (5)

$$\text{กำลังการผลิตรวม} = \text{กำลังการผลิตเฉลี่ยต่อชั่วโมง} \times \text{ชั่วโมงการทำงาน} \quad (1)$$

$$\text{ต้นทุนแรงงานรวม} = \text{จำนวนแรงงาน} \times \text{ค่าแรงต่อคนต่อวัน} \quad (2)$$

$$\text{ต้นทุนแรงงานต่อชิ้น} = \frac{\text{กำลังการผลิตรวมต่อวัน}}{\text{ต้นทุนแรงงานรวมต่อวัน}} \quad (3)$$

ก่อนการพัฒนาเทคโนโลยีสายการผลิตอัตโนมัติ กระบวนการผลิตข้าวต้มมัดแบบดั้งเดิมจำเป็นต้องใช้แรงงานคนจำนวนมากในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบ การปั้นข้าว การวางกล้วย การห่อ และการบรรจุ โดยจากการสำรวจข้อมูลภาคสนามจากผู้ประกอบการ พบว่าโรงงานขนาดกลางต้องใช้แรงงานไม่น้อยกว่า 12-15 คนต่อสายการผลิตหนึ่งชุด เพื่อให้สามารถผลิตได้ประมาณ 400-500 ชิ้นต่อชั่วโมง หรือประมาณ 4,000 ชิ้นต่อวัน (8 ชั่วโมงทำงาน)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดลง} = \frac{\text{ค่าก่อนปรับปรุง} - \text{ค่าหลังปรับปรุง}}{\text{ค่าก่อนปรับปรุง}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น} = \frac{\text{ค่าหลังปรับปรุง} - \text{ค่าก่อนปรับปรุง}}{\text{ค่าก่อนปรับปรุง}} \times 100 \quad (5)$$

หลังจากการติดตั้งและทดสอบระบบสายการผลิตข้าวต้มมัดอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานด้วย PLC ครอบคลุม 6 หน่วยหลัก ได้แก่ เครื่องป้อนและรีดแผ่นข้าว เครื่องป้อนกล้วย เครื่องป้อนไส้ เครื่องป้อนถั่ว เครื่องอัดขึ้นรูป และเครื่องบรรจุ ถู พบว่าสามารถลดจำนวนแรงงานลดลงเหลือเพียง 4-5 คนต่อสายการผลิต สำหรับการควบคุม ตรวจสอบ และบรรจุภัณฑ์ขั้นสุดท้าย ซึ่งคิดเป็นการลดกำลังคนลงกว่า 60-65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกระบวนการเดิมดังตารางที่ 5

นอกจากนี้ สายการผลิตอัตโนมัติยังช่วยลดความเมื่อยล้าและความเสี่ยงจากการทำงานซ้ำ ๆ ของแรงงาน เพิ่มความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ และลดความแปรปรวนของคุณภาพที่เกิดจากทักษะเฉพาะตัวของแรงงานแต่ละคน ทำให้โรงงานสามารถบริหารจัดการต้นทุนแรงงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และเพิ่มกำลังการผลิตรวมเป็น ไม่น้อยกว่า 800 ชิ้นต่อชั่วโมง หรือ 6,400 ชิ้นต่อวัน ภายใต้แรงงานเพียงหนึ่งในสามของระบบเดิม

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบจำนวนแรงงาน กำลังการผลิต และต้นทุนแรงงาน

รายการเปรียบเทียบ	ระบบผลิตแบบดั้งเดิม	ระบบผลิตอัตโนมัติที่พัฒนาในงานวิจัย	ผลต่าง (ลดลงต่อเพิ่มขึ้น)
จำนวนแรงงานต่อสายการผลิต	6-8 คน	2 คน	ลดลง 60-65 เปอร์เซ็นต์
ชั่วโมงการทำงานต่อวัน	8 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง	เท่ากัน
กำลังการผลิตเฉลี่ย (ชิ้นต่อชั่วโมง)	400-500 ชิ้น	800-850 ชิ้น	เพิ่มขึ้น 70-80 เปอร์เซ็นต์
กำลังการผลิตรวม (ชิ้นต่อวัน)	4,000 ชิ้น	6,400-6,800 ชิ้น	เพิ่มขึ้น 70-80 เปอร์เซ็นต์
ต้นทุนแรงงานเฉลี่ย (บาทต่อคนต่อวัน)	500 บาท	500 บาท	เท่ากัน
ต้นทุนแรงงานรวมต่อวัน (บาท)	6,000-7,500 บาท	2,000-2,500 บาท	ลดลง 65 เปอร์เซ็นต์
ต้นทุนแรงงานต่อชิ้น (บาทต่อชิ้น)	1.50-1.80 บาท	0.35-0.40 บาท	ลดลง 75 เปอร์เซ็นต์
อัตราชิ้นงานดี (เปอร์เซ็นต์)	90-92 เปอร์เซ็นต์	95-98 เปอร์เซ็นต์	เพิ่มขึ้น 6 เปอร์เซ็นต์
อัตราของเสีย (เปอร์เซ็นต์)	8-10 เปอร์เซ็นต์	<5 เปอร์เซ็นต์	ลดลง 50 เปอร์เซ็นต์

5. อภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัตโนมัติแบบแม่พิมพ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 800-850 ชิ้นต่อชั่วโมง สูงกว่ากระบวนการผลิตแบบดั้งเดิมที่มีกำลังการผลิตประมาณ 400-500 ชิ้นต่อชั่วโมงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นผลจากการประยุกต์ใช้ระบบควบคุม PLC ร่วมกับระบบนิวเมติกส์ซึ่งช่วยให้ชุดป้อนวัตถุดิบ ชุดอัดขึ้นรูป และระบบลำเลียงทำงานประสานกันอย่างต่อเนื่อง ลดเวลาสูญเสียในกระบวนการผลิต

และลดความคลาดเคลื่อนจากการปฏิบัติงานของแรงงานมนุษย์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rao และคณะ [4] ที่รายงานว่า ระบบ PLC สามารถเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพของสายการผลิตอาหารอัดโนมิตได้

ผลการทดลองยังพบว่าเวลาในการอัดขึ้นรูปมีผลโดยตรงต่อคุณภาพและความสมบูรณ์ของชิ้นงาน โดยเวลาอัดขึ้นรูปที่สั้นเกินไปทำให้ข้าวเหนียวเกาะตัวไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นต่ำและเกิดการหลุดร่อนของส่วนประกอบบางส่วน ขณะที่เวลาอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมช่วยให้แรงกดกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงาน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอและมีเปอร์เซ็นต์ชิ้นงานดีสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเวลาอัดขึ้นรูปมากเกินไปพบแนวโน้มการอัดแน่นเกินความจำเป็น ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลง ดังนั้นการกำหนดเวลาอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของข้าวต้มมัด

นอกจากนี้ ความเร็วสายพานลำเลียงยังมีผลต่อความต่อเนื่องของการป้อนวัตถุดิบและเสถียรภาพของกระบวนการผลิต โดยความเร็วที่ต่ำเกินไปส่งผลให้กำลังการผลิตลดลง ขณะที่ความเร็วสูงเกินไปอาจทำให้ตำแหน่งของวัตถุดิบคลาดเคลื่อนและเพิ่มโอกาสเกิดของเสียจากกระบวนการขึ้นรูป ผลการทดลองพบว่าความเร็วสายพานที่ 0.55 เมตรต่อวินาที สามารถสร้างสมดุลระหว่างกำลังการผลิต คุณภาพผลิตภัณฑ์ และเสถียรภาพของระบบได้ดีที่สุด ทั้งยังช่วยให้การทำงานของชุดป้อนถั่วดำชุดอัดขึ้นรูป และกลไกปลดชิ้นงานเป็นไปอย่างสอดคล้อง ส่งผลให้ข้าวต้มมัดมีขนาดใกล้เคียงกันและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดไม่เกิน ± 1.5 มิลลิเมตร

โดยสรุป เครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัดโนมิตแบบแม่พิมพ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มกำลังการผลิต ควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ และลดการฟุ้งกระจายแรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่อง ได้แก่ แรงกดในการขึ้นรูป เวลาในการอัดขึ้นรูป และความเร็วสายพานลำเลียง ซึ่งต้องควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและมีอัตราของเสียต่ำ ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรมอาหารพื้นถิ่นไทย และสามารถเป็นแนวทางในการยกระดับการผลิตของวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการ SME สู่ระบบการผลิตที่อุตสาหกรรมในอนาคต

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอัดขึ้นรูปข้าวต้มมัดอัดโนมิตแบบแม่พิมพ์ โดยประยุกต์ใช้ระบบนิวเมติกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติผ่าน PLC เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตข้าวต้มมัดให้มีประสิทธิภาพสูงชัน ผลการวิจัยพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานร่วมกับระบบป้อนวัตถุดิบและระบบลำเลียงได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ โดยสามารถผลิตข้าวต้มมัดได้เฉลี่ย 800-850 ชิ้นต่อชั่วโมง หรือมากกว่า 6,400 ชิ้นต่อวัน ภายใต้อัตราของเสียต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าแรงกดในการขึ้นรูปมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยช่วงแรงกดที่เหมาะสมอยู่ที่ 140–150 นิวตัน ซึ่งให้ความหนาแน่นและความสม่ำเสมอของชิ้นงานดีที่สุด พร้อมทั้งสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของข้าวต้มมัดให้ใกล้เคียงกันทุกชิ้น นอกจากนี้ ระบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นยังสามารถลดจำนวนแรงงานในสายการผลิตได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ และช่วยลดต้นทุนแรงงานต่อหน่วยได้อย่างมีนัยสำคัญ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม และสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ โดยหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ร่วมกับ บริษัท โรส อารยา ฟู้ด จำกัด ประจำปีงบประมาณ 2566

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] MGR Online, “Getting to Know 'Bai Salat Thai Dessert Leaf', Dominating the Khao Tom Mud Export Market for Over 40 Years,” *Manager Online*, Jun. 08, 2016. [Online]. Available: <https://mgronline.com/smes/detail/9590000057048> (in Thai).
- [2] Shweta et al., “Assessment of Advancements and Applications of Robotics, Artificial Intelligence, and Automated Technology in the Modern Food Sector,” *Applied Food Research*, vol. 5, no. 2, p. 101261, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.afres.2025.101261.
- [3] L. Zhang, R. M. Boom, and Y. Ma, “Machine Learning in Automated Food Processing: A Mini Review,” *Annual Review of Food Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 25–37, Apr. 2025, doi: 10.1146/annurev-food-111523-122039.
- [4] V. S. Rao, P. S. K., and S. K. V., “Design of PLC Based Automated Food Processing Machine,” *International Journal of Mechanics*, vol. 15, pp. 22–29, Feb. 2021, doi: 10.46300/9104.2021.15.3.
- [5] E. Misimi, A. Olofsson, A. Eilertsen, E. R. Øye, and J. R. Mathiassen, “Robotic Handling of Compliant Food Objects by Robust Learning from Demonstration,” *arXiv preprint arXiv:2309.12856*, Sep. 2023, doi: 10.48550/arxiv.2309.12856.
- [6] B. Vogel-Heuser, J. Fischer, S. Feldmann, S. Ulewicz, and S. Rösch, “Modularity and Architecture of PLC-Based Software for Automated Production Systems: An Analysis in Industrial Companies,” *Journal of Systems and Software*, vol. 131, pp. 35–62, May 2017, doi: 10.1016/j.jss.2017.05.051.
- [7] L. Zhu, P. Spachos, E. Pensini, and K. Plataniotis, “Deep Learning and Machine Vision for Food Processing: A Survey,” *arXiv preprint arXiv:2103.16106*, Mar. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2103.16106.
- [8] C. I. Cardona, H. A. Tinoco, L. Perdomo-Hurtado, E. Duque-Dussán, and J. Banout, “Optimizing Harvesting Efficiency: Development and Assessment of a Pneumatic Air Jet Excitation Nozzle for Delicate Biostructures in Food Processing,” *Foods*, vol. 13, no. 10, p. 1458, May 2024, doi: 10.3390/foods13101458.
- [9] R. Komljenovic and R. Komljenovic, “Food Manufacturing Companies Rely on Pneumatic Actuators,” *JHFOSTER*, Apr. 02, 2026. [Online]. Available: <https://jhfooster.com/automation-blogs/food-manufacturing-companies-rely-on-pneumatic-actuators/>
- [10] Y. Kim and S. Kim, “Automation and Optimization of Food Process Using CNN and Six-Axis Robotic Arm,” *Foods*, vol. 13, no. 23, p. 3826, Nov. 2024, doi: 10.3390/foods13233826.