บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (DOE)

Development of Tamarind Seed Shelling Machine Using Factor Analysis with Design of Experiments (DOE)

อัครพล น้ำใจดี[1] มีโชค มากมี[1] ราชัน แก้วผดุง[1] ศิวกร แสนขวา[1] พจน์ ชัยอ้าย[1] และ ศุทธินี กล่อมแสร์[1*]
Akkarapon Namjaidee[1], Meechock Markmee[1], Rachan Geawpadung[1], Siwakon Saenkha[1], Poth Chaiaye[1] and Sutthinee Klomsae[1*]
[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
[1]Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University
*Corresponding author; email: klomsae.uru@gmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
7 มิถุนายน 2569	20 กรกฎาคม 2569	20 กรกฎาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม และ 2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้มีการออกแบบช่องปล่อยเมล็ดมะขามให้มี 2 ขนาด คือ 10 และ 13 มม. ใบตีมี 2 รูปแบบ คือ ใบตีแบบตันและใบตีแบบเจาะรู และชุดส่งกำลังที่มีความเร็วรอบ 2 ระดับ คือ 720 และ 1,080 รอบ/นาที การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามจึงมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัย คือ ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม ใบตีและความเร็วรอบในการกะเทาะ ผลการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ (2^3 Factorial Design) พบว่า ค่าความเหมาะสมของปัจจัยในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามซึ่งต้องมีการพิจารณาค่าความเหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่มากที่สุด ร่วมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่น้อยที่สุด จะมีการใช้ใบตีแบบตัน โดยมีขนาดรูช่องปล่อยเมล็ด 13 มม.ที่ความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 1,080 รอบ/นาที เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยสามารถกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามได้ในปริมาณเฉลี่ย 147.30 กรัม ด้วยเวลาเฉลี่ย 18.00 วินาที และมีประสิทธิภาพการกะเทาะเฉลี่ยเท่ากับ 95.3% เพิ่มขึ้น 7.25%

คำสำคัญ: เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม, การออกแบบการทดลอง, การวิเคราะห์ปัจจัย, ประสิทธิภาพการกะเทาะ, เมล็ดมะขาม

Abstract

This research aims to 1) develop a tamarind seed shelling machine and 2) study the factors affecting the efficiency of a tamarind seed shelling machine by using Design of Experiments (DOE). There were 2 sizes of tamarind-seed discharge port designed, 10 and 13 mm., and 2 types of crushing blades, solid blades and perforated blades, with 2 power transmission speeds, 72 and 1,080 rpm. The study of factors affecting the efficiency of a tamarind seed shelling machine by design of experiments was to find the optimization of 3 factors involving seed discharge port size, crushing blade type, and speeds. A full factorial design, 2^3 Factorial Design with 2 levels, was used in this study. The results revealed that the optimal operating conditions for a tamarind seed shelling machine were considered factors affecting the largest quantity of shelled tamarind seeds with the shortest time with the solid crushing blades of a seed-discharge-hole size of 13 mm., at a speed of 1,080 rpm. It was deemed the optimal factor level that was able to crush tamarind seeds in an average of 147.30 grams of 18.00 seconds of an average time. The average shelling efficiency was 95.3% with an increase of 7.25%

Keywords: Tamarind Seed Shelling Machine, Design of Experiment, Factor Analysis, Shelling Efficiency, Tamarind Seeds

บทนำ

มะขามเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีการเพาะปลูกอย่างแพร่หลายในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง โดย 3 จังหวัดแรกที่สามารถผลิตมะขามได้มากที่สุดในปี 2566 คือ จังหวัดเพชรบูรณ์ จังหวัดเลยและจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยมีปริมาณ 36,519,776 และ 16,373,920 และ 8,364,740 กก./ปี ตามลำดับ [1] เกษตรกรในจังหวัดอุตรดิตถ์จะมีลักษณะการขายมะขามแบบเหมาสวนให้กับพ่อค้าคนกลางที่มารับซื้อในรูปแบบของมะขามฝักสด และมีการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากมะขามในหลายรูปแบบ เช่น มะขามผลสด มะขามไร้เมล็ด มะขามสามรสไร้เมล็ด มะขามคลุก เพื่อเพิ่มมูลค่า [2] ขณะที่เมล็ดมะขามเป็นส่วนเหลือทิ้งที่ถูกมองข้ามและทิ้งเป็นขยะ ทั้งที่เมล็ดมะขามสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น การนำเนื้อเมล็ดมาทำการผลิตเป็นแป้งเมล็ดมะขามทดแทนแป้งสาลี [3] การพัฒนาผลิตภัณฑ์พอกผิวกายจากเนื้อเมล็ดมะขาม [4] เปลือกเมล็ดสามารถนำไปสกัดเพื่อใช้เป็นสารเสริมในการเลี้ยงไก่ ช่วยลดต้นทุนการผลิต [5] การผลิตผ้าไหมย้อมสีด้วยเมล็ดมะขามเพื่อเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ [6] การนำเมล็ดมะขามมาใช้ประโยชน์จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือใช้และเป็นการใช้วัตถุดิบในท้องถิ่นอย่างคุ้มค่า โดยเฉพาะจังหวัดอุตรดิตถ์ที่มีมะขามเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ การนำเปลือกเมล็ดมะขามซึ่งเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลิตภัณฑ์มะขามไร้เม็ด มาใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดสีย้อมเพื่อนำไปใช้ในการย้อมผ้า เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มจากเปลือกเมล็ดมะขามและสร้างสีที่เป็นอัตลักษณ์ให้กับจังหวัดอุตรดิตถ์

เครื่องกะเทาะเปลือกมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเปลือกที่ห่อหุ้มเมล็ดออก และเมล็ดเกิดความเสียหายน้อยที่สุด โดยอาศัยหลักการของแรงกระแทก แรงกด แรงเฉือน และแรงขัดสีที่กระทำต่อเมล็ดด้วยเครื่องกะเทาะแบบต่างๆ [7, 8] เช่น เครื่องกะเทาะแบบลูกกลิ้งยาง เครื่องกะเทาะแบบจานหิน เครื่องกะเทาะแบบขัดสี เครื่องกะเทาะแบบแรงเหวี่ยงหรือแบบตี เป็นต้น ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพในการกะเทาะเปลือกจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การออกแบบกลไกและปรับตั้งเครื่องจักร (อัตราการปล่อย, ความเร็วรอบ, มุมใบตี, ระยะกะเทาะ) ลักษณะทางกายภาพของเมล็ด (ความชื้น, ขนาด, รูปร่าง, ปริมาตร, น้ำหนัก) วิธีการเตรียมเมล็ด (การคั่ว, การอบ, อุณหภูมิ, เวลาที่ใช้) เป็นต้น และจากการศึกษาการกะเทาะเปลือกด้วย

เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม พบว่า Singh et al. (2015) [9] ได้นำเมล็ดมะขามที่ทำการคั่วที่อุณหภูมิ 220 °C ไปทำการกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะแบบเหวี่ยงที่มีชุดลูกกลิ้งที่เป็นซี่ตี (spike tooth) หมุนที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที เพื่อนำไปทำเป็นผงเมล็ดมะขามและน้ำมันเมล็ดมะขาม งานวิจัยของวิโรจน์ (2558) [10] ได้ทำการพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดมะขามแบบตีและแบบสี พบว่า การนำเมล็ดมะขามเปรี้ยวไปคั่วที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 10 นาที มาทำการกะเทาะด้วยเครื่องตีที่ความเร็วรอบใบตี 1,000 รอบ/นาที และขนาดรูตะแกรงกะเทาะ 4 มม. จะได้เปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ดมะขามสูงสุดเท่ากับ 52.18 และการกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกแบบสีที่มีความเร็วรอบแกนสี 200 รอบ/นาที น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 250 กรัม ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์กะเทาะเมล็ดมะขามสูงสุดเท่ากับ 52.17 การกะเทาะทั้งสองแบบให้ผลเปอร์เซ็นต์กะเทาะเมล็ดมะขามที่ใกล้เคียงกัน แต่การกะเทาะเมล็ดมะขามนั้นควรเลือกใช้เครื่องกะเทาะแบบตีจะดีกว่าเครื่องกะเทาะแบบสีด้วยแกนเหล็กเพราะใช้เวลาการกะเทาะที่สั้นกว่า ขณะที่งานวิจัยของจิรวัฒน์ และคณะ (2566) [11] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่มีการออกแบบให้ใบตีมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ขนาดความกว้าง 80 มม. ยาว 14 มม. เจาะรูบนใบตีขนาด 8 มม. จำนวน 3 รู และขนาด 12 มม. จำนวน 2 รู ความเร็วรอบในการกะเทาะ 1,080 รอบ/นาที มีการทดสอบการกะเทาะเมล็ดมะขามที่ผ่านการคั่วที่เวลา 4, 5 และ 6 นาที ที่อุณหภูมิ 100 และ 120 °C พบว่า เมล็ดมะขามที่ผ่านการคั่ว 5 นาที ใช้อุณหภูมิ 120 °C เป็นค่าที่เหมาะสมกับการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม โดยมีเปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ดมะขามเฉลี่ยเท่ากับ 88.05 และใช้เวลาในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 150 กรัม เป็นเวลา 42.29 วินาที ทั้งนี้จากการทดลองใช้เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามดังกล่าว พบปัญหาช่องปล่อยเมล็ดที่มีขนาดใหญ่ โดยมีความกว้าง 90 มม. ความยาว 90 มม. การปล่อยเมล็ดมะขามให้หล่นไปกระทบกับใบตีจะต้องดึงลิ้นเปิดปิดช่องปล่อยออก โดยการใช้แรงงานคนเป็นผู้กำหนดอัตราความเร็วในการปล่อยเมล็ดมะขาม ทำให้ผลการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากผู้ปฏิบัติงานแต่ละคนมีประสิทธิภาพในการกะเทาะเมล็ดที่แตกต่างกัน

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยขจัดปัญหาเรื่องความเร็วในการดึงลิ้นเปิดช่องปล่อยเมล็ดมะขามของผู้ปฏิบัติงาน และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเมล็ดมะขาม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง เพื่อนำเปลือกเมล็ดมะขามไปใช้ในการย้อมสีธรรมชาติต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง

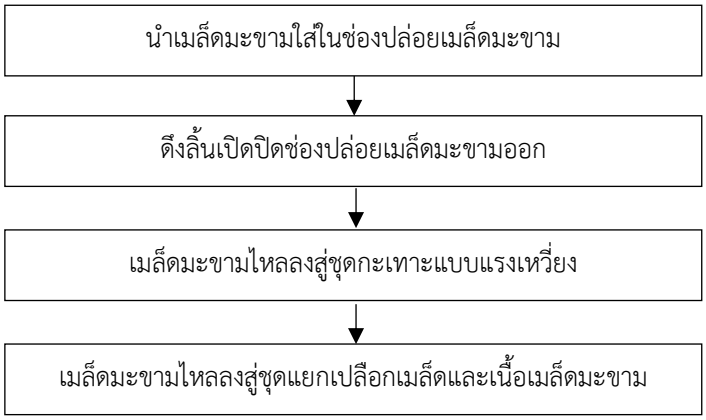
วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาการทำงานของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ

การทำงานของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ (ภาพที่ 1) จะเริ่มจากการที่ผู้ปฏิบัติงานนำเมล็ดมะขามใส่ในช่องปล่อยเมล็ดมะขาม จากนั้นจะทำการดึงลิ้นที่กั้นระหว่างช่องปล่อยเมล็ดกับใบตีออก เมื่อเมล็ดมะขามตกกระทบกับใบตีจะเกิดการกะเทาะเปลือกเมล็ดแล้วไหลลงบนตะแกรงที่มีการสั่น เพื่อช่วยแยกเปลือกเมล็ดและเนื้อเมล็ดมะขามออกจากกัน ดังแสดงขั้นตอนการทำงานในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ
ที่มา: จิรวัฒน์ และคณะ (2566) [11]



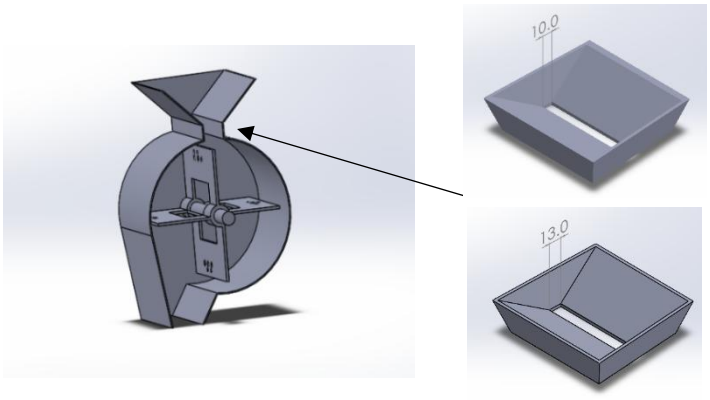
ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

2. การออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

จากการศึกษาการทำงานของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ พบปัญหาจากการใช้แรงงานคนเป็นผู้กำหนดความเร็วในการดึงลิ้นเพื่อเปิดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม ทำให้ประสิทธิภาพในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามมีความแตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกโดยการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักรและความปลอดภัยตามหลักการออกแบบเครื่องกล [12] เนื่องจากขนาดช่องปล่อยที่ไม่เหมาะสมทำให้การเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกะเทาะไม่สม่ำเสมอ [7] การเจาะรูใบตีทำให้มีพื้นที่สัมผัสน้อยและแรงกระแทกลดลง [10] ส่งผลให้ความสามารถในการกะเทาะลดลง และความเร็วเพลาในการกะเทาะมีผลทำให้ความสามารถในการทำงานของชุดกะเทาะมีค่าแตกต่างกัน [7] ดังนั้นการออกแบบและเลือกวัสดุ ขนาด รูปร่างของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลให้เหมาะสมกับการใช้งานจะทำให้เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม โดยมีการดำเนินการดังนี้

2.1 การออกแบบและพัฒนาชุดกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ได้มีการนำข้อมูลขนาดเมล็ดมะขามที่สุ่มมาจำนวน 100 เมล็ดมาใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบ ซึ่งพบว่า ด้านที่กว้างและด้านที่ยาวที่สุดของเมล็ดมะขามเท่ากับ 9.8 และ 12.7 มม. ดังนั้นเพื่อให้เมล็ดมะขามสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกะเทาะเปลือกเมล็ดได้สม่ำเสมอ จึงออกแบบช่องปล่อยเมล็ด

มะขามที่มีขนาดรูช่องปล่อยเมล็ด 2 ขนาด คือ 10 มม. และ 13 มม. (ภาพที่ 3) โดยทำการขึ้นรูปจากเครื่องปริ้นซ์ 3 มิติ รุ่น Creality Ender 3 V3se Printer ด้วยเส้นพลาสติก PLA+ 1.75 มม. และเพิ่มการทดสอบโดยใช้ใบตีแบบตัน



ภาพที่ 3 ช่องปล่อยเมล็ดขนาด 10 มม. และ 13 มม.

2.2 การออกแบบชุดส่งกำลังของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม มีการออกแบบโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/3 แรง 220 โวลต์ ความเร็วรอบ 1,440 รอบ/นาที เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนพลูเล่ย์แบบอัตราทดหลายชั้น โดยพลูเล่ย์ตัวที่ 1 เป็นแบบ 1 ร่อง A ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของชุดกะเทาะ มี 2 ขนาด คือ 50.8 และ 76.2 มม. พลูเล่ย์ตัวที่ 2 เป็นแบบ 2 ร่อง A เป็นพลูเล่ย์ของชุดกะเทาะขนาด 101.6 มม. และพลูเล่ย์ตัวที่ 3 เป็นแบบ 1 ร่อง A เป็นพลูเล่ย์ชุดกำลังของชุดแยกเปลือกเมล็ดและเนื้อเมล็ดมะขามขนาด 152.4 มม.

ทั้งนี้ในกรณีที่มีการใช้พลูเล่ย์ตัวที่ 1 ขนาด 50.8 มม. จะทำให้มีความเร็วรอบของชุดกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (n1) = 720 รอบ/นาที แต่หากมีการใช้พลูเล่ย์ตัวที่ 1 ขนาด 76.2 มม. จะทำให้มีความเร็วรอบของชุดกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (n1) = 1,080 รอบ/นาที

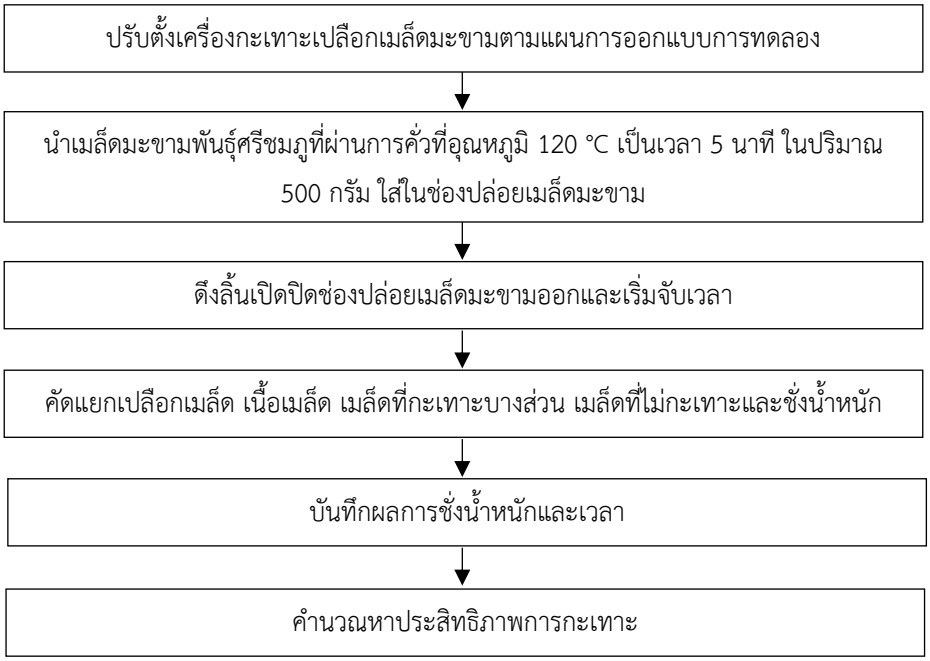
3. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เป็นเครื่องมือทางสถิติที่ประยุกต์ใช้อย่างเป็นระบบสำหรับการออกแบบ การดำเนินการและประเมินผลการทดลอง [13] ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำไปใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลาย [14, 15, 16] ผู้วิจัยจึงได้นำกรอบแนวคิดสำหรับการออกแบบการทดลอง [17] มาใช้ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ซึ่งจากการพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามมีปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง 3 ปัจจัย คือ ใบตี ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขามและความเร็วรอบในการกะเทาะ โดยใบตีมี 2 แบบ คือ แบบใบตันและแบบเจาะรู ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขามมี 2 ขนาด คือ 10 และ 13 มม. ส่วนความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขามมี 2 ระดับ คือ 720 และ 1,080 รอบ/นาที ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สำหรับศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ ซึ่งเท่ากับ 2^3 การทดลองหรือ 8 การทดลอง และมีการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ทำให้มีการทดลองทั้งสิ้น 24 การทดลอง โดยมีลำดับการทดลองแบบสุ่ม

ทั้งนี้ในการหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามซึ่งมีตัวแปรตอบสนอง 2 ตัว คือ ปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากการกะเทาะและเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม จะสามารถประเมินตัวแปรเหล่านั้นแยกกันได้ แต่การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะต้องนำตัวแปรตอบสนองที่แตกต่างกันมาพิจารณาร่วมกัน [13]

4. การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

การทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม และหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง มีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การหาประสิทธิภาพการกะเทาะของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม คำนวณได้ดังสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพการกะเทาะ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักเปลือกเมล็ดมะขาม + น้ำหนักเนื้อเมล็ดมะขาม}}{\text{น้ำหนักเมล็ดมะขามก่อนการกะเทาะ}} \times 100 \qquad (1)$$

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบจะมีการนำผลการทดลองคือ ปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามและเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม มาทำการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด (Residual) เพื่อยืนยันความถูกต้องของตัวแบบ และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างประชากร ดังนั้นการวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงเป็นการวิเคราะห์ผลหลักของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ ใบตี ขนาดรูของช่องปล่อยเมล็ดมะขามและความเร็วรอบในการกะเทาะ รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย 3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกัน และในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม จะมีการพิจารณาภายใต้เป้าหมายของปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากการกะเทาะที่มากที่สุด และเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่น้อยที่สุด โดยใช้ Response Optimizer

ผลการวิจัย

ผลการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามตามเงื่อนไขของการออกแบบการทดลอง สามารถแสดงผลการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม คือ ปริมาณเปลือกเมล็ด ปริมาณเนื้อเมล็ด และเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ดังตารางที่ 1 ซึ่งจากการคำนวณหาประสิทธิภาพการกะเทาะของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม พบว่า มีประสิทธิภาพการกะเทาะอยู่ในช่วง 67.16 – 97.38% และมีเวลาในการกะเทาะเปลือกอยู่ในช่วง 14.90 – 50.81 วินาที โดยตัวอย่างผลการกะเทาะเมล็ดมะขาม คือ เปลือกเมล็ดมะขาม เนื้อเมล็ดมะขาม เมล็ดมะขามที่ถูกกะเทาะบางส่วนและเมล็ดมะขามที่ไม่ถูกกะเทาะ แสดงดังภาพที่ 5

ตารางที่ 1 ผลการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามตามการวางแผนการออกแบบการทดลอง

ลำดับที่	การทดลอง	ใบตี	ขนาดช่อง (มม.)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	เปลือกเมล็ด (กรัม)	เนื้อเมล็ด (กรัม)	เวลา (วินาที)
23	1	เจาะรู	13	720	122.9	267.3	19.03
6	2	เจาะรู	10	1080	124.7	280.2	23.59
20	3	ใบตัน	13	1080	148.2	332.1	18.07
10	4	ใบตัน	10	1080	150.0	336.9	25.53
1	5	ใบตัน	10	720	135.4	292.3	43.11
2	6	ใบตัน	10	1080	148.0	331.9	33.29
19	7	ใบตัน	13	720	104.0	231.8	15.01
14	8	เจาะรู	10	1080	137.6	303.1	31.24
18	9	ใบตัน	10	1080	147.9	329.0	28.60
13	10	เจาะรู	10	720	123.6	278.2	34.76
4	11	ใบตัน	13	1080	148.4	326.4	20.49
7	12	เจาะรู	13	720	112.4	260.9	14.93
9	13	ใบตัน	10	720	127.4	299.0	45.36
12	14	ใบตัน	13	1080	145.3	329.1	15.45
24	15	เจาะรู	13	1080	124.6	275.0	13.56
21	16	เจาะรู	10	720	118.2	271.5	42.29
11	17	ใบตัน	13	720	104.5	233.7	17.64
8	18	เจาะรู	13	1080	129.9	294.8	16.39
16	19	เจาะรู	13	1080	120.8	271.1	20.94
5	20	เจาะรู	10	720	131.1	284.9	37.92
3	21	ใบตัน	13	720	111.1	243.0	14.90
22	22	เจาะรู	10	1080	127.3	286.5	28.66
15	23	เจาะรู	13	720	126.1	274.4	16.29
17	24	ใบตัน	10	720	138.2	294.6	50.81



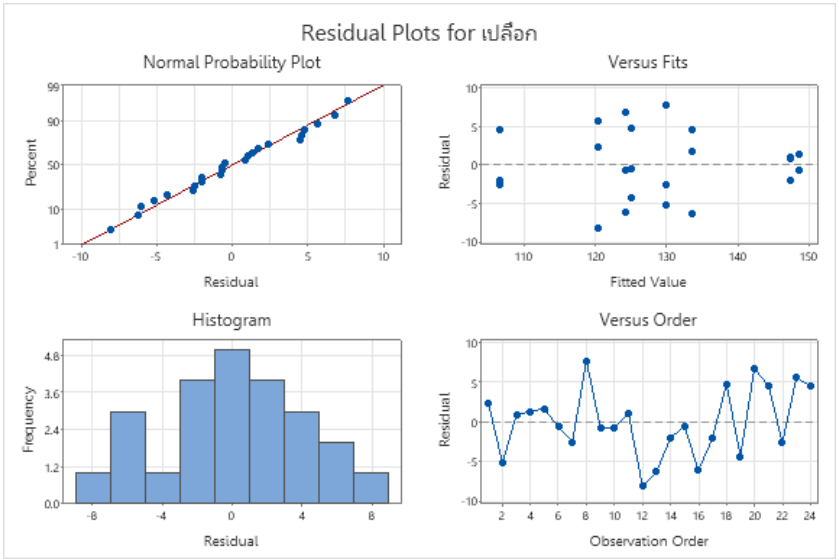
ภาพที่ 5 ตัวอย่างผลการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

1. ผลการทดลองแบบแยกพิจารณาตัวแปรตอบสนอง

ผลการทดลองการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อหาค่าความเหมาะสมของปัจจัยแบบแยกพิจารณาตัวแปรตอบสนอง เป็นการแยกพิจารณาผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม และผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากการกะเทาะ

การทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม จะเริ่มต้นจากการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่กะเทาะได้ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์แผนภาพแสดงค่าความคาดเคลื่อน (Residual Plot) ดังภาพที่ 6 พบว่า ค่าความผิดพลาด (Residual) ของข้อมูลมีการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดเป็นการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนคงที่ของค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบสุ่ม และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถกล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและเหมาะสมต่อการใช้วิเคราะห์ และการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 2 พบว่า ใบตี ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขามและความเร็วรอบในการกะเทาะ มีค่า $P<0.05$ แสดงว่า มีอิทธิพลต่อปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาการเกิดอันตรกิริยาแบบ 2 ปัจจัย และแบบ 3 ปัจจัย พบว่า ค่า $P<0.05$ แสดงว่า มีอิทธิพลต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Plot) ของปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม

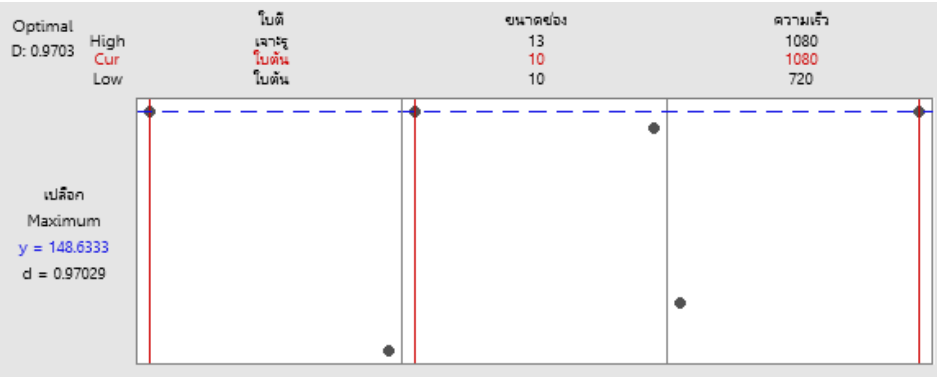
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม

แหล่งที่มา	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	ค่าสถิติ (F_0)	P-Value
ตัวแบบจำลอง	7	4067.7	581.09	21.90	0.000
การถดถอยเชิงเส้น	3	2642.3	880.76	33.19	0.000
ใบตี	1	496.9	496.86	18.72	0.001
ขนาดช่อง	1	515.2	515.23	19.42	0.000
ความเร็วรอบ	1	1630.2	1630.20	61.43	0.000
อันตรกิริยา 2 ปัจจัย	3	1157.4	385.79	14.54	0.000
ใบตี*ขนาดช่อง	1	148.0	148.01	5.58	0.031
ใบตี*ความเร็วรอบ	1	777.5	777.48	29.30	0.000
ขนาดช่อง*ความเร็วรอบ	1	231.9	231.88	8.74	0.009
อันตรกิริยา 3 ปัจจัย	1	268.0	268.00	10.10	0.006
ใบตี*ขนาดช่อง*ความเร็วรอบ	1	268.0	268.00	10.10	0.006
ค่าผิดพลาด	16	424.6	26.54		
ผลรวม	23	4492.3			

การวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เป้าหมายของปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่ได้จากการกะเทาะมากที่สุด โดยใช้ Response Optimizer พบว่า การใช้ใบตีแบบตัน โดยมีขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม 10 มม.ที่ความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 1,080 รอบ/นาที เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (ภาพที่ 7) โดยมีปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 148.63 กรัม ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม

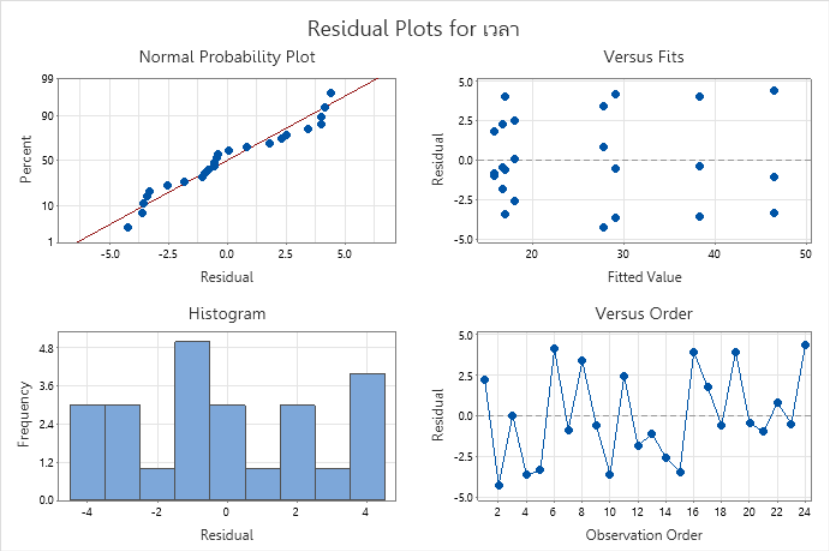
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
เปลือก	148.63	2.97	(142.33, 154.94)	(136.02, 161.24)



ภาพที่ 7 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับปริมาณเปลือกเมล็ดมะขาม

1.2 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

การทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม จะเริ่มต้นจากการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์แผนภาพแสดงค่าความคาดเคลื่อน (Residual Plot) ดังภาพที่ 8 พบว่า ค่าความผิดพลาด (Residual) ของข้อมูลมีการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดเป็นการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนคงที่ของค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบสุ่ม และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงสามารถกล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและเหมาะสมต่อการใช้วิเคราะห์ และการวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 4 พบว่า ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม และความเร็วรอบในการกะเทาะ มีค่า $P<0.05$ แสดงว่า มีอิทธิพลต่อเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามอย่างมีนัยสำคัญ แต่ใบตีมีค่า $P>0.05$ แสดงว่า ไม่มีอิทธิพลต่อเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาการเกิดอันตรกิริยาแบบ 2 ปัจจัย พบว่า ปัจจัยระหว่างขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขามและความเร็วรอบในการกะเทาะมีค่า $P<0.05$ แสดงว่า มีอิทธิพลต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปัจจัยปัจจัยระหว่างใบตีและขนาดช่องปล่อย ใบตีและความเร็วรอบ และการเกิดอันตรกิริยา 3 ปัจจัย มีค่า $P>0.05$ แสดงว่า ไม่มีอิทธิพลต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 8 ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Plot) ของเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

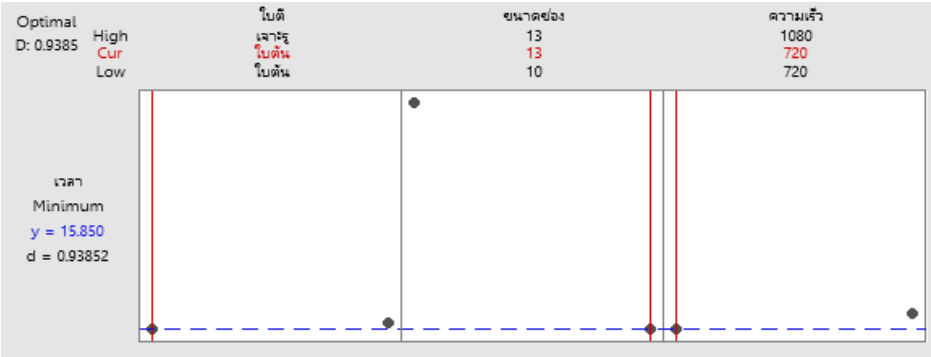
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

แหล่งที่มา	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	ค่าสถิติ (F_0)	P-Value
ตัวแบบจำลอง	7	2748.92	392.70	35.95	0.000
การถดถอยเชิงเส้น	3	2338.43	779.48	71.37	0.000
ใบตี	1	34.22	34.22	3.13	0.096
ขนาดช่อง	1	2062.02	2062.02	188.79	0.000
ความเร็วรอบ	1	242.19	242.19	22.17	0.000
อันตรกิริยา 2 ปัจจัย	3	381.89	127.30	11.65	0.000
ใบตี*ขนาดช่อง	1	32.25	32.25	2.95	0.105
ใบตี*ความเร็วรอบ	1	8.83	8.83	0.81	0.382
ขนาดช่อง*ความเร็วรอบ	1	340.81	340.81	31.20	0.000
อันตรกิริยา 3 ปัจจัย	1	28.60	28.60	2.62	0.125
ใบตี*ขนาดช่อง*ความเร็วรอบ	1	28.60	28.60	2.62	0.125
ค่าผิดพลาด	16	174.75	10.92		
ผลรวม	23	2923.68			

การวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เป้าหมายของเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่น้อยที่สุด โดยใช้ Response Optimizer พบว่า การใช้ใบตีแบบตัน โดยมีขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม 13 มม.ที่ความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 720 รอบ/นาที เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (ภาพที่ 9) โดยมีเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 15.85 วินาที ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
เวลา	15.85	1.91	(11.81, 19.89)	(7.76, 23.94)



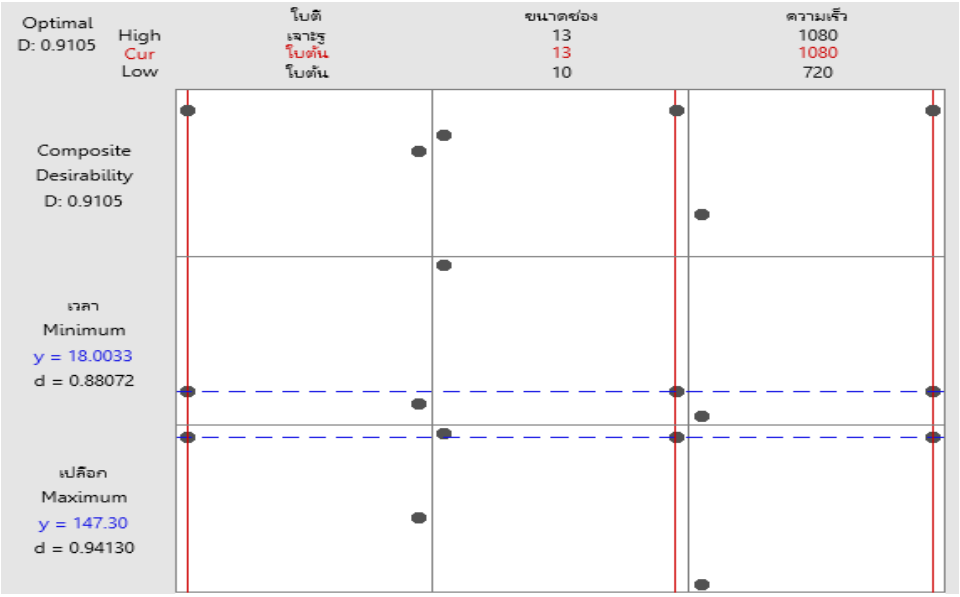
ภาพที่ 9 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมกับเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

2. ผลการวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

ผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการออกแบบการทดลอง พบว่า ค่าปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามที่มากที่สุด และค่าปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่น้อยที่สุด มีระดับของปัจจัยที่เหมาะสมแตกต่างกันตามเงื่อนไขการทดลอง ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามจึงต้องมีการนำผลการทดลองมาพิจารณาร่วมกัน โดยใช้ Response Optimizer พบว่า การใช้ใบตีแบบตัน โดยมีขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม 13 มม.ที่ความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 1,080 รอบ/นาที เป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (ภาพที่ 10) โดยมีเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 18.00 วินาที และมีปริมาณเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 147.30 กรัม ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
เวลา	18.00	1.91	(13.96, 22.05)	(9.91, 26.09)
เปลือกเมล็ดมะขาม	147.30	2.97	(141.00, 153.60)	(134.69, 159.91)



ภาพที่ 10 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม

อภิปรายผล

การพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ได้มีการออกแบบช่องปล่อยเมล็ดมะขามให้มีการปล่อยเมล็ดมะขามผ่านช่องปล่อยที่มี 2 ขนาด คือ 10 และ 13 มม. เนื่องจากขนาดช่องปล่อยที่ไม่เหมาะสมทำให้การเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกะเทาะไม่สม่ำเสมอ สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐพล และคณะ (2562) [7] ได้ทำการศึกษาผลของระยะกะเทาะและความเร็วเพลาของจานกะเทาะต่อสมรรถนะของชุดกะเทาะเปลือกดาวอินคา พบว่า ช่องป้อนที่มีขนาดไม่เหมาะสมทำให้ฝักดาวอินคาเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดกะเทาะไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานของชุดกะเทาะลดลดลง

การออกแบบใบตีให้มี 2 รูปแบบ คือ ใบตีแบบตันและใบตีแบบเจาะรู เนื่องจากการเจาะรูใบตีทำให้มีพื้นที่สัมผัสน้อยและแรงกระแทกลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกะเทาะเปลือก สอดคล้องกับงานวิจัยของวิโรจน์ (2558) [10] ได้ทำการพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดมะขาม ซึ่งมีการเจาะรูใบตีขนาด 6 มม. จำนวน 40 รู ขณะที่เมล็ดมะขามมีความกว้างเฉลี่ย 10.73 มม. ความยาวเฉลี่ย 14.14 มม. ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการกะเทาะสูงสุด 52.18% และการออกแบบชุดส่งกำลังให้มีความเร็วรอบ 2 ระดับ คือ 720 รอบ/นาที และ 1,080 รอบ/นาที สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐพล และคณะ (2562) [7] พบว่า ระยะกะเทาะและความเร็วเพลาของจานกะเทาะมีผลทำให้ความสามารถในการทำงานของชุดกะเทาะมีค่าแตกต่างกัน ผลจากการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทำให้มีปัจจัยสำคัญ 3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม คือ ขนาดช่องปล่อยเมล็ดมะขาม ใบตี และความเร็วรอบในการกะเทาะ ดังนั้นในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะเมล็ดมะขามโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสม สอดคล้องกับงานวิจัยของเอราวัณ และ ยศวรรธน์ (2565) [14] ซึ่งมีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ปรับตั้งเครื่องอัดยางขอบมุ้งลวดด้วยวิธีออกแบบการทดลอง ส่งผลให้สามารถลดเวลาการทำงานและเพิ่มกำลังการผลิต การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการในการปรับตั้งเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า การกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามควรมีการเลือกใช้ใบตีแบบตัน เนื่องจากใบตีแบบตันจะมีแรงกระแทกที่สูงกว่าใบตีแบบเจาะรู ซึ่งสอดคล้องกับกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน [18] และการเลือกใช้ความเร็วรอบในการกะเทาะ 1,080 รอบ/นาที ซึ่งมีค่าความเร็วรอบที่สูงกว่า ทำให้ใบตีหมุนเร็วกว่า แรงเหวี่ยงและแรงกระแทกจะสูง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการกะเทาะสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐพล และคณะ (2562) [7] ซึ่งพบว่า การเพิ่มความเร็วรอบทำให้เปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ดน้ำตาลของถั่วดาวอินคาเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การเลือกใช้ช่องปล่อยเมล็ดมะขามที่มีขนาด 13 มม. จะมีประสิทธิภาพการกะเทาะระหว่าง 67.16 – 96.06% ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพสูงสุดเป็นอันดับที่ 2 เนื่องจากการใช้ช่องปล่อยที่มีขนาดใหญ่ทำให้การปล่อยเมล็ดมะขามเข้าสู่ชุดกะเทาะมีปริมาณมาก การรับแรงกระแทกและแรงเหวี่ยงจะลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกะเทาะลดลงเล็กน้อย แต่เวลาที่ใช้ในการกะเทาะเมล็ดมะขามก็ลดลงด้วยเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Patil et al. [19] ซึ่งพบว่า การลดอัตราการปล่อยข้าวฟ่างเข้าสู่เครื่องกะเทาะเปลือกจะทำให้ขีดความสามารถในการกะเทาะเปลือกลดลง เนื่องจากใช้เวลาในการปล่อยข้าวฟ่างนาน แต่ประสิทธิภาพของการกะเทาะเปลือกจะเพิ่มขึ้น ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามที่เพิ่มขึ้น 7.25% ด้วยการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม ทั้งนี้ในการทดลองมีการนำเมล็ดมะขามพันธุ์ศรีชมภูที่มีการเตรียมเมล็ดด้วยการคั่วที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 5 นาที มาใช้ทำการทดลอง โดยไม่ได้นำค่าความชื้นมาเป็นข้อกำหนดในการทดลอง การนำเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามไปใช้อาจได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างออกไป เนื่องจากความแตกต่างของคุณลักษณะของเมล็ดมะขาม ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งต่อไปจึงควรใช้ค่าความชื้นของเมล็ดมาเป็นข้อกำหนดในการทดลอง และทำการทดลองกับเมล็ดมะขามสายพันธุ์อื่นๆ เพื่อให้เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามสามารถใช้ได้กับทุกสายพันธุ์

สรุปผล

จากการพัฒนาเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามโดยการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการใช้งานเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม คือ การใช้ใบตีแบบตัน โดยมีช่องปล่อยเมล็ดขนาด 13 มม. และมีความเร็วรอบในการกะเทาะเมล็ดมะขาม 1,080 รอบ/นาที ซึ่งทำให้สามารถกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามได้ในปริมาณเฉลี่ย 147.30 กรัม และมีเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามเฉลี่ย 18.00 วินาที ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ลดลงจากเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขามต้นแบบ 24.29 นาที แต่มีการใช้เมล็ดมะขามในการทดลองเพิ่มขึ้น 350 กรัม และมีประสิทธิภาพการกะเทาะเฉลี่ย 95.3%

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนการสนับสนุนงบประมาณในการเผยแพร่งานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. กรมส่งเสริมการเกษตร. รายงานข้อมูลภาวะการผลิตพืช จำแนกตามชนิดพืช/แมลง [อินเตอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร; 2566 [เข้าถึงเมื่อ 18 มิถุนายน 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://production.doae.go.th
2. เพิ่มศักดิ์ พันธ์แตง, ธนกิจ ถาหมี, ดุษฎี บุญธรรม. การพัฒนาโมเดลธุรกิจแคนวาสแบบมีส่วนร่วมเพื่อเพิ่มความสามารถในการประกอบธุรกิจของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลไม้แปรรูปบ้านเสี้ยว. วารสารการจัดการสมัยใหม่. 2566; 22(1): 42-59. https://so04.tci-thaijo.org/index.php/stou-sms-pr/article/view/271208
3. ปัญจภัสร์ จิรณิศราวิทย์, พนัชกร สุทธไชย. การศึกษาปริมาณแป้งเมล็ดมะขามทดแทนแป้งสาลีที่เหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์คุกกี้. วารสารสุขภาพและอาหารเชิงสร้างสรรค์. 2567; 2(2): 1-13. https://he03.tci-thaijo.org/index.php/JHFC/article/view/3291
4. ซุวารี เจ๊ะอาแว, สุไฮนี ขาเดร์, ปิยะนุช สุวรรณรัตน์, ศิริรัตน์ ศรีรักษา. การพัฒนาผลิตภัณฑ์พอกผิวกายจากเนื้อเมล็ดมะขาม. วารสารการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. 2564; 19(1): 135-146. https://he01.tci-thaijo.org/index.php/JTTAM/article/view/240002
5. ครุปกรณ์ ละเอียดอ่อน, สมหมาย ปะติตังโข, กิ่งแก้ว ปะติตังโข. การเลี้ยงไก่ด้วยสารเสริมจากเปลือกเมล็ดมะขามเพื่อลดต้นทุนการผลิตของเกษตรกรในจังหวัดบุรีรัมย์. วารสารวิจัยราชภัฏเชียงใหม่, 2562; 20(1): 31-40. https://so05.tci-thaijo.org/index.php/cmruresearch/article/view/153263
6. อรนุช นาคชาติ. การพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในการผลิตผ้าไหมย้อมสีด้วยเมล็ดมะขามเพื่อเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ : กรณีศึกษาผ้าขาวม้า บ้านทัพกระบือ ตำบลสำโรง อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์. วารสารวิจัยวัฒนธรรม. 2564; 4(1): 106-119. https://book.culture.go.th/reseach_jul_dec_64/mobile/index.html#p=109
7. ณัฐพล โสกุดเลาะ, กิตติพงษ์ ลาลุน, ศักดิ์ดา จาปานา, สมโภชน์ สุดาจันทร์, นิรัติศักดิ์ คงทน. ผลของระยะกะเทาะและความเร็วเพลาของจานกะเทาะต่อสมรรถนะของชุดกะเทาะเปลือกดาวอินคา. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา). 2562; 19(3): 61-71. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/gskku/article/view/208431
8. Singh, SM, Joshi, TJ, Rao, PS. Technological advancements in millet dehulling and polishing process: An insight into pretreatment methods, machineries and impact on nutritional quality. Grain & Oil Science and Technology. 2024; 7(3): 186-195. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2024.05.007
9. Rao, AS, Kumar, AA, Ramana, MV. Tamarind seed processing and by-products. CIGR Journal [Internet]. 2015 [cited 2015 June 23]; 17(2): 200-204. Available from: https://cigrjournal.org/index.php/Ejounral/article/view/3125/2135

10. วิโรจน์ ตรีมงคล. การพัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดมะขาม (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). คณะวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2558. https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2015/TU_2015_5510032047_4395_2766.pdf
11. จิรวัฒน์ ธรรมชัย, ปรัชญา มาอยู่, ธนกฤต จุมจา, ณัฐพงศ์ เสือปรางค์. เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะขาม (ปริญญานิพนธ์ปริญญาเทคโนโลยีบัณฑิต). คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. อุตรดิตถ์: มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์; 2566.
12. อิเคดะ, ชิเงรุ, นากานิชิ, ยูจิ. การออกแบบเครื่องจักรกล. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น); 2561.
13. Bosch. Design of Experiments (DoE). Germany: Robert Bosch GmbH; 2010. 98.
14. เอราวัณ ชาญพหล, ยศวรรธน์ จันทนา. การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ปรับตั้งเครื่องอัดยางขอบมุ้งลวดด้วยวิธีออกแบบการทดลอง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม. 2565; 15(2): 156-164. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/eng_ubu/article/view/244047
15. Brahmi M, Ba M, Hidri Y, Hassen A. Factorial experimental design intended for the optimization of the alumina purification conditions. Journal of Molecular Structure. 2018; 1157: 567-578. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.12.071
16. Gürkan EH, Tibet Y, Çoruh S. Application of Full Factorial Design Method for Optimization of Heavy Metal Release from Lead Smelting Slag. Sustainability. 2021; 13(9): 4890. https://doi.org/10.3390/su13094890
17. Proust M. Design of Experiments Guide. Cary, NC: JMP Statistical Discovery LLC; 2024. 846.
18. เซอร์เวย์, เรย์มอนด์ เอ, จีเวท, จอร์น ดับเบิลยู. ฟิสิกส์ 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: เซนเกจ เลินนิ่ง อินโด-ไชน่า; 2561. 704.
19. Patil, M, Gupta, AK, Nayak, P. Design, development and performance evaluation of minor millet de-husker. International Journal of Farm Sciences. 2018; 8(1): 63-69. https://doi.org/10.5958/2250-0499.2018.00015.0