

เครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะคาเดเมียแบบอัตโนมัติ

วิรัช แสงสุริยฤทธิ์^{1*} และ อรทัย ตั้งสิรินฤนาท²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้ประพันธ์บทความ

ที่อยู่อีเมล: wirat.s@en.rmutt.ac.th

Received: August 13, 2026 Revised: September 11, 2026 Accepted: September 23, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเปลือกมะคาเดเมียแบบอัตโนมัติ การศึกษามี 2 ตอนคือ ตอนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพมะคาเดเมีย 250 เมล็ด พบว่า มะคาเดเมียก่อนกะเทาะมีความชื้น 12.61 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก มีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความกว้าง ความยาว ความหนา และน้ำหนักเท่ากับ 24.16 ± 1.76 25.00 ± 1.91 23.95 ± 1.89 มิลลิเมตร และ 7.72 ± 1.66 กรัมตามลำดับ และสำหรับเนื้อในมะคาเดเมียเท่ากับ 18.99 ± 4.04 19.86 ± 1.72 16.05 ± 1.57 มิลลิเมตร และ 2.84 ± 0.71 กรัม เปลือกมีความแข็ง 2,092 นิวตัน และ ตอนที่ 2 ออกแบบ สร้าง และทดสอบการทำงาน เครื่องต้นแบบมี 3 ส่วนคือ ส่วนรับวัตถุดิบขนาดบรรจุ 3 กิโลกรัม ทำหน้าที่ป้อนวัตถุดิบอย่างต่อเนื่องเข้าสู่กลไกการกะเทาะ ส่วนการกะเทาะประกอบด้วยหัวกะเทาะและจุดรับการกระแทก และส่วนทางออก การทำงานเริ่มที่มะคาเดเมียไหลจากส่วนรับวัตถุดิบลงในเข้าของจุดรับการกระแทก หัวกะเทาะกระแทกวัตถุดิบที่ตำแหน่งบนสุดด้วยกลไกเจ็ทน้ำตามจังหวะการเคลื่อนที่ ทำให้เปลือกเกิดการแตกหักและไหลลงสู่ส่วนทางออก ผลการทดสอบเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า เมล็ดเต็มที่ได้จากการกะเทาะที่ความเร็ว 3 ระดับ และเมล็ดเต็มที่ได้จากการกะเทาะมะคาเดเมียขนาดเล็กและขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน เท่ากับ 66.07 และ 66.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างเมล็ดเต็มของมะคาเดเมียขนาดกลางโดยมีประสิทธิภาพการกะเทาะ 53.76 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความสามารถในการกะเทาะเป็นสัดส่วนตรงกับขนาดมะคาเดเมียและความเร็วการกะเทาะ โดยมะคาเดเมียขนาดใหญ่มีความสามารถในการกะเทาะสูงสุด 7.86 ± 0.10 11.50 ± 0.06 และ 15.33 ± 0.35 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็ว 2 3 และ 4 รอบต่อนาที ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ปริมาณการขายที่จุดคุ้มทุนของเนื้อในเมล็ดเต็มเท่ากับ 13.59 กิโลกรัม หรือมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 16 วัน

คำสำคัญ: เครื่องกะเทาะ มะคาเดเมีย กลไกเจ็ทน้ำ การกระแทก

Automatic macadamia nut cracker machine

Wirat Sangsuriyarid^{1*} and Orathai Tangsirinaruenart²

¹ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

* Corresponding author.

Email address: wirat.s@en.rmutt.ac.th

Received: August 13, 2026 Revised: September 11, 2026 Accepted: September 23, 2026

Abstract

This research is to design and build an automatic macadamia nut cracker. The study has two parts: Part 1 involved examining the physical properties of 250 macadamia nuts found that wet standard humidity 12.61%. The mean values and standard deviations for width, length, thickness, and weight were 24.16 ± 1.76 mm, 25.00 ± 1.91 mm, 23.95 ± 1.89 mm, and 7.72 ± 1.66 g, respectively; for the kernels, the corresponding values were 18.99 ± 4.04 mm, 19.86 ± 1.72 mm, 16.05 ± 1.57 mm, and 2.84 ± 0.71 g. The shell hardness was 2,092 N. Part 2 involved the design, assemble, performance testing of the prototype, which consists of three sections. (1) A raw material intake section with a 3 kg capacity that continuously feeds material into the cracking mechanism. (2) A cracking section comprising a cracking head and an impact point. (3) An exit section. The operation begins as macadamia nuts flow from the intake section into the impact receiver's socket. A cracking head strikes the nuts at the uppermost position, driven by a Geneva mechanism synchronized with the movement cycle, causing the shells to fracture before the nuts flow toward the exit section. Statistical analysis at a significance level of 0.05 revealed no significant difference in the percentage of whole kernels obtained across the three cracking speeds or between small and large macadamia nuts (66.07% and 66.83%, respectively); however, a difference was observed for medium-sized macadamia nuts, which yielded a whole-kernel percentage of 53.76%. Cracking capacity was directly proportional to macadamia size and cracking speed; large macadamias achieved maximum capacities of 7.86 ± 0.10 , 11.50 ± 0.06 , and 15.33 ± 0.35 kg/h at speeds of 2, 3, and 4 rpm, respectively. Economic analysis revealed a break-even sales volume of 13.59 kg for whole kernels, corresponding to a payback period of 16 days.

Keywords: Cracker, Macadamia, Geneva mechanism, Impact

1. บทนำ

มะคาเดเมียมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Macadamia integrifolia* อยู่ในวงศ์ Protaceae มะคาเดเมียเจริญได้ดีในภูมิอากาศเย็นและอยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลกว่า 700 เมตร ทำให้จังหวัดภาคเหนือของประเทศไทยซึ่งประชากรส่วนใหญ่มีฐานะยากจนได้รับโอกาสในการประกอบอาชีพและสร้างรายได้ให้กับครอบครัวได้ตลอดทั้งปี มะคาเดเมียมีเปลือก 2 ชั้น คือ ชั้นเปลือกเขียวและชั้นเปลือกกะลา [1] ปัจจุบันการกะเทาะเปลือกเขียวทำได้สมบูรณ์มากกว่า 99.50% มีความสามารถในการกะเทาะ 634.77 kg/h [2] ส่วนการกะเทาะเปลือกกะลาในระดับเกษตรกร มีงานวิจัยที่ใช้แรงคน ใช้หลักการกดและหลักการกระแทกในรูปแบบต่าง ๆ ได้เมล็ดเต็มสูงสุด 69% และมีความสามารถในการกะเทาะสูงสุด 5.01 kg/h [3][4] สำหรับวิธีที่ดีที่สุดในปัจจุบันสำหรับแรงคนคือ ใช้หลักการกระแทก เพิ่มใบมีดออกแบบพิเศษและเพิ่มอุปกรณ์ถ่วงน้ำหนักหัวกะเทาะ ได้ความสำเร็จเมล็ดเต็มสูงถึง 89.87% มีความสามารถในการกะเทาะ 5.20 kg/h ข้อจำกัด คือ คนใช้เครื่องกะเทาะต้องมีประสบการณ์ในการกะเทาะสูง [4] และวิธีที่ดีที่สุดในระดับอุตสาหกรรม ได้ความสำเร็จเมล็ดเต็ม 61.68% และความสามารถในการกะเทาะ 191.87 kg/h [5] ความสำเร็จในการกะเทาะนอกจากจะขึ้นกับปัจจัยในด้านเครื่องจักรและหลักการกะเทาะแล้ว สิ่งสำคัญคือ ลักษณะเนื้อในกับเปลือก (กะลา) จะต้องไม่ติดกัน จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า การแตกหักของเนื้อในเกิดจากเนื้อในติดแน่นกับเปลือก ทำให้ขณะกะเทาะเกิดการแตกเป็นชิ้นที่ไม่แน่นอน ดังนั้นก่อนทำการกะเทาะ เมล็ดมะคาเดเมียจะต้องผ่านการอบด้วยลมร้อนอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมเพื่อระเหยน้ำของเนื้อในและเปลือกออกไป เพิ่มช่องว่างระหว่างเปลือกกับเนื้อในขึ้น ส่งผลทำให้เนื้อในเกิดการคลอนขึ้น และจะได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 5%wb [6][7] ดังนั้นคุณภาพเนื้อในที่ได้จากการกะเทาะจึงสำคัญมาก ราคาเนื้อในนอกจากพิจารณาในด้านขนาดแล้วยังดูเรื่องการแตกหักด้วยโดยแบ่งตามเกรด เช่น เกรด A เมล็ดใหญ่ไม่แตกหัก เกรด B เมล็ดเล็กไม่แตกหัก และเกรด C เมล็ดแตก เป็นต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพมะคาเดเมีย ออกแบบ สร้างทดสอบผลสัมฤทธิ์และประสิทธิภาพในการกะเทาะของเครื่องต้นแบบโดยเลือกใช้เทคนิคการกะเทาะจากแรงงานคนที่ให้ผลสำเร็จดีที่สุดในปัจจุบันและเลือกใช้การกะเทาะแบบต่อเนื่องเพื่อสร้างโอกาสในการแข่งขัน

ทั้งในและต่างประเทศให้แก่เกษตรกรหรือวิสาหกิจชุมชน รวมถึงการสร้างชื่อเสียงให้กับประเทศชาติต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพมะคาเดเมีย

1. หาขนาดและน้ำหนักเฉลี่ยของมะคาเดเมีย ทั้งก่อนและหลังการกะเทาะ วิธีการคือ สุ่มมะคาเดเมีย จำนวน 250 เมล็ด วัดความกว้าง ความยาว ความหนา ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง จากนั้นนำไปกะเทาะเปลือกออก เมล็ดในที่ได้นำไปวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก

2. หาความแข็งเปลือกมะคาเดเมียที่ผ่านการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักก่อนการกะเทาะ 250 เมล็ด นำมาทดสอบการแตกหักของเปลือกมะคาเดเมียด้วยเครื่อง Texture analyzer ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LRX plus ด้วยโหมด General purpose compression setup > Compress to limit test setup หัวทดสอบรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 mm หนา 6 mm ความเร็ว 60 mm/min ระยะการกด 18 %strain [8] (ระยะดีที่สุดที่ทำให้เปลือกกะลาแตกโดยเนื้อในเสียหายน้อยที่สุด ขั้นตอนนี้ได้จากการทดสอบเบื้องต้น) ในการทดสอบติดตั้งแท่นเสริมลักษณะเป็นรูปวงกลมสำหรับวางเมล็ดมะคาเดเมียโดยมีรูตรงกลางเพื่อป้องกันไม่ให้เมล็ดเคลื่อนตัวขณะทำการทดสอบ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทดสอบความแข็งเปลือก

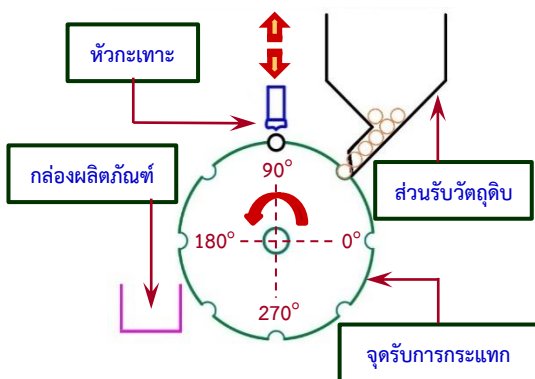
3. หาความชื้นมะคาเดเมีย มะคาเดเมีย 3 เมล็ดต่อถ้วย จำนวน 12 ถ้วย อบในตู้อบอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 72-96 h หรือน้ำหนักคงที่ [9] ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง คำนวณความชื้นจากสมการที่ 1

$$\%mc_{wb} = \frac{(m_w - m_d)}{m_w} \times 100 \quad (1)$$

$\%m_{C_{wb}}$ = เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก
 m_w = น้ำหนักเริ่มต้นก่อนอบ (g)
 m_d = น้ำหนักสุดท้ายหลังอบ (g)

2.2 ออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะ

การออกแบบใช้หลักการของแรงกระแทก เริ่มด้วยมะคาเดเมียบรรจุในส่วนรับวัตถุดิบ ไหลผ่านช่องลาดเอียงเป็นแนวเรียงตัวลงลงในเข้าของจุดรับการกระแทก (45°) ครั่งจะเคลื่อนตามจังหวะของกลไกเจนิวาชนิด 8 ช่อง เมื่อมะคาเดเมียที่อยู่ในเข้าของจุดรับการกระแทกเคลื่อนที่มายังตำแหน่ง 90° หัวกะเทาะรูปพระจันทร์เสี้ยวจะเคลื่อนที่ลงมากกระแทกบนผิวของมะคาเดเมียตามจังหวะที่สอดคล้องกัน ทำให้เปลือกเกิดการแตกหัก การหมุนตำแหน่งถัดไปคือ ตำแหน่ง 180° เนื้อในของมะคาเดเมียและเปลือกจะไหลออกผ่านทางลาดไปยัง ส่วนรับผลิตภัณฑ์ตามลำดับต่อไป ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แนวคิดการออกแบบ

ขนาดมอเตอร์ (P_o : watt) คำนวณจากค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเปลือกมะคาเดเมียที่ได้จากข้อ 2.1 ข้อย่อย 2 รัศมีการหมุนของกลไกสกรูโยกมีขนาด 75 mm ความเร็วในการกะเทาะสูงสุด 10 rpm สมมติว่าระบบมีประสิทธิภาพรวม 70% ค่าเพื่อความปลอดภัย 2 แทนค่าลงในสมการที่ 2 [10] จะได้ขนาดมอเตอร์จากการคำนวณ 469 watt สำหรับมอเตอร์ที่ติดตั้งจริงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 2 HP

$$P_o = \frac{2\pi T n}{60} \quad (2)$$

$T = F \times r$

T = แรงบิด (Nm)

F = ความแข็งแรงเปลือก (N)

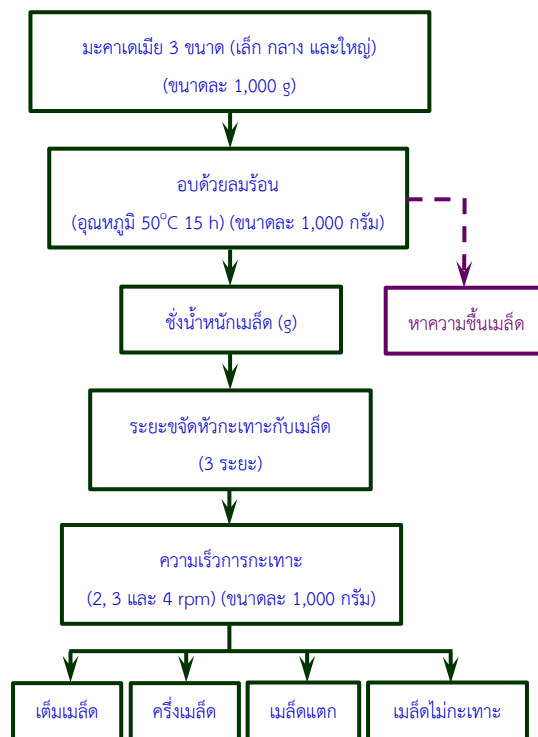
r = รัศมีการหมุนของกลไกสกรูโยก (m)

n = ความเร็ว (rpm)

2.3 วิธีการทดสอบและการประเมินการ

กะเทาะ

ความสำเร็จในการกะเทาะเปลือกมะคาเดเมียขึ้นกับเนื้อในมะคาเดเมียจะต้องคลอนจากเปลือก และระยะจัดหรือระยะทางระหว่างหัวกะเทาะถึงผิวด้านบนของมะคาเดเมีย (ระยะจัดของหัวทดสอบ 3 ระยะสัมพันธ์กับมะคาเดเมีย 3 ขนาดคือ ระยะจัดที่ดีที่สุดของมะคาเดเมีย 3 ขนาด พิจารณาจากเปลือกเกิดการกะเทาะและได้เมล็ดเต็ม ขั้นตอนนี้เกิดจากการทดสอบการกะเทาะเบื้องต้นเพื่อหาระยะจัด) จึงแบ่งมะคาเดเมียออกเป็น 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก ($\varnothing 18.0-20.5$ mm) ขนาดกลาง ($\varnothing 20.6-22.5$ mm) และขนาดใหญ่ ($\varnothing 22.6-25.0$ mm) ลดความชื้นด้วยอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 15 h [6] ก่อนทำการทดสอบโดยมีขั้นตอนการทดสอบดังรูปที่ 2 และทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง



รูปที่ 3 ผังการทดสอบการกะเทาะ

การทดสอบเลือกวิธีทดสอบแบบ LSD (Latin Square Design) เนื่องจากหน่วยทดลองมีความแปรปรวน 2 ทิศทางคือ ความเร็วในการกะเทาะ 3 ระดับ และขนาดของเมล็ดมะคาเดเมีย 3 ขนาด จึงใช้การทดสอบแบบ LSD (3x3) และทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ทุกการทดสอบ การทดสอบจะใช้เมล็ดมะคาเดเมียใหม่ 1,000 กรัมทุกครั้ง

การประเมินผลสัมฤทธิ์ในการกะเทาะเปลือกมะคาเดเมีย พิจารณาจากความสามารถและประสิทธิภาพในการกะเทาะ โดยความสามารถในการกะเทาะใช้การบันทึกเวลาในการกะเทาะเปลือกเมล็ดมะคาเดเมียครั้งละ 1,000 กรัม ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ดังสมการที่ 3 และประสิทธิภาพในการกะเทาะคือ ความสามารถในการกะเทาะเปลือกมะคาเดเมีย มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักเมล็ดเต็ม น้ำหนักครึ่งเมล็ด น้ำหนักเมล็ดแตก และน้ำหนักเมล็ดไม่กะเทาะ ดังสมการที่ 4 - 7

$$\text{ความสามารถการกะเทาะ} \left(\frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) = \frac{m_T - m_N}{t} \quad (3)$$

$$\text{ประสิทธิภาพการกะเทาะ} = \left(\frac{m_T - m_N}{m_T} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{ประสิทธิภาพกะเทาะเมล็ดเต็ม} = \left(\frac{m_F}{m_T - m_N} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$\text{ประสิทธิภาพกะเทาะครึ่งเมล็ด} = \left(\frac{m_H}{m_T - m_N} \right) \times 100 \quad (6)$$

$$\text{ประสิทธิภาพกะเทาะเมล็ดแตก} = \left(\frac{m_B}{m_T - m_N} \right) \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ m_T = น้ำหนักมะคาเดเมียก่อนกะเทาะ (kg)
 m_N = น้ำหนักมะคาเดเมียที่ไม่ถูกกะเทาะ (kg)
 m_F = น้ำหนักมะคาเดเมียเมล็ดเต็ม (kg)
 m_H = น้ำหนักมะคาเดเมียครึ่งเมล็ด (kg)
 m_B = น้ำหนักมะคาเดเมียเมล็ดแตก (kg)
 t = เวลาที่ใช้ในการกะเทาะ (h)

2.4 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ [11][12]

เป็นการวิเคราะห์เพื่อประเมินต้นทุนเทียบกับผลตอบแทนที่ได้รับจากการลงทุน สำหรับการประเมินในงานวิจัยนี้คิดเฉพาะค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง วัสดุในการผลิตหรือแปรรูป ค่าแรง ไฟฟ้า ไม่รวมราคาที่ดิน โรงเรือน ค่าประกันภัย ค่าเช่า และอื่น ๆ การคำนวณใช้ข้อมูลจริงในช่วงเวลาทำการทดสอบโดยพิจารณาปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนและระยะเวลาในการคืนทุน

จุดคุ้มทุน (Break-even point : BEP) คือ จุดที่รายได้กับรายจ่ายมีค่าเท่ากัน (จุดที่กำไรเป็นศูนย์) หรือปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุน (หน่วยการผลิต) หาได้จากสมการที่ 8

$$BEP = \frac{F}{p - v} \quad (8)$$

ระยะเวลาในการคืนทุน (Pay back period : PBP) คือ ระยะเวลาที่รายได้เท่ากับรายจ่าย หรือระยะเวลาในการคืนทุน (หน่วยเวลา) หาได้จากสมการที่ 9

$$PBP = \frac{P}{TP} \quad (9)$$

$$TC = F + V \quad (10)$$

$$F = D + OC \quad (11)$$

$$V = W + E + M + MC \quad (12)$$

$$D = \frac{P - S}{L} \quad (13)$$

$$D = \left(\frac{P + S}{2} \right) i \quad (14)$$

เมื่อ TC = ต้นทุนทั้งหมด (บาท/ปี)
 F = ต้นทุนคงที่ (บาท/ปี)
 V = ต้นทุนแปรผัน (บาท/ปี)
 v = ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย (บาท/กก./ปี)
 D = ค่าเสื่อมราคา (บาท/ปี)
 OC = ค่าเสียโอกาสในการลงทุน (บาท/ปี)
 W = ค่าจ้างแรงงาน (บาท/ปี)
 E = ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)
 M = ค่าบำรุงรักษา (บาท/ปี)
 MC = ค่าวัสดุ (บาท/ปี)
 P = ราคาเครื่องจักร (บาท)
 p = ราคาขายต่อหน่วย (บาท/กก./ปี)
 S = มูลค่าซาก (บาท)
 L = อายุการใช้งาน (ปี)
 i = อัตราดอกเบี้ย (เปอร์เซ็นต์/ปี)

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพมะคาเดเมีย

ผลการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักทั้งก่อนและหลังการกะเทาะแสดงในตารางที่ 1 จากการพิจารณาจะพบว่าเปลือกของมะคาเดเมียมีขนาดระหว่าง 2.50-3.95 mm เมื่อนำน้ำหนักของมะคาเดเมียก่อนกะเทาะหารด้วยน้ำหนักมะคาเดเมียหลังกะเทาะจะได้ผลลัพธ์

คือ 0.368 หมายความว่า เนื้อในมะคาเดเมียมีน้ำหนัก 36.8% ของน้ำหนักทั้งหมด หรือเปลือกมะคาเดเมียมีน้ำหนัก 63.2% ของน้ำหนักทั้งหมด และมะคาเดเมียก่อนการกะเทาะมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 12.61 % (wb) โดยที่เปลือกมะคาเดเมียมีความแข็งแรงเฉลี่ย 2,092 N

ตารางที่ 1 ขนาดและน้ำหนักมะคาเดเมีย

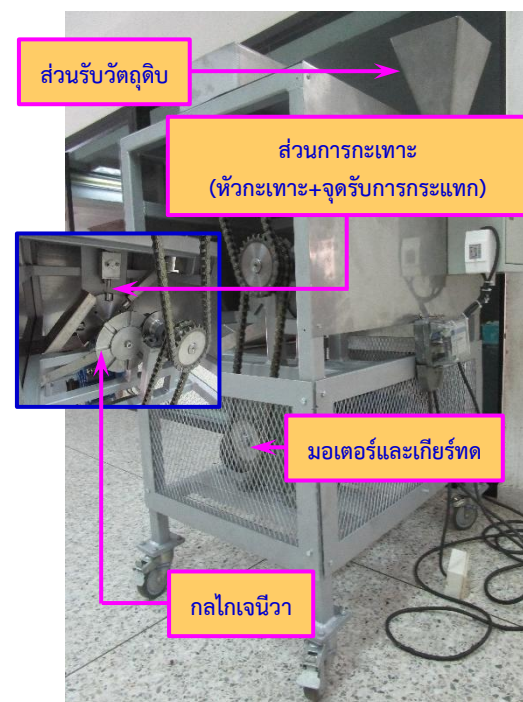
		กว้าง	ยาว	หนา	น.น. (g)
ก่อน	μ	24.16	25.00	23.95	7.72
	SD	1.76	1.91	1.89	1.66
หลัง	μ	18.99	19.86	16.05	2.84
	SD	4.04	1.72	1.57	0.71

3.2 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะ

เครื่องกะเทาะเปลือกมะคาเดเมียอัตโนมัติต้นแบบมีขนาด $515^W \times 825^L \times 1,100^H$ mm มีน้ำหนัก 200 kg ประกอบด้วยส่วนรับวัตถุดิบ ส่วนกะเทาะ และส่วนทางออก ส่วนรับวัตถุดิบบรรจุวัตถุดิบได้ 3 kg มีลักษณะเป็นรูปกรวยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม ปลายทางออกเอียงลง 45° ตรงกับเข้าของจุดรับการกระแทกที่มุม 45° ส่วนกะเทาะประกอบด้วยหัวกะเทาะและจุดรับการกระแทก โดยหัวกะเทาะมีรูปทรงกระบอกและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 mm ปลายหัวมีลักษณะโค้งทรงพระจันทร์เสี้ยวและทำให้แหลมคม จุดรับการกระแทกมีรูปทรงกระบอกและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm หนา 25 mm ผิวส่วนปลายของทรงกระบอกทุก ๆ มุม 45° จัดทำเป็นเข้ารูปครึ่งทรงกลมสำหรับรองรับมะคาเดเมียเพื่อรับการกระแทกจำนวน 8 ใบ และสุดท้ายคือส่วนทางออกติดตั้งแผ่นสแตนเลสมีลักษณะเอียงลงโดยปลายทางสำหรับจัดวางภาชนะรองรับเนื้อในและเปลือกมะคาเดเมียจากการกะเทาะแล้วลดขนาดรอบมอเตอร์ด้วยเกียร์ทด 1 : 80 และควบคุมและลดความเร็วสุดท้ายด้วยอินเวอร์เตอร์

การทำงานของเครื่องต้นแบบ เริ่มต้นจากการบรรจุเมล็ดมะคาเดเมียลงในส่วนรับวัตถุดิบ ปรับตั้งความเร็วการกะเทาะด้วยอินเวอร์เตอร์ เปิดเครื่องจนมีความเร็วตามที่กำหนดไว้ เริ่มต้นบันทึกเวลาขณะเมล็ดมะคาเดเมียไหลลงไปตามช่องทางของส่วนรับวัตถุดิบและจะร่วงลงในส่วนรับการกระแทกที่มุม 45° ของจุดรับการกระแทกตามจังหวะการหมุน เมื่อเข้าของจุดรับการกระแทกหมุนไปที่มุม 90° (หมุนครึ่งละ 45°) หัวกะเทาะจะเคลื่อนที่ลงกระแทกกับผิวเปลือกมะคาเดเมียพอดีและเคลื่อนที่ขึ้นทันที (เมล็ดใหม่จะเคลื่อนที่ลงในส่วนรับการกระแทกที่มุม 45° เหมือนเช่นเดิม) การกระแทก

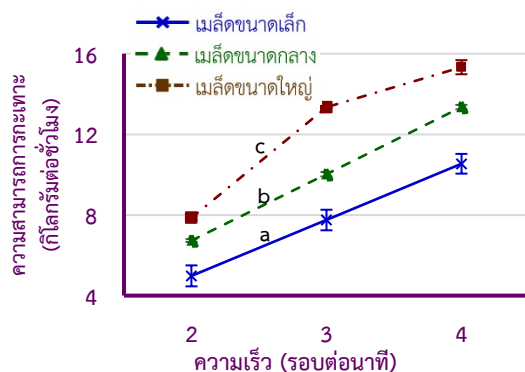
ทำให้เกิดการแตกหักและแยกตัวของเปลือก กับเนื้อใน ทำให้เกิดการกะเทาะเปลือกขึ้น เมื่อจุดรับการกระแทกหมุนไปอีก 1 ครั้ง (มุม 135°) เปลือกและเนื้อในที่กะเทาะแล้วยังคงอยู่ในเข้าเช่นเดิมในขณะที่เกิดการกะเทาะที่มุม 90° และเกิดการร่อนเมล็ดใหม่ที่มุม 45° เมื่อจุดรับการกระแทกหมุนไปอีก 1 ครั้ง (มุม 180°) เปลือกและเนื้อในจะไหลลงทางลาดเอียงไปที่ส่วนทางออกผลิตภัณฑ์ตกลงสู่ภาชนะที่รองรับไว้ วงจรการกะเทาะจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าเมล็ดมะคาเดเมียที่อยู่ในส่วนรับวัตถุดิบหมดลง และผลิตภัณฑ์มะคาเดเมียที่ได้หลังการกะเทาะประกอบด้วยเมล็ดเต็ม ครึ่งเมล็ด เมล็ดแตก เมล็ดไม่กะเทาะ และเปลือก ซึ่งต้องผ่านการคัดแยกต่อไป สำหรับกลไกกะเทาะเปลือกเริ่มด้วยมอเตอร์หมุน ทำให้กลไกเจนิวาซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของส่วนรับการกะเทาะ ทำงานเป็นจังหวะสัมพันธ์กับกลไกสก็อตโยคซึ่งทำหน้าที่ควบคุมหัวกะเทาะให้เคลื่อนที่ขึ้น-ลง (หัวกะเทาะสามารถปรับระยะได้และต้องสัมพันธ์กับขนาดมะคาเดเมีย) ทำให้เกิดการกะเทาะที่มุม 90° ดังนั้นทุกครั้งที่กลไกเจนิวาหมุนไปเป็นมุม 45° จะทำให้ส่วนรับการกะเทาะหมุนไปเป็นมุม 45° เช่นเดียวกัน และทำให้กลไกสก็อตโยคเคลื่อนที่ขึ้น-ลงจำนวน 1 ครั้ง รูปแบบการทำงานจะเป็นเช่นนี้ไปตลอดการกะเทาะ และในการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องกะเทาะต้นแบบ

3.3 ผลการทดสอบการกะเทาะเปลือกมะคาเดเมีย

ความสามารถการกะเทาะเปลือกได้เมล็ดเต็มมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความเร็วของการกะเทาะเนื่องจากกลไกเจนิวทำงานเป็นลำดับที่แน่นอน การเพิ่มความเร็วการกะเทาะจึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการกะเทาะในเชิงเส้นตรงนั่นเอง โดยมะคาเดเมียขนาดเล็กมีความสามารถในการกะเทาะน้อยที่สุดเท่ากับ 4.98 7.75 และ 10.54 kg/h มะคาเดเมียขนาดกลางมีความสามารถในการกะเทาะปานกลางเท่ากับ 6.73 10.02 และ 13.35 kg/h และมะคาเดเมียขนาดใหญ่มีความสามารถในการกะเทาะมากที่สุดเท่ากับ 7.86 11.50 และ 15.33 kg/h ที่ความเร็ว 2 3 และ 4 rpm ตามลำดับ (รูปที่ 5) ด้วยเหตุที่การกะเทาะใช้หลักการกระแทกแบบเป็นจังหวะและใช้กลไกเจนิวและกลไกสกรูที่ทำงานสัมพันธ์กันอย่างยิ่ง ทำให้การเพิ่มความเร็วกะเทาะส่งผลให้ผลผลิตมีค่าสูงขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ในทำนองเดียวกันผลผลิตจากขนาดของมะคาเดเมียจึงเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นมะคาเดเมียขนาดใหญ่จึงให้ความสามารถในการกะเทาะมากที่สุด

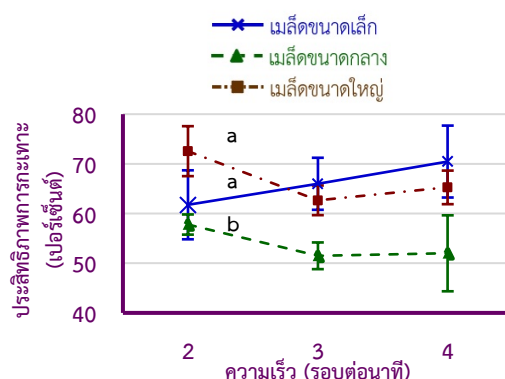


รูปที่ 5 ความสามารถในการกะเทาะ

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

งานวิจัยนี้อ้างอิงขนาดเมล็ดตามมาตรฐานชนิด 2 คือ เมล็ดเต็มและซีกใหญ่ (Wholes and Halves) [1] เนื้อในเต็มเมล็ดและครึ่งเมล็ดจัดเป็นเมล็ดที่สมบูรณ์ จึงได้รวมประสิทธิภาพการกะเทาะของเมล็ดเต็มและครึ่งเมล็ดเข้าด้วยกัน เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความเร็วรอบส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะได้เมล็ดเต็มไม่แตกต่างกัน (ความเร็วรอบไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะ) เมื่อพิจารณาขนาด

ของมะคาเดเมียพบความแตกต่างต่อประสิทธิภาพการกะเทาะได้เมล็ดเต็มที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 (ขนาดมะคาเดเมียส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะ) โดยประสิทธิภาพการกะเทาะได้เมล็ดเต็มของเมล็ดขนาดเล็กและเมล็ดขนาดใหญ่ไม่มีความแตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างกันของเมล็ดขนาดกลาง เมล็ดขนาดเล็กและขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพการกะเทาะสูงกว่าเมล็ดขนาดกลาง โดยมะคาเดเมียขนาดเล็กและขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพการกะเทาะเฉลี่ยเท่ากับ 66.07 และ 66.83% ตามลำดับ และ 53.76% สำหรับมะคาเดเมียขนาดกลาง การที่ประสิทธิภาพการกะเทาะเปลือกมะคาเดเมียเมล็ดขนาดเล็กและขนาดใหญ่มีความแตกต่างกับเมล็ดขนาดกลาง สาเหตุสำคัญคาดว่าเกิดจากขนาดของมะคาเดเมียที่แบ่งไว้ 3 กลุ่ม มีขนาดที่แตกต่างกันในแต่ละกลุ่ม ขณะที่ระยะการกระแทกที่ตั้งไว้แต่ละกลุ่มมีขนาดคงที่ตลอดการกะเทาะ ทำให้เมล็ดขนาดใหญ่ในกลุ่มนั้น ๆ เนื้อในเกิดความเสียหายเพราะหัวกะเทาะกดลึกเกินไป (เมล็ดจะแตกออก) หรือหากเป็นเมล็ดขนาดเล็กในกลุ่มนั้น ๆ การกะเทาะไม่เกิดการแตกหักของเปลือกเพราะหัวกะเทาะกดลึกไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดรอยแตกของเปลือก (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการกะเทาะ

หมายเหตุ ตัวอักษรเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.4 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ข้อมูลพื้นฐานคือ ต้นทุนเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดมะคาเดเมียต้นแบบมีราคา 103,571 บาท คาดว่า มีอายุการใช้งาน 10 ปี มูลค่าซาก 10 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนเครื่อง อัตราดอกเบี้ย 6.245 เปอร์เซ็นต์ต่อปี (ข้อมูลจากธนาคารออมสิน วันที่ 31 สิงหาคม 2563) กำหนดให้ทำงาน 240 วันต่อปี ทำงาน 4 ชั่วโมงต่อวัน ค่าบำรุงรักษา 5 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนเครื่อง ค่าไฟฟ้า

3.64 บาทต่อหน่วย จ้างคนทำงาน 1 คน จ่ายค่าจ้างแรงงานในอัตรา 320 บาทต่อวัน ราคาขายเนื้อในแบบเต็มเมล็ดของมะคาเดเมีย 1,000 บาทต่อกิโลกรัม การคำนวณใช้ข้อมูลการกะเทาะเปลือกมะคาเดเมียขนาดใหญ่ที่ความเร็ว 3 รอบต่อนาที ซึ่งมีความสามารถในการกะเทาะเฉลี่ย 11.50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (วัตถุดิบ) คิดเป็นเนื้อในเฉลี่ย 3.70 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากข้อมูลทั้งหมดสรุปการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

- ค่าใช้จ่ายทั้งหมด 1,165,084 บาทต่อปี
- รายได้จากการขาย 3,552,000 บาทต่อปี
- ปริมาณการขายที่จุดคุ้มทุน 13.59 กิโลกรัม
- ระยะเวลาในการคืนทุน 16 วัน

4. สรุป

1.) มะคาเดเมียบอกกะเทาะมีความชื้นและมีน้ำหนัก 12.61 %wb และ 6.06-9.38 g ตามลำดับเปลือกมีความหนาและความแข็ง 2.50-3.95 mm และ 2,092 N ตามลำดับ และเนื้อในมีน้ำหนัก 36.8% ของน้ำหนักมะคาเดเมียบอกกะเทาะ

2.) เครื่องกะเทาะต้นแบบสามารถทำงานได้แบบต่อเนื่องมีขนาด $515^W \times 825^L \times 1,100^H$ มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 200 kg ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 HP เป็นต้นกำลัง การกะเทาะใช้หลักการกระแทกแบบเป็นจังหวะโดยใช้ความสั่นพ้องระหว่างกลไกเจนีวาควบคุมจุดรับการกระแทกและกลไกสกรูยึดควบคุมหัวกะเทาะ

3.) ความเร็วของการกะเทาะแปรผันตรงกับความสามารถในการกะเทาะ และไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกะเทาะได้เมล็ดเต็มทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.) ประสิทธิภาพการกะเทาะได้เมล็ดเต็มของมะคาเดเมียขนาดเล็กและขนาดใหญ่ มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่มีความแตกต่างกันที่เมล็ดขนาดกลาง

5.) มะคาเดเมียขนาดใหญ่มีความสามารถในการกะเทาะสูงสุดเท่ากับ 7.86 11.50 และ 15.33 kg/h ที่ความเร็ว 2 3 และ 4 rpm ตามลำดับ

6.) การกะเทาะเปลือกมะคาเดเมียขนาดใหญ่ที่ความเร็ว 3 รอบต่อนาที มีปริมาณการขายที่จุดคุ้มทุน (BEP) เท่ากับ 13.59 กิโลกรัม

7.) การกะเทาะเปลือกมะคาเดเมียขนาดใหญ่ที่ความเร็ว 3 รอบต่อนาที มีระยะเวลาในการคืนทุน (PBP) 16 วัน

5. ข้อเสนอแนะและจุดเด่น

1.) ก่อนการกะเทาะควรนำมะคาเดเมียไปคัดขนาดด้วยเครื่องคัดที่ได้มาตรฐาน และขนาดมะคาเดเมียที่อยู่ในกลุ่มควรมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุดโดยมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด

2.) การคลอนของเนื้อในสำคัญมากต่อความสำเร็จในการได้เมล็ดเต็ม การลดความชื้นเพียงอย่างเดียวเนื้อในบางเมล็ดอาจไม่เกิดการคลอนได้ ให้เพิ่มเทคนิคการเคาะเบา ๆ เพื่อให้เกิดการคลอน จะทำให้ความสำเร็จในการกะเทาะสูงขึ้น

3.) เครื่องต้นแบบสามารถกะเทาะเปลือกมะคาเดเมียได้ต่อเนื่องโดยมีประสิทธิภาพเทียบเท่าเครื่องจักรในระดับอุตสาหกรรม และมีความสามารถพิเศษคือ สามารถเพิ่มหัวกะเทาะและส่วนรองรับการกระแทกได้หลายชุดโดยใช้เพลาลูกเดิม ทำให้ความสามารถในการกะเทาะสูงขึ้นเป็นทวีคูณ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนประเภททุนรายได้มาเพื่อสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรที่ได้จัดสรรพื้นที่พร้อมเครื่องมือวัดและสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการทำวิจัย ขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์วิจัยเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนพิจิตร ศรีปิ่นตา) ที่ช่วยเป็นธุระจัดหาเมล็ดมะคาเดเมียและนำส่งมาให้ด้วยความเรียบร้อยและรวดเร็ว สุดท้ายขอระลึกคุณมารดาและบิดาที่ได้ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรมสั่งสอนด้วยความอดทนและดีงามเสมอมา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Horticulture Research Institute, Department of Agriculture. Knowledge management: Technology of macadamia production. 1st ed. Bangkok: Guarantee; 2020. (in Thai).
- [2] Amarook S, Paosantadpanich C, Thaithae S, Chomchiangkam P, Tongjan P. Research and development of macadamia (macademia spp.) nut husker. Thai Agricultural Research Journal. 2010;28(3):256-64. (in Thai).
- [3] Nukpook K, Diawwilia C. Development and test macadamia nut cracker. Agricultural Science Journal. 2011;42(1 Suppl.):521-4. (in Thai).

- [4] Thongjan P, Amarerg S, Changrue V. Development of macadamia nut cracker using impact mechanism for farmer use. *Agricultural Science Journal*. 2011;42(3 Suppl.):454-7. (in Thai).
- [5] Amaroek S, Thongjan P. Design and development of an industrial-scale macadamia nut cracking machine. In: *Proceedings of the 14th TSAE National Conference and the 6th TSAE International Conference (TSAE 2013)*; 2013; Thailand. p. 250-4. (in Thai).
- [6] Borompichaichartkul C, Pichaibunditkul B, Chaiwong W. Factor affecting macadamia nut cracking under compression test. *Agricultural Science Journal*. 2007;38(5 Suppl.):349-52. (in Thai).
- [7] Kitpaisansakul N. Improvements to the macadamia seed husking process. *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*. 2012;5(1):1-12. (in Thai).
- [8] Lloyd Instruments Ltd. Nexygen ondio: User manual. Fareham (UK): Lloyd Instruments Ltd.; 2000.
- [9] AOAC International. Official methods of analysis of AOAC International. 22nd ed. Rockville (MD): AOAC International; 2023.
- [10] Ungbhakorn V, Thanadngarn C. Machine Design Vol 1. Bangkok: SE-ED Education; 2013. (in Thai).
- [11] Yaemphuan P. Engineering economy. 1st ed. Bangkok: SE-ED Education; 2005. (in Thai).
- [12] Phungmalilai P, Kajaseni P, Thongpaiwan W. Design and fabrication of semi-automatic deep-fried dough stick production machine [bachelor's thesis]. Pathum Thani: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2012. (in Thai).