

การออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟโรบัสต้ากึ่งอัตโนมัติ
และการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง
**Design and Development of a Semi-Automatic Robusta Coffee Bean Sorting
Machine with Optimal Operating Conditions Determined
by Response Surface Methodology**

บุญกิจ อุ่นพิกุล ธนวัฒน์ คณะแพ่ง ปาวริศ เพ็ชรศิลา วรวุฒิ อัยปะโค และ ปริมประภา จุลลาบุตดี*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
E-mail: Primprapa.ju@rmu.ac.th*

Boonkit Unpikul, Thanawat Khanapang, Pawaris Pachasila, Worawut Auipako and Primprapa Junlabuddee*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Isan Khonkaen Campus
E-mail: Primprapa.ju@rmu.ac.th*

Received 17 Apr 2026; Revised 11 Jun 2026

Accepted 23 Jun 2026; Available online 30 Jun 2026

บทคัดย่อ

วิสาหกิจชุมชนหินช้างสี คอฟฟี่ จังหวัดขอนแก่น ประสบปัญหาคอขวดในกระบวนการคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟ โดยมีกำลังการผลิตเพียง 3.04 kg/h ต่ำกว่าเป้าหมาย 100 kg/day งานวิจัยนี้จึงออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟโรบัสต้ากึ่งอัตโนมัติ ประกอบด้วย 7 หน่วยย่อย ได้แก่ ชุดควบคุมไฟฟ้า ชุดส่งกำลัง ชุดถังพักเมล็ด ชุดดูดลำเลียง ชุดคัดแยกสิ่งเจือปนด้วยลม ชุดตะแกรงหมุน 3 ระดับ (รู 7.5, 6.5 และ 5.2 มม. ตาม มกษ. 5700-2561) และชุดลำเลียงออก โครงสร้างวิเคราะห์ด้วย FEM ได้ $\sigma_{max}=33.73$ MPa และ $FoS=18$ หาสภาวะที่เหมาะสมด้วย RSM แบบ Box-Behnken Design (BBD) 3 ปัจจัย ได้แก่ เวลาดูดเมล็ด X_1 (10-20 s) ความเร็วลมเป่า X_2 (6.08-10.09 m/s) และความเร็วรอบตะแกรง X_3 (10-20 rpm) โมเดล Quadratic ($R^2=0.9989$) แสดงว่า X_3 เป็นปัจจัยหลัก ($\beta_3=-4.092$, $p<0.001$) สอดคล้องกับทฤษฎี Residence Time X_2 มีผลรองลงมา ($\beta_2=-0.751$, $p<0.001$) X_1 ไม่มีนัยสำคัญ ($p=1.000$) สภาวะที่เหมาะสมคือ $X_1=15$ s, $X_2=6.08$ m/s และ $X_3=10$ rpm ให้ $\eta=99.35\%$ กำลังการผลิต 38.49 kg/h สูงกว่าวิธีเดิม 12.66 เท่า (1,166.12%) และอัตราการปนเปื้อน $\leq 4\%$ ผ่านมาตรฐาน มกษ. 5700-2561

คำสำคัญ: เครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟกึ่งอัตโนมัติ วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) การหาสภาวะที่เหมาะสม กาแฟโรบัสต้า

Abstract

Hin Chang Si Coffee community enterprise, Khon Kaen, Thailand faced a production bottleneck in coffee bean sorting (3.04 kg/h vs. target 100 kg/day). A semi-automatic Robusta coffee bean sorting machine was designed and developed comprising seven subsystems: electrical control, power transmission, bean storage, suction conveying, air-blowing impurity removal, a three-tier rotating sieve (apertures 7.5, 6.5, and 5.2 mm per TAS 5700-2561), and discharge. FEM verified structural integrity ($\sigma_{max}=33.73$ MPa, $FoS=18$). Optimal conditions were determined via RSM-BBD with three factors: suction time X_1 (10-20 s), air-blowing velocity X_2 (6.08-10.09 m/s), and drum speed X_3 (10-20 rpm). The quadratic model ($R^2=0.9989$) revealed X_3 as dominant ($\beta_3=-4.092$, $p<0.001$), consistent with Residence Time theory; X_2 as secondary ($\beta_2=-0.751$, $p<0.001$); X_1 non-significant ($p=1.000$). The global optimum at $X_1 = 15$ s, $X_2 = 6.08$ m/s and $X_3=10$ rpm yielded $\eta=99.35\%$, throughput 38.49 kg/h (12.66× baseline, +1,166.12%), contamination $\leq 4\%$, conforming to TAS 5700-2561.

Keywords: Semi-Automatic Coffee Bean Sorting Machine, Response Surface Methodology, Box-Behnken Design, Finite Element Method, Process Optimization, Robusta Coffee

1. บทนำ

กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจระดับโลกที่มีมูลค่าตลาดกว่า 1.2 แสนล้านดอลลาร์สหรัฐและมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง [1] ในประเทศไทยมูลค่าการผลิตและส่งออกกาแฟสูงกว่า 3,500 ล้านบาท/ปี โดยตลาด Specialty Coffee ขยายตัวอย่างรวดเร็ว [2] ในกระบวนการแปรรูปหลังการเก็บเกี่ยว (Post-harvest Processing) การคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟถือเป็นขั้นตอนวิกฤตที่มีผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการคั่ว [3] และการพัฒนาสารประกอบเคมีที่ส่งผลต่อกลิ่นรสชาติของผลิตภัณฑ์ [4][5] มาตรฐาน มกษ. 5700-2561 กำหนดให้แต่ละเกรดมีเมล็ดต่างขนาดปนได้ไม่เกินร้อยละ 10 โดยมวล [6]

อย่างไรก็ตาม วิสาหกิจชุมชนหินช้างสี คอฟฟี่ จังหวัดขอนแก่น ซึ่งเป็นสถานประกอบการฝึกศึกษา ยังพึ่งพาแรงงานมือในกระบวนการคัดแยก ทำให้มีกำลังการผลิตเพียง 3.04 kg/h หรือ 24.32 kg/day ขณะที่ความต้องการอยู่ที่ 100 kg/day ก่อให้เกิดคอขวดในการผลิต นอกจากนี้การใช้แรงงานมือยังส่งผลต่อความสม่ำเสมอของผลลัพธ์และความเหนื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้นำเทคโนโลยีคัดแยกแบบผสมผสานระหว่างระบบลม

และตะแกรงมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ [7] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นระบบอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ยังขาดการศึกษาที่บูรณาการการออกแบบเครื่องจักรระดับวิสาหกิจชุมชนเข้ากับการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วย RSM อย่างเป็นระบบ

การหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องจักรเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาควบคู่กับการออกแบบวิธีที่นิยมใช้ในงานวิจัยด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรมคือ Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในระบบหลายตัวแปรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้จำนวนรันทดลองน้อยกว่าวิธีแบบ Full Factorial และสามารถวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยได้ [9][10] งานวิจัยนี้เลือกใช้ Box-Behnken Design (BBD) แทน Central Composite Design (CCD) เนื่องจาก BBD ไม่มีจุดทดลองที่มุมสุดขีด (Corner Points) ลดความเสี่ยงจากสภาวะที่อาจทำให้เครื่องจักรเสียหาย และใช้เพียง 15 รัน เทียบกับ 20 รันของ CCD ซึ่งเหมาะสมกับข้อจำกัดด้านทรัพยากรของวิสาหกิจชุมชน [9] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ 3 ประการ ได้แก่ (1) ออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟโรบัสต้า กิ่งอัตโนมิติที่เหมาะสมกับวิสาหกิจชุมชน (2) หา

สภาวะที่เหมาะสมด้วย RSM แบบ Box-Behnken Design และ (3) ประเมินสมรรถนะของระบบเปรียบเทียบกับวิธีเดิม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟและมาตรฐาน

การคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟโดยทั่วไปใช้ตะแกรงที่มีขนาดรูต่างกัน โดยเมล็ดจะถูกแบ่งเป็นเกรดตามเส้นผ่าศูนย์กลาง ได้แก่ เกรด AA (>7.5 มม.) เกรด A (6.5 - 7.5 มม.) และเกรด B-C (5.2-6.5 มม.) การคัดแยกที่ถูกต้องส่งผลให้เมล็ดในแต่ละเกรดมีพื้นที่ผิวและมวลใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนในระหว่างการคั่วสม่ำเสมอ [3] และลดการเกิดเมล็ดที่คั่วไม่สม่ำเสมอ (Uneven Roast) ที่ส่งผลเสียต่อรสชาติ [4] นอกจากนี้เทคโนโลยีคัดแยกแบบผสมผสาน (Hybrid Separation) ที่รวมระบบลมเพื่อแยกสิ่งเจือปนและตะแกรงสำหรับคัดขนาด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดอัตราการปนเปื้อนได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับระบบตะแกรงเพียงอย่างเดียว [7]

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย X_1 (เวลาดูดเมล็ด) อ้างอิง Suction Capacity Theory โดยอัตราการไหลคงที่ของ Ring Blower กำหนดปริมาณเมล็ดที่ดูด ทำให้ X_1 ส่งผลต่อ Throughput เท่านั้น ไม่ใช่ประสิทธิภาพการคัดแยก ปัจจัย X_2 (ความเร็วลมเป่า) อ้างอิง Aerodynamic Separation Theory โดยความเร็วลมที่เหมาะสมต้องอยู่ระหว่าง Terminal Velocity ของสิ่งเจือปนเบา (~5-6 m/s) และเมล็ดกาแฟ (~11-12 m/s) หากความเร็วลมสูงเกินไปจะพัดเมล็ดที่ออกนอกระบบ ปัจจัย X_3 (ความเร็วรอบตะแกรง) อ้างอิง Residence Time Theory โดย $T_{res} = L/(W \cdot r \cdot \sin\theta)$ ความเร็วรอบสูงทำให้ Residence Time ลดลง เมล็ดผ่านตะแกรงเร็วเกินไปโดยไม่มีเวลาผ่านช่องคัดแยกมุมเอียงตะแกรง 7° ถูกเลือกให้สมดุลระหว่าง Residence Time เพียงพอและไม่เกิดการอุดตัน

2.3 Response Surface Methodology (RSM)

RSM เป็นกลุ่มของเทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติที่ใช้สร้างและวิเคราะห์โมเดลเชิงประจักษ์ (Empirical Model) ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง พัฒนาขึ้นโดย Box and Wilson ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1951[9] โมเดลที่นิยมใช้คือ Quadratic Model ดังสมการ [10]

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

โดยที่ β_0 คือค่า Intercept, β_i คือสัมประสิทธิ์ Linear effect, β_{ii} คือสัมประสิทธิ์ Quadratic (Curvature) effect และ β_{ij} คือสัมประสิทธิ์ Interaction effect ระหว่างปัจจัย i และ j การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ (Interaction Analysis) ช่วยให้เข้าใจว่าผลของปัจจัยหนึ่งขึ้นอยู่กับระดับของอีกปัจจัยหรือไม่ ซึ่งวิธี One-Factor-At-A-Time (OFAT) ไม่สามารถตรวจสอบได้

การออกแบบการทดลอง Box-Behnken Design (BBD) เป็น RSM design สำหรับ 3 ปัจจัยขึ้นไป ประกอบด้วยจุดทดลองที่จุดขอบกึ่งกลาง (Edge Midpoints) และจุดกลาง (Center Points) โดยไม่มีจุดทดลองที่มุมสุดขีด (Corner Points) ทำให้เหมาะสมกับการทดลองในระบบที่สภาวะมุมสุดขีดอาจก่อให้เกิดปัญหาในทางปฏิบัติ [9] สำหรับ 3 ปัจจัย BBD ใช้เพียง 15 รัน เทียบกับ Central Composite Design (CCD) ที่ต้องการ 20 รัน ทำให้ประหยัดทรัพยากรได้มากกว่า

2.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เป็นวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้ภาระกระทำ โดยแบ่งโครงสร้างเป็น Element ย่อยและคำนวณการกระจายความเค้นและความเครียด [8] ค่าสำคัญที่ใช้ประเมินความปลอดภัยคือ Factor of Safety (FoS) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่าง Yield Strength ของวัสดุและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น ($FoS = \sigma_{yield}/\sigma_{max}$) ค่า FoS ที่ยอมรับได้สำหรับเครื่องจักรอุตสาหกรรมทั่วไปอยู่ในช่วง

1.5–3.0 ค่าที่สูงกว่านี้บ่งชี้ว่าโครงสร้างมีความแข็งแรงเกินกว่าที่จำเป็น (Overdesign) ซึ่งอาจเกิดจากการเลือกใช้วัสดุที่มี Yield Strength สูง หรือการออกแบบที่ระมัดระวังเพื่อรับภาระที่ไม่แน่นอน

2.5 สรุปการนำทฤษฎีมาพัฒนาต่อในงานวิจัยนี้

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น งานวิจัยนี้นำองค์ความรู้มาบูรณาการใช้ดังนี้ Aerodynamic Separation Theory ใช้กำหนดช่วง X_2 (6.08–10.09 m/s) ให้อยู่ระหว่าง Terminal Velocity ของสิ่งเจือปนและเมล็ดกาแฟ Residence Time Theory ใช้กำหนดช่วง X_3 (10–20 rpm) และมุมเอียงตะแกรง 7° เพื่อควบคุม Residence Time ให้เพียงพอ Suction Capacity Theory ใช้ทำนายว่า X_1 ไม่น่าจะมีนัยสำคัญต่อ η และ RSM-BBD ใช้หาสภาวะที่เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ข้อจำกัดทรัพยากรของวิสาหกิจชุมชน

3. การออกแบบและพัฒนาเครื่องจักร

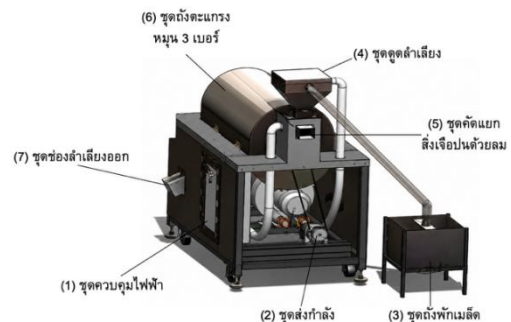
ข้อกำหนดการออกแบบ (Design Requirements): กำลังผลิต ≥ 12.5 kg/h (100 kg/day), $\eta \geq 95\%$, อัตราปนเปื้อน $\leq 10\%$ ตาม มกษ. 5700-2561, $FoS \geq 1.5$, ปรับ $X_1/X_2/X_3$ ได้ อีسرสำหรับการทดลอง RSM เครื่องออกแบบตาม Input-Process-Output แบ่งเป็น 7 หน่วยย่อย ได้แก่ (1) ชุดควบคุมไฟฟ้า (2) ชุดส่งกำลัง (Gear Motor + Belt Drive) (3) ชุดถังพักเมล็ด (4) ชุดดูดลำเลียง (Ring Blower NVS-150, 210 m³/h) (5) ชุดคัดแยกสิ่งเจือปนด้วยลม (Air Blower Towa, 365 m³/h) (6) ชุดตะแกรงหมุน 3 ระดับ (รู 7.5, 6.5 และ 5.2 มม. มุมเอียง 7°) และ (7) ชุดลำเลียงออก ปรับความเร็วรอบด้วย Inverter 4.14-9.89 Hz

ขนาดรูตะแกรง 7.5, 6.5 และ 5.2 มม. กำหนดตามมาตรฐาน มกษ. 5700-2561 มีผลต่อ η โดยตรง เนื่องจากกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจว่าเมล็ดใดผ่านหรือไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด หากเปลี่ยนขนาดรูจะทำให้ นิยามของ η เปลี่ยนตามไปด้วย ดังนั้นขนาดรูจึงเป็น Fixed Constraint ที่คงตายตัวตลอดการทดลอง เพื่อให้ผลทุกรันเปรียบเทียบกันได้บนฐานเดียวกัน และไม่ถูกเลือกเป็นปัจจัยใน RSM เนื่องจากมาตรฐาน

มกษ. 5700-2561 กำหนดไว้ตายตัว ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในการผลิตจริง

ภาระออกแบบ 2,000 N กำหนดจากการประมาณน้ำหนักสถิต (Static Load) ของชิ้นส่วนหลัก ได้แก่ ตะแกรงหมุน 3 ชั้น (~350 N) Ring Blower และ Air Blower (~200 N จาก Datasheet) ชุดส่งกำลัง Gear Motor + Belt Drive (~150 N จาก Datasheet) และ เมล็ดกาแฟสูงสุดในระบบ (~100 N) รวมภาระสถิต ~800 N จากนั้นคูณด้วย Dynamic Load Factor 1.5 ตามหลักการออกแบบเครื่องจักรหมุน [8] เพื่อชดเชยแรงกระแทกและการสั่นสะเทือน ได้ ~1,200 N และ บัดขึ้นเป็น 2,000 N (+67%) เพื่อรองรับความไม่แน่นอนของภาระในสภาวะการทำงานจริง แนวทางนี้ สอดคล้องกับ Shigley et al. [8] ที่แนะนำการประมาณภาระอย่างอนุรักษ์นิยมสำหรับเครื่องจักรกึ่งอัตโนมัติ

วิเคราะห์ความแข็งแรงด้วย FEM ภายใต้ภาระ 2,000 N ใช้เหล็กโครงสร้าง (Yield Strength=620.42 MPa) กำหนด Fixed Support ที่ฐานและ Distributed Load บนโครงสร้างส่วนรับน้ำหนัก ผล Von Mises Stress: $\sigma_{max}=33.73$ MPa บริเวณจุดเชื่อมต่อหลัก $FoS = 620.42/33.73 = 18$ บ่งชี้ว่าโครงสร้างมีความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการใช้งานจริง [8]



รูปที่ 1 แบบจำลอง 3 มิติของเครื่องคัดแยกขนาดเมล็ด

กาแฟโรบัสต้ากึ่งอัตโนมัติและส่วนประกอบหลัก

ประกอบด้วย 7 หน่วยย่อย ได้แก่ (1) ชุดควบคุมไฟฟ้า (2)

ชุดส่งกำลัง (3) ชุดถังพักเมล็ด (4) ชุดดูดลำเลียง (5) ชุด

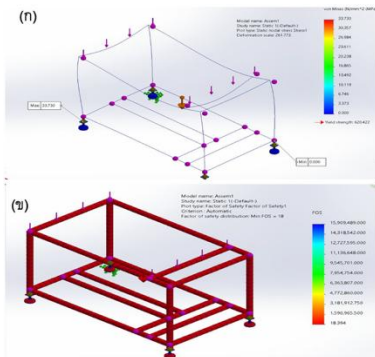
คัดแยกสิ่งเจือปนด้วยลม (6) ชุดถังตะแกรงหมุน 3 เบอร์

และ (7) ชุดช่องลำเลียงออก



รูปที่ 2 เครื่องคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟโรบัสต้ากิ่งอัตโนมัติที่สร้างจริง และการเก็บตัวอย่างเมล็ดกาแฟสำหรับชั่งน้ำหนักในการทดลอง

จากรูปที่ 1 แสดงแบบจำลอง 3 มิติของเครื่องคัดแยกและส่วนประกอบหลัก 7 หน่วยย่อยที่ทำงานเรียงลำดับต่อเนื่องกัน โดยเริ่มจากชุดดูดลำเลียง ผ่านชุดคัดแยกสิ่งเจือปนด้วยลม และสิ้นสุดที่ชุดตะแกรงหมุน 3 ระดับ รูปที่ 2 แสดงเครื่องคัดแยกที่สร้างจริงและการเตรียมตัวอย่างเมล็ดกาแฟสำหรับการทดลอง รูปที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยวิธี FEM



รูปที่ 3 การกระจาย Von Mises Stress (a) และ Factor of Safety (b) จากการวิเคราะห์ FEM ภายใต้ภาระออกแบบ

2,000 N พบบ $\sigma_{max}=33.73\text{MPa}$

กระจุกตัวบริเวณจุดเชื่อมต่อหลัก (สีแดง)

ปัจจัยการกระจายภาระที่ลดลงโครงสร้าง ได้ $FoS=18$

จากรูปที่ 3 พบว่าบริเวณที่มีความเค้นสูงสุด (สีแดง) กระจุกตัวที่จุดเชื่อมต่อหลักของโครงสร้าง ในขณะที่บริเวณอื่นมีความเค้นต่ำ (สีน้ำเงิน) บ่งชี้ว่า

โครงสร้างมีการกระจายภาระที่ดี และยังคงมีอัตราส่วนความปลอดภัยสูงตลอดทั้งโครงสร้าง

4. วิธีดำเนินการวิจัย

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคือเมล็ดกาแฟโรบัสต้าสาร (Green Bean) จากวิสาหกิจชุมชนหินช้างสี คอฟฟี่ จังหวัดขอนแก่น เก็บเกี่ยวและแปรรูปในฤดูกาลเดียวกัน เมล็ดกาแฟทั้งหมดนำมาจากกระสอบเดิมโดยไม่ผ่านการคัดแยกขนาดล่วงหน้า เพื่อให้สัดส่วนเกรด AA, A และ B-C สะท้อนสภาพจริงของผลผลิตในแต่ละรุ่นชั่งน้ำหนักเมล็ดกาแฟ 1,000 กรัม ใส่ถังพักเมล็ดก่อนเริ่มการทดลอง หลังจากผ่านกระบวนการคัดแยก เมล็ดกาแฟทุกเกรดที่ออกจากเครื่องจะถูกรวบรวมและผสมกลับเข้าด้วยกัน จากนั้นนำมาใช้เป็นตัวอย่างสำหรับรันถัดไป วิธีนี้ทำให้ตัวอย่างทุกรันมาจากล็อตเดียวกัน ช่วยควบคุมความแปรผันของวัตถุดิบให้คงที่ตลอดการทดลอง และเหมาะสมสำหรับการประเมินสมรรถนะของเครื่องจักรโดยเฉพาะ

การออกแบบการทดลองใช้ Box-Behnken Design (BBD) ซึ่งเป็นการทดลองแบบ Response Surface Design ที่เหมาะสำหรับการศึกษาปัจจัย 3 ตัวแปร 3 ระดับ โดยไม่ต้องใช้การทดลองที่จุดสุดขอบของช่วงปัจจัย ช่วยลดจำนวนการทดลองและเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง

ประกอบด้วย 12 รันจุดขอบและ 3 รันจุดกลางรวม 15 รัน ปัจจัยและระดับสรุปในตารางที่ 1 ตัวแปรตอบสนอง Y = ประสิทธิภาพการคัดแยกเฉลี่ยแบบคละ 3 เกรด (AA, A, B-C) วัดด้วย Vision Measuring System โดยชั่งน้ำหนักเมล็ดที่คัดแยกได้ถูกต้องต่อน้ำหนักรวม $\eta=(W_{\text{correct}}/W_{\text{total}})\times 100$ ทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อรัน สำหรับจุดกลาง (Center Point, $X_1=15$ s, $X_2=7.83$ m/s, $X_3=15$ rpm) ใช้เมล็ดกาแฟจากล็อตการผลิตเดียวกันทั้ง 3 ซ้ำ เพื่อประเมิน Repeatability ของเครื่องจักรโดยตัดผลของความแปรผัน ของวัตถุดิบออก ซึ่งเป็นแนวทางมาตรฐานในการทดสอบสมรรถนะเครื่องจักร ส่วนรันอื่นๆ ดำเนินการตามลำดับสุ่มเพื่อลด Systematic Bias

งานวิจัยนี้เลือก η (ประสิทธิภาพการคัดแยก) เป็น primary response variable ในโมเดล RSM ด้วยเหตุผล 3 ประการ ได้แก่ (1) η สะท้อนคุณภาพการคัดแยกที่ตรวจสอบได้โดยตรงตามมาตรฐาน มกษ. 5700-2561 และมีความสัมพันธ์กับทั้ง 3 ปัจจัย (X_1, X_2, X_3) ผ่านกลไกทางกายภาพที่ชัดเจน (2) Throughput (kg/h) ขึ้นอยู่กับ X_1 เป็นหลัก ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อ η ($p=1.000$) การรวม Throughput เป็น response variable ในโมเดลเดียวกันจึงไม่เพิ่มข้อมูลเชิงกลไก และ (3) Contamination Rate มีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับ η โดยตรง

กล่าวคือเมื่อ η สูงขึ้น Contamination Rate จะต่ำลงตามไปด้วย จึงไม่จำเป็นต้องสร้างโมเดลแยก ดังนั้น Throughput และ Contamination Rate จึงถูกกำหนดบทบาทเป็น validation metrics ที่ประเมินที่สภาวะ Optimum โดยตรง ไม่ใช่ response variable ของโมเดล RSM ซึ่งสอดคล้องกับหลักการ Single-response RSM ที่ Montgomery (2017) แนะนำสำหรับกรณีที่มีตัววัดหลักสามารถกำหนดได้ชัดเจนเพียงหนึ่งตัว [9]

ช่วงของแต่ละปัจจัยกำหนดจากการศึกษาเบื้องต้นและข้อจำกัดทางกลไกของเครื่องจักร ได้แก่ X_1 (10-20 s) เป็นช่วงที่ Ring Blower ทำงานสม่ำเสมอโดยไม่เกิดการอุดตันหรือขาดช่วงวัตถุดิบ X_2 (6.08-10.09 m/s) อยู่ระหว่าง Terminal Velocity ของสิ่งเจือปนเบา (~5-6 m/s) และเมล็ดกาแฟ (~11-12 m/s) เพื่อให้แยกสิ่งเจือปนได้โดยไม่พัดเมล็ดดีออกนอกระบบ และ X_3 (10-20 rpm) เป็นช่วงที่ Gear Motor และ Inverter ทำงานเสถียรและให้ Residence Time เพียงพอสำหรับการคัดแยก ดังสรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับการทดลอง Box-Behnken Design

สัญลักษณ์	ปัจจัย	-1 (ต่ำ)	0 (กลาง)	+1 (สูง)	หน่วย
X_1	เวลาดูดเมล็ด	10	15	20	วินาที
X_2	ความเร็วลมเป่า	6.08	7.83	10.09	m/s
X_3	ความเร็วรอบตะแกรง	10	15	20	rpm

จากตารางที่ 1 สังเกตว่าช่วงของ X_3 ครอบคลุม 10–20 rpm ซึ่งอยู่ในช่วงที่เครื่องทำงานได้เสถียร และช่วงของ X_2 ครอบคลุมระดับลมต่ำถึงปานกลาง เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียเมล็ดดีออกนอกระบบ ส่วน X_1 กำหนดช่วง 10 - 20 วินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบลำเลียงทำงานสม่ำเสมอ โดยไม่เกิดการอุดตันหรือเมล็ดสะสมเกินขนาด การกำหนดช่วงปัจจัยในลักษณะนี้ช่วยให้การทดลองครอบคลุม สภาวะการทำงานที่หลากหลายเพียงพอสำหรับการสร้างโมเดล RSM ในขณะที่ยังคงอยู่ในขอบเขตที่ระบบสามารถทำงานได้อย่างเสถียร

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโมเดล Quadratic RSM ใช้ Python (statsmodels) ตรวจสอบสมมติฐาน ANOVA ด้วย Shapiro-Wilk test และ Residual Plots หา สภาวะที่เหมาะสมด้วย Numerical Optimization ภายในขอบเขต $-1 \leq X_i \leq +1$ ค่าฐาน Baseline วัดได้ 3.04 kg/h (จับเวลาการคัดแยกมือ 1 กิโลกรัม = 1,184 วินาที)

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 ผลการวิเคราะห์ ANOVA และความเหมาะสมของโมเดล

ผลการตรวจสอบสมมติฐาน ANOVA ด้วย Shapiro-Wilk test ($W=0.929$, $p=0.260$) และ Residual Plots พบว่าข้อมูลเป็นไปตามเงื่อนไขทุกข้อ ได้แก่ Normality, Homogeneity of Variance และ Independence โดย Normal Probability Plot แสดงจุดข้อมูลเรียงตามเส้น 45° สอดคล้องกับผล Shapiro-Wilk test และ Residual vs Fitted Plot แสดงการกระจาย

สูตรรอบ $y=0$ โดยไม่มีรูปแบบ Fan ยืนยัน Homogeneity of Variance จึงดำเนินการวิเคราะห์ ANOVA ของโมเดล RSM ดังสรุปในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของโมเดล RSM

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p-value
Model	143.49	9	15.944	490.51	<0.001
Linear (X_1, X_2, X_3)	134.08	3	44.695	1,374.8	<0.001
Square (X_1^2, X_2^2, X_3^2)	9.396	3	3.132	96.36	<0.001
Interaction ($X_1, X_2, X_1, X_3, X_2, X_3$)	0.018	3	0.006	0.185	0.905 (ns)
Residual Error	0.1625	5	0.0325	-	-
Lack-of-Fit	0.1507	3	0.0502	-	1.000*
Pure Error	0.0118	2	0.0059	-	-
Total	143.66	14	-	-	-

* Lack-of-Fit $p=1.000$ เนื่องจาก Center Point ทั้ง 3 ซ้ำ ใช้เมล็ดจากล็อตเดียวกัน ผู้ดำเนินการและสภาวะแวดล้อมเดียวกัน ทำให้ Pure Error (SD=0.084%) ต่ำมาก ค่านี้สะท้อนความเสถียรของเครื่องจักร ไม่ใช่ Overfitting เนื่องจาก $R^2(\text{pred})=0.9819$ ยังสูงและการทดลองยืนยัน ($\eta=99.18\%$) ใกล้เคียงค่าทำนาย ($\eta=99.35\%$) ความคลาดเคลื่อน 0.17%

$R^2=0.9989$ | $R^2(\text{adj})=0.9968$ | $R^2(\text{pred})=0.9819$ |
RMSE=0.1803 | Shapiro-Wilk: $W=0.929$, $p=0.260$

จากตารางที่ 2 โมเดลมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F=490.51$ สูงมาก, $p<0.001$) Lack-of-Fit $p=1.000>0.05$ บ่งชี้ว่าโมเดล Quadratic มีความเหมาะสมกับข้อมูล อย่างไรก็ตามค่า Lack-of-Fit ที่สูงมากนี้อาจเป็นผลจากความแปรผันของ Pure Error ที่ต่ำมากภายใต้สภาวะการทดลองที่ควบคุมอย่าง

เข้มงวด ค่า $R^2=0.9989$, $R^2(\text{adj})=0.9968$, $R^2(\text{pred})=0.9819$ แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรผันของข้อมูลได้ในระดับสูง ซึ่งเป็นผลจากความสม่ำเสมอของระบบการทดลองภายใต้สภาวะควบคุม มิใช่เป็นสัญญาณของ Overfitting

Shapiro-Wilk $W=0.929$, $p=0.260>0.05$ บ่งชี้ว่า residual มีการแจกแจงแบบ Normal ผลเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าโมเดล Quadratic น่าจะสามารถใช้ทำนายสมรรถนะของเครื่องจักร ในช่วงปัจจัยที่ทดสอบได้อย่างไรก็ตาม ค่า R^2 และ Lack-of-Fit ที่สูงมากนี้อาจสะท้อนความแปรผันภายในข้อมูลที่ต่ำภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอย่างเข้มงวด ซึ่งอาจจำกัดความสามารถในการสรุปผลไปยังสภาวะที่มีปัจจัยรบกวนสูงกว่า

5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์และนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 แสดงสัมประสิทธิ์โมเดลครบ 10 ตัว พบผลสำคัญ 4 ประการ ได้แก่ (1) X_3 เป็นปัจจัยหลัก ($\beta_3=-4.092$, $p<0.001$) Residence Time Theory: ความเร็วรอบสูงทำให้ T_{res} ลดลง เมล็ดไม่มีเวลาผ่านช่องคัดแยก (2) X_2 มีผลปานกลาง ($\beta_2=-0.751$, $p<0.001$) ลมแรงพัดเมล็ดต้อออก (3) X_1 ไม่มีนัยสำคัญ ($p=1.000$) ยืนยัน Suction Capacity Theory และ (4) ไม่พบปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$ ทุกคู่)

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ RSM และนัยสำคัญทางสถิติ (** $p<0.001$, ns = ไม่มีนัยสำคัญ)

สัมประสิทธิ์	β	SE	t	p-value	นัยสำคัญ	การตีความ
β_0	95.7289	0.1041	919.6	0.000	***	ค่าเฉลี่ย $\eta=95.73\%$ ที่จุดกึ่งกลาง

$\beta_1(X_1)$	0.0000	0.0006	0.0000	1.0000	ns	X_1 ไม่มีผลต่อ η ($\beta_1 \approx 0$)
$\beta_2(X_2)$	-0.7514	0.0006	-0.11788	0.0000	***	$\uparrow$ ลม $\rightarrow$ $\downarrow \eta$
$\beta_3(X_3)$	-4.0918	0.0006	-0.64192	0.0000	***	ปัจจัยหลัก : $\uparrow$ รอบ $\rightarrow$ $\downarrow \eta$
$\beta_{11}(X_1^2)$	0.1560	0.00938	1.074	0.157	ns	ไม่มีนัยสำคัญ
$\beta_{22}(X_2^2)$	-0.1076	0.0009	-1.147	0.3032	ns	Curve ของ X_2
$\beta_{33}(X_3^2)$	-1.1163	0.0009	-1.1897	0.0000	***	Curve ของ X_3
$\beta_{12}(X_1X_2)$	0.0000	0.0009	0.0000	1.0000	ns	ไม่มีนัยสำคัญ (≈ 0)
$\beta_{13}(X_1X_3)$	0.0000	0.0009	0.0000	1.0000	ns	ไม่มีนัยสำคัญ (≈ 0)
$\beta_{23}(X_2X_3)$	0.0828	0.0009	0.918	0.401	ns	ปฏิสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 3 พบผลสำคัญ 4 ประการ ได้แก่ (1) X_3 (ความเร็วรอบตะแกรง) เป็นปัจจัยหลัก ($\beta_3 = -4.092$, $p < 0.001$) ทุก 1 หน่วย coded ที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพลดลง 4.092% ซึ่งอธิบายได้จากทฤษฎี Residence Time ว่าความเร็วรอบสูงทำให้เมล็ดผ่านตะแกรงเร็วเกินไปจนไม่มีเวลาเคลื่อนเข้าสู่ช่องคัดแยก (2) X_2 (ความเร็วลมเป่า) มีผลปานกลาง ($\beta_2 = -0.751$, $p < 0.001$) ลมแรงเกินไปพัดเมล็ดต้อออกนอกระบบ ทำให้ Yield Loss สูงขึ้น (3) X_1 (เวลาดูดเมล็ด) ไม่มีนัยสำคัญ ($p = 1.000$) บ่งชี้ว่า X_1 ส่งผลต่อ Throughput Rate เท่านั้น ไม่ใช่ประสิทธิภาพการคัดแยก ซึ่งสอดคล้องกับหลักการ Capacity vs. Quality Tradeoff และ (4) ไม่พบปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$ ทุกคู่) บ่งชี้ว่าในช่วงการทดลองนี้ปัจจัยแต่ละตัวส่งผลค่อนข้างอิสระต่อกัน ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการทำงานของ X_2 (ชุดแยกสิ่งเจือปน) และ X_3 (ชุดตะแกรง) แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง อย่างไรก็ตามการที่ไม่พบปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญ อาจเป็นผลจากช่วงของปัจจัยที่ทดสอบ มากกว่าการที่ปัจจัยเป็นอิสระต่อกันอย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้การไม่พบปฏิสัมพันธ์อาจเนื่องจากช่วงของตัวแปรที่ศึกษาอยู่ในช่วงการทำงานที่เสถียรของระบบ ซึ่งไม่ก่อให้เกิด Coupling Effect อย่างมีนัยสำคัญ หากขยายช่วงปัจจัยออกไปนอกช่วงที่ทดสอบ อาจพบปฏิสัมพันธ์ที่ชัดเจนขึ้น ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรศึกษาต่อในงานวิจัยอนาคต เมื่อได้ค่า

สัมประสิทธิ์ครบทั้ง 10 ตัวแล้ว จึงสร้างสมการ RSM และหาสภาวะที่เหมาะสมในหัวข้อถัดไป

5.3 สมการ RSM และสภาวะที่เหมาะสม

สมการถดถอยกำลังสองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี RSM แสดงดังสมการ

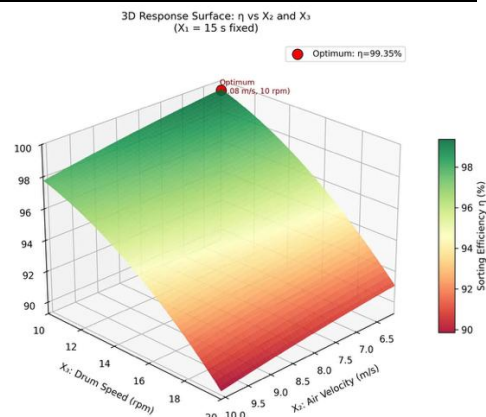
$$\eta = 95.729 - 0.751X_2 - 4.092X_3 - 0.108X_2^2 - 1.116X_3^2 + 0.083X_2X_3$$

โดยที่ X_2 และ X_3 เป็นตัวแปรอิสระในรูปแบบ coded variables ซึ่งถูกแปลงจากค่าจริงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติ

ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัย X_3 มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการคัดแยกสูงที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบ (-4.092) และมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ ANOVA ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วยรอบของตะแกรงส่งผลให้ประสิทธิภาพการคัดแยกลดลง

X_1 และปฏิสัมพันธ์ X_1X_2, X_1X_3 มีค่าสัมประสิทธิ์ = 0 ยืนยันผลในตารางที่ 3 การ Optimize ภายในขอบเขต $-1 < X_i < +1$ พบ Global Optimum ที่ $X_1=0$ (15 s), $X_2=-1$ (6.08 m/s), $X_3=-1$ (10 rpm) ให้ $\eta=99.35\%$ สภาวะ Optimum นี้คือ Constrained Global Optimum ภายใต้ข้อจำกัดทางกลไก กล่าวคือ $X_2 < 6.08$ m/s ความเร็วลมไม่เพียงพอแยกสิ่งเจือปน และ $X_3 < 10$ rpm ตะแกรงหมุนไม่ช้าสม่ำเสมอเกิดการอุดตัน

3D Response Surface แสดงในรูปที่ 4 พบว่าบริเวณ $\eta > 98\%$ กระจุกวัดที่มุมซ้ายหน้า (X_2 ต่ำ - X_3 ต่ำ) สอดคล้องกับสมการ พื้นผิวตอบสนองลาดเอียงตามแนวแกน X_3 สอดคล้องกับค่า β_3 ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด และเห็น Curvature ของ X_3^2 ($\beta_{33}=-1.116$) ได้ชัดเจนกว่า Contour Plot 2 มิติ บ่งชี้ว่าไม่มี Interaction Effect ระหว่าง X_2 และ X_3 สอดคล้องกับค่า $\beta_{23}=0.0828$ ที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



รูปที่ 4 3D Response Surface ของ η (%) เป็นฟังก์ชันของ X_2 (ความเร็วลมเป่า) และ X_3 (ความเร็วรอบตะแกรง) ที่ $X_1=15$ s พื้นผิวตอบสนองลาดเอียงตามแนวแกน X_3 สอดคล้องกับ $\beta_3 = -4.092$ ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ค่า η สูงสุด ($\eta=99.35\%$) กระจุกวัดที่มุมซ้ายหน้า ($X_2=6.08$ m/s, $X_3=10$ rpm) ซึ่งตรงกับสภาวะ Optimum (จุดสีแดง)

จากรูปที่ 4 พบว่า η ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อ X_3 เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่า β_3 ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด นอกจากนั้นบริเวณที่ให้ η สูงสุดในรูปที่ 4 อยู่ที่ยุ่ซ้ายหน้า คือ X_2 ต่ำและ X_3 ต่ำ ซึ่งตรงกับสภาวะ Optimum ที่ได้จากการ Optimize เมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมแล้ว จึงนำไปประเมินสมรรถนะจริงของเครื่องจักรเปรียบเทียบกับวิธีเดิม ดังสรุปในตารางที่ 4

5.4 การประเมินสมรรถนะของเครื่องจักร ณ สภาวะที่เหมาะสม (Performance Evaluation at Optimal Conditions)

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Global Optimum) สำหรับการทำงานของเครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟโรบัสต้ากิ่งอัตโนมัติ คือ ความเร็วลมเป่า 6.08 m/s (X_2) และ ความเร็วรอบตะแกรง 10 rpm (X_3) โดยมีเวลาดูดลำเลียงคงที่ที่ 15 วินาที (X_1) เมื่อนำสภาวะดังกล่าวมาทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะเปรียบเทียบกับวิธีเดิม (Manual Sorting) ผลการทดลองปรากฏดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเครื่องคัดแยกที่พัฒนาขึ้นกับวิธีเดิม

ตัวชี้วัด	สภาวะที่เหมาะสม (RSM)	วิธีเดิม (มือ)	อัตราส่วน
ประสิทธิภาพการคัดแยก η	99.35%	-	-
กำลังการผลิต	38.49 kg/h	3.04 kg/h	12.66 เท่า ✓
กำลังการผลิต (8 ชม./วัน)	307.92 kg/day	24.32 kg/day	+1,166.12%
อัตราปนเปื้อน (สูงสุด)	4% (เกรด AA, A)	-	<10% มกษ. ✓
สภาวะ Optimum	$X_1=15$ s, $X_2=6.08$ m/s, $X_3=10$ rpm	-	-

เครื่องให้กำลังการผลิต 38.49 kg/h (307.92 kg/day ที่ 8 ชม.) สูงกว่าวิธีเดิม 12.66 เท่า หรือ เพิ่มขึ้น $(12.66-1) \times 100 = 1,166.12\%$ เกินเป้าหมาย 100 kg/day ถึง 3 เท่า การปรับปรุงนี้เกิดจากการใช้ระบบลำเลียงด้วยลมและตะแกรงหมุนที่ทำงานต่อเนื่อง แทนที่แรงงานมือซึ่งมีข้อจำกัดด้านความเหนื่อยล้าและความสม่ำเสมอ อัตราปนเปื้อน <4% ผ่านเกณฑ์ มกษ. 5700-2561 ทุกเกรด ผลทั้งหมดในตารางที่ 4 ชี้ให้เห็นว่าเครื่องจักรที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการแก้ปัญหาคอขวดของวิสาหกิจชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยเพิ่มกำลัง

การผลิตให้เกินเป้าหมาย 100 kg/day ถึง 3 เท่า ในขณะที่ยังรักษาคุณภาพการคัดแยกตามมาตรฐานไว้ได้

5.5 การทดลองยืนยัน (Confirmation Run)

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง RSM ได้ดำเนินการทดลองยืนยันที่สภาวะ Optimum ($X_2=6.08$ m/s, $X_3=10$ rpm, $X_1=15$ s) จำนวน 3 ซ้ำ พบว่าค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย $\eta=99.18\%$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่โมเดลทำนาย ($\eta_{pred}=99.35\%$) โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.17% บ่งชี้ว่าแบบจำลอง RSM มีความสามารถในการทำนายสมรรถนะที่ยอมรับได้ภายใต้สภาวะการทดลองที่ควบคุม

ผลการทดลองยืนยันนี้สนับสนุนความน่าเชื่อถือของสภาวะ Optimum ที่ได้จาก RSM อย่างไรก็ดี เพื่อยืนยันความสามารถในการถ่ายโอน (Transferability) ของโมเดลไปยังสภาวะการผลิตจริง ควรมีการทดสอบเพิ่มเติมในช่วงปัจจัยที่กว้างขึ้น และในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลายกว่านี้

6. สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดกาแฟโรบัสต้ากึ่งอัตโนมัติ และหาสภาวะที่เหมาะสมด้วย RSM (BBD) เพิ่มเติมช่องว่างในวรรณกรรมด้านการบูรณาการการออกแบบเครื่องจักรระดับวิสาหกิจชุมชนเข้ากับ RSM อย่างเป็นระบบ ผลสำคัญ ได้แก่

- (1) $FoS=18$ ยืนยันความแข็งแรงโครงสร้าง
- (2) โมเดล Quadratic แสดงความเหมาะสมกับข้อมูล ($R^2=0.9989$, Lack-of-Fit $p=1.000$) โดย $R^2(adj)=0.9968$ และ $R^2(pred)=0.9819$ บ่งชี้ว่าโมเดลสามารถอธิบายและทำนายข้อมูลได้ดี
- (3) ความเร็วรอบ (X_3) เป็นปัจจัยหลัก สอดคล้องกับทฤษฎี Residence Time X_1 ไม่มีนัยสำคัญ สอดคล้องกับ Suction Capacity Theory
- (4) ไม่พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงการทดลองที่ศึกษา
- (5) สภาวะที่เหมาะสมคือ $X_1=15$ s, $X_2=6.08$ m/s และ $X_3=10$ rpm ให้ประสิทธิภาพการคัดแยกสูงสุดเท่ากับ 99.35%

(6) เครื่องให้กำลังการผลิต 38.49 kg/h สูงกว่าวิธีเดิม 12.66 เท่า (+1,166.12%) และมีอัตราการปนเปื้อนสูงสุด 4% ซึ่งผ่านมาตรฐาน มกษ. 5700-2561

สำหรับงานวิจัยต่อไป การทดลองยืนยัน (Confirmation Run) 3 ซ้ำที่สภาวะ Optimum ให้ค่า $\eta=99.18\%$ ใกล้เคียงกับค่าทำนาย 99.35% (ความคลาดเคลื่อน 0.17%) บ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง งานวิจัยต่อไปควรศึกษาการวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์ ขยายช่วงปัจจัยเพื่อตรวจสอบ Interaction Effect และขยายการทดลองไปยังสายพันธุ์กาแฟอื่น

6.1 ข้อจำกัดของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณาในการนำผลไปใช้ ดังนี้

(1) Center Point ทั้ง 3 ซ้ำใช้เมล็ดกาแฟจากล็อตเดียวกัน เพื่อประเมิน Repeatability ของเครื่องจักร ทำให้ Pure Error มีค่าน้อย (Center SD=0.84%) ส่งผลให้ $R^2=0.999$ และ Lack-of-Fit $p=1.000$

ซึ่งสะท้อนความแปรผันที่ต่ำของระบบภายใต้สภาวะควบคุม ไม่ใช่สัญญาณของ Overfitting อย่างไรก็ตามผลนี้ยังไม่ครอบคลุม Reproducibility ข้ามล็อตวัตถุดิบหรือสภาวะที่มีปัจจัยรบกวนสูงกว่า

(2) การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการกับกาแฟโรบัสต้าจากแหล่งผลิตเดียว ผลการวิจัยอาจแตกต่างเมื่อทดสอบกับแหล่งผลิตหรือสายพันธุ์กาแฟอื่น และ

(3) ช่วงของปัจจัยที่ทดสอบอยู่ในขอบเขตการทำงานที่เสถียร ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมสภาวะที่ก่อให้เกิด Interaction Effect การขยายช่วงปัจจัยในงานวิจัยอนาคตจะช่วยยืนยันความสมบูรณ์ของโมเดลได้มากขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณวิสาหกิจชุมชนหินช้างสี คอฟฟี่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่และวัตถุดิบ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนเครื่องมือวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ICO. Coffee Market Report. International Coffee Organization; 2023.
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญ. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2566.
- [3] FAO. Coffee production and value chain analysis. Rome: Food and Agriculture Organization; 2022.
- [4] Yeretizian C, Jordan A, Badoud R, Lindinger W. From the green bean to the cup of coffee: investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles. European Food Research and Technology. 2002; 214: 92-104.
- [5] Illy A, Viani R. Espresso Coffee: The Science of Quality. 2nd ed. London: Elsevier Academic Press; 2005.
- [6] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 5700-2561: เมล็ดกาแฟ. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2561.
- [7] Mutua JM, Njoroge SM, Imathiu S. Coffee processing technologies in Africa: a review. Journal of Food Processing and Preservation. 2021; 45(3): e15234.
- [8] Shigley JE, Mischke CR, Budynas RG. Mechanical Engineering Design. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2004.
- [9] Montgomery DC. Design and Analysis of Experiments. 9th ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2017.

- [10] Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2016.