

บทความวิจัย (Research Article)

การออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน
โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

Design and Development of a Community-Scale Charcoal Briquette Mixing
and Compaction Machine Using Quality Function Deployment

พีระวัฒน์ คำชนะ¹, ไวรุจน์ อิมโพ^{1*} และ ภาณุวัฒน์ วงศ์แสงน้อย¹

Peerawat Khamchana¹, Wairut Impho¹ and Phanuwat Wongsangnoi¹

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

¹Faculty of Industrial Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University

*Corresponding author; email: Wairut@snru.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)

13 สิงหาคม 2569

วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)

1 ตุลาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)

1 ตุลาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ทดสอบสมรรถนะของเครื่อง และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน เครื่องต้นแบบได้รับการออกแบบจากความต้องการของผู้ผลิตถ่านแท่งในชุมชน จำนวน 20 คน โดยใช้การสัมภาษณ์ แบบสอบถาม การสังเกต กระบวนการผลิตเดิม และการวิเคราะห์บ้านคุณภาพ เพื่อแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรม เครื่องต้นแบบประกอบด้วยถังผสมวัตถุดิบ ชุดเพลากวนและใบกวน ระบบส่งกำลัง ช่องลำเลียงส่วนผสม ชุดอัดถ่านแท่ง แนวนอน และโครงสร้างรองรับ การทดสอบสมรรถนะดำเนินการกับวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ ผงถ่านจากไม้ตะเคียน ผงถ่านจากกะลามะพร้าว และกากกาแฟแห้ง โดยกำหนดเวลาผสม 5 นาทีเท่ากันทุกสูตร ผลการทดสอบพบว่า เครื่องมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 45.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการอัดเฉลี่ย 92.21% ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของส่วนผสม (Coefficient of Variation: CV) เฉลี่ย 5.27% และอัตราการแตกหักเฉลี่ย 5.62% ถ่านอัดแท่งจากผงถ่านจากไม้ตะเคียนให้ค่าความร้อนสูงสุด 5,535.36 แคลอรีต่อกรัม รองลงมาคือผงถ่านจากไม้ตะเคียน 5,354.76 แคลอรีต่อกรัม และกากกาแฟแห้ง 4,680.91 แคลอรีต่อกรัม ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 4.53 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 แสดงว่าเครื่องต้นแบบมีความเหมาะสมต่อการผลิตถ่านอัดแท่งระดับชุมชน โดยเฉพาะเมื่อใช้ผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเคียนเป็นวัตถุดิบหลัก

คำสำคัญ: เครื่องผสมและอัดถ่านแท่ง, ถ่านอัดแท่ง, การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ, บ้านคุณภาพ

Abstract

This research aimed to design and develop a community-scale charcoal briquette mixing and compaction machine using Quality Function Deployment (QFD), to evaluate its performance, and to assess user satisfaction. The machine design was based on the requirements of 20 community charcoal briquette producers. Data were collected through interviews, questionnaires, observation of the existing production process, and House of Quality analysis to translate user requirements into engineering specifications. The prototype consisted of a raw material mixing tank, stirring shaft and blades, power transmission system, material conveying chute, horizontal briquette compaction unit, and supporting frame. Machine performance was tested using three raw materials: chopstick charcoal powder, coconut shell charcoal powder, and briquette made from dried spent coffee grounds. The mixing time was fixed at 5 minutes for all formulations. The results showed that the machine achieved an average production capacity of 45.71 kg/h, an average compaction efficiency of 92.21%, an average coefficient of variation (CV) of the mixture of 5.27%, and an average breakage rate of 5.62%. The coconut shell charcoal briquette had the highest heating value of 5,535.36 cal/g, followed by chopstick charcoal briquette at 5,354.76 cal/g and dried spent coffee grounds briquette at 4,680.91 cal/g. The overall user satisfaction was at the highest level, with a mean score of 4.53 and a standard deviation of 0.51. These findings indicate that the developed machine is suitable for community-scale charcoal briquette production, particularly when coconut shell charcoal powder and chopstick charcoal powder are used as the main raw materials.

Keywords: Charcoal briquette machine, Charcoal briquette, Quality function deployment, House of quality

บทนำ

ถ่านอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีความสำคัญต่อครัวเรือน ชุมชน และสถานประกอบการ เนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ในห้องถ่าน ช่วยลดปัญหาของเสีย เพิ่มมูลค่าวัตถุดิบ และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในระดับชุมชน งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าวัสดุเหลือใช้ เช่น กากโหระพาและไม้ไผ่ สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านอัดแท่งที่มีค่าความร้อนและสมบัติการใช้งานเหมาะสมได้ [1, 2] อย่างไรก็ตาม คุณภาพของถ่านอัดแท่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ อัตราส่วนของผงถ่าน ตัวประสาน น้ำ ความสม่ำเสมอของการผสม และประสิทธิภาพของการอัดขึ้นรูป ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความแน่น การคงรูป และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ [2, 3]

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า มีการพัฒนาเครื่องอัดถ่านแท่งหลายรูปแบบ เช่น เครื่องอัดถ่านแท่งจากฝักราชพลูγκซ์และเครื่องอัดถ่านอัดโน้มติควบคุมด้วย PLC ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังการผลิตและคุณภาพการอัดขึ้นรูป [4, 5] อย่างไรก็ตามงานส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นเครื่องอัดหรือสูตรส่วนผสมเป็นหลัก ขณะที่การพัฒนาเครื่องที่บูรณาการกระบวนการผสมและอัดให้เหมาะสมกับการใช้งานระดับชุมชนยังพบไม่มากนัก เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ หรือ Quality Function Deployment: QFD เป็นเครื่องมือที่สามารถแปลงความต้องการของผู้ใช้ให้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมอย่างเป็นระบบ และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องจักรต้นแบบให้ตอบสนองต่อการใช้งานจริงได้ [6, 7] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เพื่อให้ได้เครื่องต้นแบบที่ใช้งานง่าย ปลอดภัย ลดแรงงาน และเพิ่มความสม่ำเสมอของกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งที่พัฒนาขึ้น
3. เพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งที่พัฒนาขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ในการแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องต้นแบบ ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย การศึกษาสภาพปัญหาของกระบวนการผลิตเดิม การรวบรวมเสียงของผู้ใช้จากกลุ่มผู้ผลิตถ่านแท่งหรือผู้ใช้งานในชุมชน จำนวน 20 คน ด้วยการสัมภาษณ์ แบบสอบถาม และการสังเกตงานจริง การจัดทำบ้านคุณภาพเพื่อจัดลำดับความสำคัญของข้อกำหนดทางวิศวกรรม การออกแบบเครื่องด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ การสร้างเครื่องต้นแบบ การทดสอบสมรรถนะ ด้านการผสม การลำเลียง และการอัดขึ้นรูป และการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานด้วยแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ เพื่อนำผลที่ได้ไปประเมินความเหมาะสมของเครื่องต้นแบบต่อการใช้งานจริงในระดับชุมชน

1. การศึกษาสภาพปัญหาและความต้องการของผู้ใช้

ผู้วิจัยศึกษาสภาพปัญหาของกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งระดับชุมชนด้วยการสังเกตกระบวนการผลิตเดิม การสัมภาษณ์ถึงโครงสร้าง และการรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มผู้ผลิตถ่านอัดแท่งหรือผู้ใช้งานในชุมชน จำนวน 20 คน โดยศึกษาขั้นตอนตั้งแต่การเตรียมผงถ่าน การผสมตัวประสาน การเติมน้ำ การคลุกเคล้าส่วนผสมการลำเลียงส่วนผสมเข้าสู่เครื่องอัด และการอัดขึ้นรูปถ่านแท่ง ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการเดิมใช้แรงงานเฉลี่ยประมาณ 3 คน ใช้เวลาผสมเฉลี่ย 20 นาทีต่อชุดมีกำลังการผลิตเฉลี่ยประมาณ 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีผลิตภัณฑ์เสียจากการอัดไม่สมบูรณ์ประมาณ 15% ต่อรอบการผลิตปัญหาดังกล่าวสะท้อนข้อจำกัดด้านแรงงาน เวลา ความต่อเนื่องของกระบวนการ ความสม่ำเสมอของส่วนผสม และคุณภาพของถ่านอัดแท่ง ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลดังกล่าวเป็นฐานในการออกแบบเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งที่รวมกระบวนการผสม ลำเลียง และอัดขึ้นรูปไว้ในระบบเดียว เพื่อลดแรงงานและเพิ่มความสม่ำเสมอของการผลิต

2. การรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้

การรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้ ดำเนินการจากการรวบรวมเสียงของกลุ่มผู้ผลิตถ่านแท่งหรือผู้ประกอบการชุมชน จำนวน 20 คน โดยใช้การสัมภาษณ์ถึงโครงสร้าง แบบสอบถาม และการสังเกตการทำงานจริง ประเด็นที่ใช้สอบถามครอบคลุมความต้องการด้านการใช้งาน ความปลอดภัย คุณภาพของถ่านแท่ง การบำรุงรักษา และต้นทุนการผลิต ตัวอย่างความต้องการที่ได้จากผู้ใช้ ได้แก่ เครื่องต้องใช้งานง่าย ผสมวัตถุดิบได้สม่ำเสมอ อัดถ่านได้แน่น ลดแรงงาน มีความปลอดภัย ทำความสะอาดง่าย ซ่อมบำรุงสะดวก ใช้ต้นทุนเหมาะสม และมีขนาดเหมาะกับพื้นที่ปฏิบัติงานของชุมชน

3. การจัดทำบ้านคุณภาพ

ผู้วิจัยนำความต้องการของผู้ใช้มาจัดทำบ้านคุณภาพ โดยกำหนดความต้องการของผู้ใช้เป็น WHATs และกำหนดคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องเป็น HOWs ได้แก่ ความจุถังผสม รูปแบบใบกวน ความเร็วรอบเพลากวน กำลังมอเตอร์ ระบบส่งกำลัง ขนาดช่องลำเลียง ขนาดกระบอกอัด ความแข็งแรงของโครงสร้าง และระบบป้องกันอันตราย จากนั้นประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง WHATs และ HOWs โดยใช้ระดับคะแนน 9, 3 และ 1 แทนความสัมพันธ์มาก ปานกลาง และน้อยตามลำดับ ผลรวมคะแนนถ่วงน้ำหนักถูกนำมาใช้จัดลำดับความสำคัญของข้อกำหนดทางวิศวกรรม เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องต้นแบบ โดยคำนวณคะแนนความสำคัญทางเทคนิคจากผลรวมของผลคูณระหว่างค่าน้ำหนักความสำคัญของ

ความต้องการผู้ใช้และค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้ใช้กับคุณลักษณะทางเทคนิค ดังสมการที่ (1) และคำนวณร้อยละความสำคัญของข้อกำหนดทางวิศวกรรมแต่ละรายการ ดังสมการที่ (2)

$$T_j = \sum_{i=1}^m W_i R_{ij} \quad (1)$$

เมื่อ T_j = คะแนนความสำคัญทางเทคนิคของข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ j
 W_i = ค่าน้ำหนักความสำคัญของความต้องการผู้ใช้ที่ i
 R_{ij} = ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการผู้ใช้ที่ i กับข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ j
 M = จำนวนความต้องการของผู้ใช้

$$P_j = \frac{T_j}{\sum_{j=1}^n T_j} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ P_j = ร้อยละความสำคัญของข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ j
 n = จำนวนข้อกำหนดทางวิศวกรรมทั้งหมด

4. การแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรม

ผลจากบ้านคุณภาพถูกนำมาแปลงเป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องต้นแบบ โดยความต้องการด้านการผสมสม่ำเสมอถูกแปลงเป็นรูปแบบใบกวนโค้งหรือใบกวนแบบกวาดผสม ความเร็วรอบเพลากวนระหว่าง 30–60 รอบต่อนาที และความจุถังผสมระหว่าง 40–60 กิโลกรัมต่อรอบ ความต้องการด้านการลดแรงงานถูกแปลงเป็นระบบผสมและอัดต่อเนื่องผ่านช่องลำเลียงจากถังผสมไปยังชุดอัด ความต้องการด้านการอัดแน่นถูกแปลงเป็นชุดอัดแนวนอนแบบสกรูอัด ขนาดกระบอกอัดระหว่าง 45–60 มิลลิเมตร และความเร็วรอบสกรูอัดระหว่าง 200–300 รอบต่อนาที ความต้องการด้านความปลอดภัยถูกแปลงเป็นฝาครอบสายพาน จุดป้องกันชิ้นส่วนหมุน และสวิตช์ควบคุม ส่วนความต้องการด้านการบำรุงรักษาถูกแปลงเป็นโครงสร้างเปิด ตรวจสอบง่าย และสามารถถอดประกอบชิ้นส่วนสำคัญได้

5. การออกแบบเครื่องผสมและอัดถ่านแท่ง

การออกแบบเครื่องดำเนินการด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ โดยใช้ผลจาก QFD เป็นเกณฑ์กำหนดรูปแบบและขนาดเบื้องต้นของชิ้นส่วน เครื่องต้นแบบแบ่งเป็น 6 ระบบย่อย ได้แก่ 1) ชุดถังผสมวัตถุดิบด้านบน ทำหน้าที่รองรับผงถ่านตัวประสานและน้ำ โดยกำหนดความจุถังผสมระหว่าง 40–60 กิโลกรัมต่อรอบ 2) ชุดเพลากวนและใบกวน ทำหน้าที่คลุกเคล้าส่วนผสมให้สม่ำเสมอ 3) ระบบส่งกำลัง ใช้อมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้า ถ่ายกำลังผ่านสายพานและพูลเลย์ไปยังชุดผสมและชุดอัด 4) ช่องลำเลียงส่วนผสม ทำหน้าที่ส่งวัสดุจากถังผสมลงสู่ชุดอัดอย่างต่อเนื่อง 5) ชุดอัดถ่านแท่งแนวนอน ทำหน้าที่อัดขึ้นรูปถ่านแท่งให้มีความแน่นและรูปทรงสม่ำเสมอ และ 6) โครงสร้างเครื่อง ทำจากเหล็กรูปพรรณเพื่อรองรับน้ำหนักแรงสั่นสะเทือน และแรงจากกระบวนการอัด โดยกำหนดเป้าหมายกำลังการผลิตเบื้องต้น 30–50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

6. การคำนวณออกแบบทางวิศวกรรมเบื้องต้น

การคำนวณออกแบบทางวิศวกรรมเบื้องต้นใช้เพื่อกำหนดความเหมาะสมของกำลังมอเตอร์ ระบบส่งกำลัง และชิ้นส่วนรับแรงของเครื่องต้นแบบ โดยพิจารณาสมการหลัก 3 ส่วน ได้แก่ แรงบิดของเพลาขับ อัตราทดของระบบสายพานและพูลเลย์ และความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนรับแรง เครื่องต้นแบบเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้า หรือประมาณ 1.49 กิโลวัตต์ ส่งกำลังผ่านระบบสายพานและพูลเลย์ไปยังชุดกวนและชุดอัด เพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่เหมาะสมกับกระบวนการผสมและอัดขึ้นรูปถ่านแท่ง ดังสมการที่ 3 และ 4

$$T = \frac{9550 \cdot P}{n} \quad (3)$$

เมื่อ T = แรงบิดของเพลา (N.m)
 P = กำลังที่ส่งผ่านเพลา (kW)
 n = ความเร็วรอบของเพลา (rpm)

การคำนวณอัตราทดของระบบสายพานและพูลเลย์พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพูลเลย์ดังสมการที่ 4

$$i = \frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (4)$$

เมื่อ i = อัตราทด
 N_1 = ความเร็วรอบของพูลเลย์ขับ (rpm)
 N_2 = ความเร็วรอบของพูลเลย์ตาม (rpm)
 D_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพูลเลย์ขับ
 D_2 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพูลเลย์ตาม

การคำนวณความแข็งแรงของวัสดุจากความสามารถในการรับแรงอัดและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการอัด ดังสมการที่ 5

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

เมื่อ σ = ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนรับแรง (MPa)
 F = แรงอัดที่กระทำต่อกระบอกอัด (N)
 A = พื้นที่หน้าตัดรับแรง (mm²)

7. การสร้างเครื่องต้นแบบ

การสร้างเครื่องต้นแบบเริ่มจากการจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ ได้แก่ เหล็กรูปพรรณ แผ่นเหล็กสำหรับถังผสม เพลากวน ใบกวน ชุดสกรูอัด กระจกอัด มอเตอร์ สายพาน พูลเลย์ ตลับลูกปืน และอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า จากนั้นดำเนินการตัดและเชื่อมโครงสร้าง ประกอบถังผสม ติดตั้งเพลากวนและใบกวน ติดตั้งช่องลำเลียงส่วนผสม ประกอบชุดอัดแวนอน ติดตั้งระบบส่งกำลัง และตรวจสอบแนวศูนย์ของเพลากวน ความตึงสายพาน การหมุนของชุดกวนและชุดอัด รวมถึงความมั่นคงของโครงสร้างก่อนเข้าสู่การทดสอบสมรรถนะ

8. การทดสอบสมรรถนะของเครื่อง

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องแบ่งเป็นการทดสอบการผสม การลำเลียงส่วนผสม การอัดขึ้นรูป และการทำงานต่อเนื่อง โดยใช้ส่วนผสมได้แก่ ผงถ่าน 20 กิโลกรัม แป้งมันสำปะหลัง 0.8 กิโลกรัม และน้ำ 4 ลิตร ต่อการทดสอบหนึ่งชุด ตัวชี้วัดที่ใช้ประกอบด้วย เวลาที่ใช้ในการผสม ความสม่ำเสมอของส่วนผสม อัตราการป้อนเข้าสู่ชุดอัด กำลังการผลิต ความสมบูรณ์ของแท่งถ่าน และอัตราการแตกหัก โดยคำนวณกำลังการผลิต ประสิทธิภาพการอัด ความสม่ำเสมอของส่วนผสม อัตราการแตกหักจากสมการที่ (6)–(9) ตามลำดับ

$$Q = \frac{W_o \times 60}{t_m + t_p} \quad (6)$$

เมื่อ Q = กำลังการผลิตของเครื่อง (kg/h)
 W_o = น้ำหนักถ่านแท่งหลังอัด (kg)
 t_m = เวลาผสม (min)
 t_p = เวลาอัดขึ้นรูป (min)

$$\eta_m = \frac{W_{out}}{W_{in}} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ η_m = ประสิทธิภาพการอัดเชิงมวล (%)
 W_{out} = น้ำหนักส่วนผสมหลังอัด (kg)
 W_{in} = น้ำหนักส่วนผสมก่อนอัด (kg)

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ CV = ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของส่วนผสม (%)
 S = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความชื้นรวมของส่วนผสมที่สุ่มเก็บจาก 5 จุด
 $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของค่าความชื้นของส่วนผสมที่สุ่มเก็บจาก 5 จุด

$$B = \frac{N_b}{N_t} \times 100 \quad (9)$$

เมื่อ B = อัตราการแตกหักของถ่านแท่ง (%)
 N_b = จำนวนถ่านแท่งที่แตกหักหรือขึ้นรูปไม่สมบูรณ์
 N_t = จำนวนถ่านแท่งทั้งหมดที่ผลิตได้

9. การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

หลังจากทดสอบเครื่องต้นแบบ ผู้วิจัยประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานโดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ กลุ่มผู้ประเมินคือผู้ผลิตถ่านแท่งหรือผู้ใช้งานในชุมชน จำนวน 20 คน ประเด็นประเมินประกอบด้วย ความสะดวกในการใช้งาน ความปลอดภัย ความสม่ำเสมอของการผสม ความสามารถในการอัด ความเหมาะสมของขนาดเครื่อง ความสะดวกในการทำความสะดวก การบำรุงรักษา และความเหมาะสมต่อการใช้งานระดับชุมชน วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการที่ (10) และ (11) โดยกำหนดเกณฑ์ความพึงพอใจเป้าหมายเบื้องต้นไม่น้อยกว่า 3.50 จากคะแนนเต็ม 5.00

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (10)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (11)$$

เมื่อ $\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจ
 x_i = คะแนนความพึงพอใจของผู้ตอบแบบสอบถามแต่ละคน
 n = จำนวนผู้ตอบแบบสอบถาม
 SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้

ผลการศึกษาสภาพปัญหาและความต้องการของผู้ใช้จากกระบวนการผลิตเดิม พบว่าสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ 4 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านกระบวนการผลิตและแรงงาน กระบวนการเดิมมีหลายขั้นตอน ต้องขนถ่ายวัสดุระหว่างการผสมและการอัด และใช้แรงงานคนเป็นหลัก จึงต้องการเครื่องที่สามารถรวมกระบวนการผสมและอัดไว้ในระบบเดียวเพื่อลดขั้นตอนและลดแรงงาน 2) ด้านความสม่ำเสมอของส่วนผสมและการลำเลียงวัตถุดิบ พบว่าการผสมผงถ่าน ตัวประสาน และน้ำยังไม่ทั่วถึง รวมทั้งการป้อนวัสดุเข้าสู่ชุดอัดไม่ต่อเนื่อง ผู้ใช้จึงต้องการถังผสม เพลากวน ใบกวน และช่องลำเลียงที่ช่วยให้ส่วนผสมเข้าสู่ชุดอัดได้อย่างสม่ำเสมอ 3) ด้านคุณภาพถ่านแท่งและกำลังการผลิต พบว่าถ่านแท่งบางส่วนอัดไม่แน่น แตกหักง่าย และมีกำลังการผลิตต่ำ จึงต้องการชุดอัดที่ให้แรงอัดเหมาะสม ได้รูปทรงถ่านแท่งคงที่ และสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง และ 4) ด้านความเหมาะสมต่อการใช้งานในชุมชน ผู้ใช้ต้องการเครื่องที่ใช้งานง่าย มีความปลอดภัย ทำความสะอาดและบำรุงรักษาได้สะดวก ใช้

วัสดุและอุปกรณ์ที่จัดหาได้ในท้องถิ่น มีต้นทุนเหมาะสม และซ่อมแซมได้ง่าย ผลการศึกษาดังกล่าวจึงถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการจัดทำ QFD และการกำหนดข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชนในขั้นตอนถัดไป

2. ผลการรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้

ผลการรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้จากกลุ่มผู้ผลิตถ่านแท่งและผู้ประกอบการชุมชน จำนวน 20 คน พบว่าผู้ใช้ให้ความสำคัญกับเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งที่สามารถแก้ปัญหาการผลิตเดิมได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยเฉพาะด้านความสม่ำเสมอของการผสม การลดแรงงาน การอัดถ่านให้แน่นและมีรูปทรงคงที่ ความปลอดภัย ความสะดวกในการใช้งาน การทำความสะอาดและบำรุงรักษา รวมถึงต้นทุนที่เหมาะสมกับระดับชุมชน

เมื่อนำข้อมูลจากการสัมภาษณ์ แบบสอบถาม และการสังเกตการทำงานจริงมาจัดกลุ่มเป็นความต้องการของผู้ใช้ หรือ Voice of Customer: VOC พบว่าสามารถสรุปความต้องการหลักได้ 7 ประเด็น ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยค่าน้ำหนักความสำคัญ (W_i) คำนวณจากค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญของผู้ใช้จำนวน 20 คน ด้วยมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ

ตารางที่ 3 ผลการรวบรวมเสียงของลูกค้าหรือผู้ใช้

รหัส	ความต้องการของผู้ใช้	W_i	ลำดับ
CR1	ผสมวัตถุดิบได้สม่ำเสมอ	4.85	1
CR2	อัดถ่านได้แน่นและมีรูปทรงคงที่	4.80	2
CR3	ลดแรงงานและขั้นตอนการผลิต	4.75	3
CR4	มีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.70	4
CR5	ต้นทุนเหมาะสมกับระดับชุมชน	4.65	5
CR6	ทำความสะอาดและบำรุงรักษาง่าย	4.65	6
CR7	ใช้งานง่ายและเหมาะกับผู้ใช้ชุมชน	4.50	7

จากตารางที่ 3 พบว่าความต้องการที่มีค่าน้ำหนักความสำคัญสูงสุด คือ การผสมวัตถุดิบได้สม่ำเสมอ ($W_i = 4.85$) รองลงมาคือ การอัดถ่านได้แน่นและมีรูปทรงคงที่ ($W_i = 4.80$) และการลดแรงงานและขั้นตอนการผลิต ($W_i = 4.75$) ตามลำดับ ผลดังกล่าวสะท้อนว่าผู้ใช้ให้ความสำคัญกับคุณภาพของส่วนผสมก่อนการอัด คุณภาพของแท่งถ่านหลังการอัด และความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตเป็นหลัก

นอกจากนี้ ความต้องการด้านความปลอดภัย ต้นทุนที่เหมาะสม การทำความสะอาดและบำรุงรักษาง่าย รวมถึงการใช้งานที่เหมาะสมกับผู้ใช้ในชุมชน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูงเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบไม่ควรมุ่งเน้นเฉพาะสมรรถนะการผลิตเท่านั้น แต่ต้องคำนึงถึงความปลอดภัย ความง่ายในการใช้งาน และความสามารถในการดูแลรักษาโดยผู้ใช้ในชุมชนด้วย ผลการรวบรวมเสียงของผู้ใช้จึงถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการจัดทำบ้านคุณภาพและการแปลงเป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมในขั้นตอนถัดไป

3. ผลการจัดทำบ้านคุณภาพ

ผลการจัดทำบ้านคุณภาพ หรือ House of Quality: HOQ ได้จากการนำความต้องการของผู้ใช้ที่รวบรวมได้ในข้อ 2 มากำหนดเป็น WHATs ได้แก่ การผสมวัตถุดิบให้สม่ำเสมอ การลดแรงงานและขั้นตอนการผลิต การอัดถ่านให้แน่นและมีรูปทรงคงที่ ความปลอดภัย ต้นทุนที่เหมาะสม การบำรุงรักษาง่าย และความสะดวกในการใช้งาน จากนั้นกำหนดข้อกำหนดทางวิศวกรรมเป็น HOWs จำนวน 10 รายการ ได้แก่ ความจุถังผสม รูปแบบใบกวน ความเร็วรอบเพลากวน ระบบส่งกำลัง

ช่องลำเลียงส่วนผสม รูปแบบสกรูอัด ขนาดกระบอกอัด โครงสร้างรองรับ ระบบป้องกันอันตราย และการถอดประกอบเพื่อบำรุงรักษา

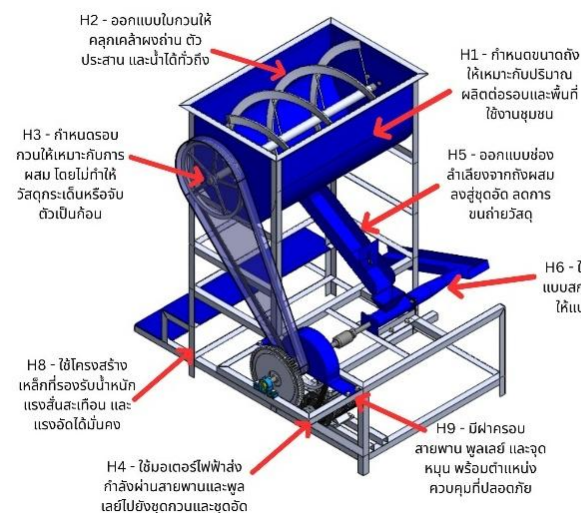
การประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง WHATs และ HOWs ใช้ระดับคะแนน 9, 3, 1 และ 0 แทนความสัมพันธ์มาก ปานกลาง น้อย และไม่มีความสัมพันธ์ ตามลำดับ จากนั้นนำค่าน้ำหนักความสำคัญของผู้ใช้ (W_i) มาคูณกับค่าความสัมพันธ์ (R_{ij}) เพื่อคำนวณคะแนนความสำคัญทางเทคนิค (T_j) ของข้อกำหนดทางวิศวกรรมแต่ละรายการ ผลการวิเคราะห์แสดงภาพที่ 1

ภาพที่ 1 ผลการจัดลำดับข้อกำหนดทางวิศวกรรมจากบ้านคุณภาพ

จากภาพที่ 1 ผลการวิเคราะห์บ้านคุณภาพพบว่า ข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญสูงสุด คือ ระบบส่งกำลัง มีคะแนน 109.40 หรือร้อยละ 18.53 รองลงมาคือ ช่องลำเลียงส่วนผสม มีคะแนน 94.55 หรือร้อยละ 16.01 รูปแบบสกรูอัด มีคะแนน 84.90 หรือร้อยละ 14.38 ระบบป้องกันอันตราย มีคะแนน 60.10 หรือร้อยละ 10.18 และรูปแบบใบกวน มีคะแนน 48.30 หรือร้อยละ 8.18 ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การออกแบบเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชนควรให้ความสำคัญกับระบบส่งกำลังที่เหมาะสม การลำเลียงส่วนผสมเข้าสู่ชุดอัดอย่างต่อเนื่อง รูปแบบสกรูอัดที่ช่วยให้ถ่านแท่งมีความแน่นและรูปทรงคงที่ ระบบป้องกันอันตรายจากชิ้นส่วนหมุน และใบกวนที่ช่วยให้ส่วนผสมมีความสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นข้อกำหนดหลักที่นำไปใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

4. ผลการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

ผลจากการจัดทำบ้านคุณภาพถูกนำมาใช้แปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน โดยกำหนดให้เครื่องต้นแบบประกอบด้วยชุดถังผสมวัตถุดิบ ชุดเพลากวนและใบกวน ระบบส่งกำลัง ช่องลำเลียงส่วนผสม ชุดอัดถ่านแท่งแนวนอน และโครงสร้างรองรับ เครื่องต้นแบบออกแบบด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ โดยกำหนดความจุถังผสม 40–60 กิโลกรัมต่อรอบ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้า ส่งกำลังผ่านสายพานและพูลเลย์ ชุดอัดเป็นแบบสกรูอัดแนวนอน ขนาดกระบอกอัด 45–60 มิลลิเมตร และกำหนดเป้าหมายกำลังการผลิตเบื้องต้น 30–50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แบบสามมิติของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชน

การสร้างเครื่องต้นแบบดำเนินการตามแบบที่กำหนด โดยเลือกใช้วัสดุและชิ้นส่วนที่จัดหาได้ง่ายในท้องถิ่น ได้แก่ เหล็กรูปพรรณ แผ่นเหล็ก เพลากวน ใบกวน ชุดสกรูอัด กระบอกอัด มอเตอร์ไฟฟ้า สายพาน พูลเลย์ ตลับลูกปืน และอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า หลังการประกอบได้ตรวจสอบแนวศูนย์ของเพลลา ความตึงสายพาน การหมุนของชุดกวนและชุดอัด และความมั่นคงของโครงสร้างก่อนเข้าสู่การทดสอบสมรรถนะ ดังแสดงในภาพที่ 3 ทั้งนี้ ก่อนนำเครื่องไปใช้งานจริงควรติดตั้งการ์ดป้องกันชุดสายพาน พูลเลย์ จุดหมุน และจุดหนีบ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานระดับชุมชน



ภาพที่ 3 เครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบที่สร้างเสร็จ

จากภาพที่ 3 เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมีโครงสร้างหลักทำจากเหล็กรูปพรรณ เพื่อรองรับน้ำหนักของถังผสม ชุดส่งกำลัง และแรงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอัด ถังผสมถูกติดตั้งบริเวณด้านบนของเครื่องเพื่อรองรับผงถ่าน ตัวประสาน และน้ำ ส่วนเพลากวนและใบกวนติดตั้งภายในถังผสมเพื่อทำหน้าที่คลุกเคล้าส่วนผสมให้สม่ำเสมอ ช่องลำเลียงถูกติดตั้งเชื่อมต่อระหว่างถังผสมกับชุดอัด เพื่อให้ส่วนผสมสามารถไหลเข้าสู่ชุดอัดได้โดยตรง ลดการขนถ่ายวัสดุด้วยแรงงานคน และช่วยให้กระบวนการผลิตมีความต่อเนื่อง

ชุดอัดถ่านแท่งแนวนอนถูกประกอบร่วมกับชุดสกรูอัดและกระบอกอัด เพื่อทำหน้าที่อัดขึ้นรูปส่วนผสมให้เป็นแท่งถ่าน ระบบส่งกำลังใช้มอเตอร์ไฟฟ้าถ่ายทอดกำลังผ่านสายพานและพูลเลย์ไปยังชุดทำงาน โดยหลังการประกอบได้ตรวจสอบแนวศูนย์ของเพล ความตึงของสายพาน การหมุนของชุดกวนและชุดอัด รวมถึงความมั่นคงของโครงสร้างก่อนเข้าสู่การทดสอบสมรรถนะ ผลการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่า ชุดกวนและชุดอัดสามารถหมุนได้ต่อเนื่อง ระบบส่งกำลังทำงานได้ตามลำดับ และโครงสร้างเครื่องมีความมั่นคงเพียงพอต่อการทดสอบการผสมและอัดถ่านแท่ง

เครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ทดสอบสมรรถนะในขั้นตอนถัดไปได้ โดยมีระบบการทำงานไม่ซับซ้อน ใช้วัสดุและชิ้นส่วนที่เหมาะสมกับบริบทชุมชน สามารถตรวจสอบและบำรุงรักษาได้สะดวก และมีองค์ประกอบครบสำหรับกระบวนการผลิตตั้งแต่การผสมวัตถุดิบจนถึงการอัดขึ้นรูปถ่านแท่ง

อย่างไรก็ตาม ในระยะการทดสอบเครื่องต้นแบบ ชุดสายพาน พูลเลย์ และจุดหมุนบางส่วนยังอยู่ในสภาพเปิดโล่งเพื่อความสะดวกในการตรวจสอบแนวศูนย์ การปรับตั้งความตึงสายพาน และการสังเกตการทำงานของระบบส่งกำลัง ก่อนนำเครื่องไปใช้งานจริงในระดับชุมชน จำเป็นต้องติดตั้งการ์ดป้องกันบริเวณชุดสายพานและพูลเลย์ จุดหมุนของเพล และจุดหนีบที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งาน โดยการติดตั้งควรมีความแข็งแรง สามารถป้องกันการสัมผัสชิ้นส่วนหมุนได้ ไม่รบกวนการทำงานของเครื่อง และสามารถถอดเปิดได้เฉพาะเมื่อต้องการตรวจสอบหรือบำรุงรักษาเครื่องภายใต้สภาวะหยุดการทำงาน

5. ผลการทดสอบสมรรถนะและค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องดำเนินการกับวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ ผงถ่านจากไม้ตะเคียน ผงถ่านจากกะลามะพร้าว และกากกาแฟแห้ง โดยกำหนดส่วนผสมต่อการทดลองหนึ่งชุดเป็นวัตถุดิบหลัก 20 กิโลกรัม แป้งมันสำปะหลัง 0.8 กิโลกรัม และน้ำ 4 ลิตร และใช้เวลาผสม 5 นาทีเท่ากันทุกสูตร ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องผสมและอัดผ่านแท่ง

วัตถุดิบ	เวลาผสม (min)	เวลาอัด (min)	น้ำหนักหลัง อัด (kg)	กำลังผลิต (kg/h)	ประสิทธิภาพ การอัด (%)	CV ส่วนผสม (%)	อัตรา แตกหัก (%)
ผงถ่านจากไม้ ตะเกียบ	5.0	23.0	23.20	49.71	93.55	4.80	4.84
ผงถ่านจาก กะลามะพร้าว	5.0	25.0	23.50	47.00	94.76	4.20	3.33
กากกาแฟแห้ง	5.0	27.5	21.90	40.43	88.31	6.80	8.70
เฉลี่ย	5.0	25.2	22.87	45.71	92.21	5.27	5.62

จากตารางที่ 5 พบว่า เครื่องต้นแบบมีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 40.43–49.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการอัด 88.31–94.76% ค่า CV ของส่วนผสม 4.20–6.80% และอัตราการแตกหัก 3.33–8.70% โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 45.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง 92.21% 5.27% และ 5.62% ตามลำดับ ซึ่งกำลังการผลิตเฉลี่ยอยู่ในช่วงเป้าหมาย 30–50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง วัตถุดิบที่ให้ผลเหมาะสมที่สุดคือผงถ่านจากกะลามะพร้าว เนื่องจากมีประสิทธิภาพการอัดสูงสุด ค่า CV ต่ำสุด และอัตราการแตกหักต่ำสุด ส่วนผงถ่านจากไม้ตะเกียบให้กำลังการผลิตสูงสุด ขณะที่กากกาแฟแห้งควรปรับอัตราส่วนผสมตัวประสานหรือน้ำเพิ่มเติมเพื่อลดอัตราการแตกหัก

การทดสอบค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งดำเนินการด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ตามมาตรฐาน ASTM D5865 จำนวน 3 ตัวอย่างต่อสูตร ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อสูตร

วัตถุดิบ	Sample 1 (J/g)	Sample 2 (J/g)	Sample 3 (J/g)	Mean ± SD (J/g)	Mean ± SD (cal/g)	Mean ± SD (MJ/kg)
ผงถ่านจากไม้ ตะเกียบ	22,890.19	23,140.30	21,182.40	22,404.30 ± 1,065.56	5,354.76 ± 254.67	22.40 ± 1.07
ผงถ่านจาก กะลามะพร้าว	23,248.57	23,038.21	23,193.11	23,159.96 ± 109.03	5,535.36 ± 26.06	23.16 ± 0.11
กากกาแฟแห้ง	19,508.73	19,742.77	19,503.27	19,584.92 ± 136.73	4,680.91 ± 32.68	19.58 ± 0.14

จากตารางที่ 6 พบว่า ถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวให้ค่าความร้อนเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ $23,159.96 \pm 109.03$ J/g หรือ $5,535.36 \pm 26.06$ cal/g รองลงมาคือถ่านอัดแท่งจากผงถ่านไม้ตะเกียบ มีค่าความร้อนเฉลี่ย $22,404.30 \pm 1,065.56$ J/g หรือ $5,354.76 \pm 254.67$ cal/g เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง มพช. 238/2547 ซึ่งกำหนดค่าความร้อนไม่น้อยกว่า 5,000 cal/g พบว่าถ่านอัดแท่งทั้งสองชนิดมีค่าความร้อนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ขณะที่ถ่านอัดแท่งจากกากกาแฟแห้งมีค่าความร้อนเฉลี่ย $19,584.92 \pm 136.73$ J/g หรือ $4,680.91 \pm 32.68$ cal/g ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

พบว่าค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F = 27.40, p = 0.00096$) และเมื่อเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธี Tukey's HSD พบว่า ถ่านอัดแท่งจากกากกาแฟแห้งมีค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเคียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเคียบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

6. ผลต้นทุนการสร้างเครื่องต้นแบบ

เพื่อประเมินความเหมาะสมด้านต้นทุนของเครื่องต้นแบบต่อการนำไปใช้จริงในระดับชุมชน ผู้วิจัยได้สรุปต้นทุนวัสดุ อุปกรณ์ ระบบส่งกำลัง ระบบควบคุม และค่าแรงประกอบ โดยจัดกลุ่มรายการต้นทุนเป็นหมวดหลักเพื่อลดความซ้ำซ้อนของรายละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ต้นทุนโดยสรุปของการสร้างเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบ

รายการต้นทุน	รายละเอียดโดยสรุป	จำนวนเงิน (บาท)
วัสดุโครงสร้างและชุดผสม	เหล็กรูปพรรณ แผ่นเหล็ก ถังผสม เพลากวน ใบกวน โครงรองรับ และล้อเลื่อน	8,000
ชุดอัดและช่องลำเลียงส่วนผสม	สกรูอัด กระบอกอัด หัวอัด ช่องลำเลียง และชิ้นส่วนประกอบชุดอัด	5,600
ระบบส่งกำลัง ระบบควบคุม และความปลอดภัย	มอเตอร์ไฟฟ้า 2 แรงม้า สายพาน พูลเลย์ เฟลา ตลับลูกปืน ตัวควบคุม สวิตช์ เบรกเกอร์ สายไฟ และ ฝาครอบป้องกัน	8,500
ค่าแรงประกอบและวัสดุสิ้นเปลือง	งานตัด เชื่อม เจาะ ประกอบ สี ลวดเชื่อม ใบตัด และอุปกรณ์สิ้นเปลือง	3,400
รวมต้นทุนการสร้างเครื่องต้นแบบ		25,500

จากตารางที่ 7 พบว่า เครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบมีต้นทุนการสร้างรวมประมาณ 25,500 บาท โดยต้นทุนหลักอยู่ที่ระบบส่งกำลัง ระบบควบคุม ชุดผสม และชุดอัด ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตความปลอดภัย และคุณภาพการอัดขึ้นรูป ทั้งนี้ ต้นทุนดังกล่าวอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับเครื่องต้นแบบระดับชุมชนเนื่องจากใช้วัสดุและชิ้นส่วนมาตรฐานที่สามารถจัดหาและซ่อมบำรุงได้ในท้องถิ่น

7. ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

หลังจากทดสอบสมรรถนะของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งต้นแบบ ผู้วิจัยประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจากกลุ่มผู้ผลิตถ่านแท่งหรือผู้ใช้งานในชุมชน จำนวน 20 คน โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ผลการประเมินพบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมต่อเครื่องต้นแบบอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 4.53 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์เป้าหมายที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 3.50 รายการที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ได้แก่ ความเหมาะสมต่อการใช้งานระดับชุมชน มีค่าเฉลี่ย 4.70 รองลงมาคือ ความสม่ำเสมอของการผสมวัตถุดิบ มีค่าเฉลี่ย 4.65 และความสามารถในการอัดขึ้นรูปถ่านแท่ง มีค่าเฉลี่ย 4.60 สะท้อนว่าเครื่องต้นแบบสามารถตอบสนองความต้องการหลักของผู้ใช้ในการใช้งานจริง การผสมวัตถุดิบ และการอัดขึ้นรูปได้ดี อย่างไรก็ตาม รายการที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่ารายการอื่น คือ ความสะดวกในการทำความสะดวก มีค่าเฉลี่ย 4.35 และความสะดวกในการบำรุงรักษา มีค่าเฉลี่ย 4.40 แม้ยังอยู่ในระดับมาก แต่ควรปรับปรุงตำแหน่ง

ช่องเปิด จุดถอดประกอบ และคู่มือการทำความสะอาดหรือบำรุงรักษาให้ชัดเจนยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานระยะยาว

8. อภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้เทคนิค QFD สามารถแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรมของเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งได้อย่างเป็นระบบ โดยข้อกำหนดสำคัญ ได้แก่ ระบบส่งกำลัง ช่องลำเลียงส่วนผสม รูปแบบสกรูอัด ระบบป้องกันอันตราย และรูปแบบใบกวน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้ QFD ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องจักรต้นแบบ โดยสามารถแปลงความต้องการของผู้ใช้ให้เป็นข้อกำหนดทางเทคนิคที่นำไปใช้กำหนดรูปแบบโครงสร้าง และองค์ประกอบของเครื่องได้อย่างเป็นระบบ [6, 8] เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรวมกระบวนการผสม การลำเลียง และการอัดขึ้นรูปไว้ในเครื่องเดียว จึงช่วยลดการขนถ่ายวัสดุ ลดแรงงาน และเพิ่มความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยด้านการสร้างเครื่องอัดถ่านแท่งและการประเมินประสิทธิภาพการผลิตถ่านอัดแท่ง ซึ่งมุ่งเน้นกำลังการผลิต ประสิทธิภาพการอัด และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [5, 9] งานวิจัยนี้มีจุดเด่นที่การบูรณาการชุดผสมและชุดอัดให้เหมาะสมกับการใช้งานระดับชุมชน

ด้านสมรรถนะและคุณภาพผลิตภัณฑ์ เครื่องต้นแบบมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 45.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการอัดเฉลี่ย 92.21% ค่า CV ของส่วนผสมเฉลี่ย 5.27% และอัตราการแตกหักเฉลี่ย 5.62% โดยถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวให้ผลเหมาะสมที่สุด ส่วนผงถ่านไม้ตะเกียบให้กำลังการผลิตสูงสุด ขณะที่กากกาแฟแห้งมีข้อจำกัดด้านการอัดขึ้นรูปและค่าความร้อน เนื่องจากมีอนุภาคละเอียด ดูดซับน้ำ และจับตัวเป็นก้อนได้ง่าย จึงควรปรับสัดส่วนตัวประสานปริมาณน้ำ หรือใช้ร่วมกับผงถ่านชนิดอื่น แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่พัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านจากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าลักษณะของวัตถุดิบและกระบวนการอัดมีผลต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ [10] เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มผช. 238/2547 พบว่าถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเกียบมีค่าความร้อนผ่านเกณฑ์ ส่วนกากกาแฟแห้งต่ำกว่าเกณฑ์ จึงควรปรับสูตรส่วนผสมหรือใช้เป็นวัตถุดิบเสริมร่วมกับผงถ่านชนิดอื่น [11] ทั้งนี้ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยระดับนานาชาติที่รายงานว่า ชนิดของชีวมวล ขนาดอนุภาค และตัวประสานมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง [3, 12] นอกจากนี้ ผลความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด สะท้อนว่าเครื่องต้นแบบเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในชุมชน อย่างไรก็ตาม ควรปรับปรุงความสะดวกในการทำความสะดวก การบำรุงรักษา และติดตั้งการป้องกันชิ้นส่วนหมุนก่อนนำไปใช้งานจริง

9. สรุปผล

การวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมและอัดถ่านแท่งระดับชุมชนโดยประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เพื่อแปลงความต้องการของผู้ใช้เป็นข้อกำหนดทางวิศวกรรม เครื่องต้นแบบสามารถรวมกระบวนการผสม การลำเลียง และการอัดขึ้นรูปไว้ในเครื่องเดียว ผลการทดสอบพบว่าเครื่องมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 45.71 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการอัดเฉลี่ย 92.21% ค่า CV ของส่วนผสมเฉลี่ย 5.27% และอัตราการแตกหักเฉลี่ย 5.62% ถ่านอัดแท่งจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านไม้ตะเกียบมีค่าความร้อนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มผช. 238/2547 ขณะที่กากกาแฟแห้งควรปรับสูตรหรือใช้เป็นวัตถุดิบเสริม ผลการประเมินความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 4.53 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 แสดงว่าเครื่องต้นแบบมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในระดับชุมชน

เอกสารอ้างอิง

1. น้ำอ้อย ปัญญา, นภาพัสส์ คุ่มกลาง. การผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ (กากโหระพา) ในอุตสาหกรรมเครื่องหอม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2568; 44(2): 172-180. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/261803>
2. จุฑาพล จำปาแถม, ลำพูน เหลลาราช, ภิตินันท์ อารยางกูร, สุรสิงห์ อารยางค์กูร. การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมและสมบัติถ่านอัดแท่งจากไม้ไผ่. วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี. 2565; 3(3): 81-93. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/atj/article/view/256174>
3. J. Yirijor, A. A. T. Bere. Production and characterization of coconut shell charcoal-based bio-briquettes as an alternative energy source for rural communities. Heliyon, 2024; 10(16); e35717. doi:10.1016/j.heliyon. 2024.e35717
4. ปกรณ์ อุ๋นไธสง, รชต มณีโชติ. การสร้างเครื่องและหาประสิทธิภาพถ่านอัดแท่งจากฝักราชพฤกษ์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. 2562; 7(2): 147-157. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/scudru/article/view/191134>
5. กันญา โกสุมภ์, กฤษณพงศ์ ชาดัน, กฤษณพงศ์ วังหอม, สหสวรรณ มั่นหมาย. การออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านอัดโนมัติควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกส์คอนโทรลเลอร์. วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2566; 16(1): 38-50. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/250866>
6. สร้อยจีน จิตรมั่น, ฐิติพร ชัยบ้านกุด, ภัทรณีย์ แจ่มใส, บัญชา อริยะจรรยา, โรสมารินทร์ สุขเกษม, ฤกษ์วัลย์ จันทร์สา. การพัฒนาเครื่องเลื่อยกระบอกไม้ไผ่ด้วยหลักการยศาสตร์และเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2564; 28(2): 100-115. 2564. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/EngJCMU/article/view/244904>
7. ขวัญชัย เสวีนันท์, นิตยา ศิริวัน, วรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์. การออกแบบและพัฒนาเครื่องยิงพาลเท. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 2567; 20(1): 186-200. doi:10.14416/j.ind.tech.2024.04.013
8. ทรงวุฒิ เอกภูมิจวงศา, สมชาย เซะวิเศษ. การศึกษาและประเมินการออกแบบเพื่อพัฒนาเครื่องแปรรูปขี้เถ้าเป็นดินเทียมสำหรับเกษตรอินทรีย์: โดยใช้การจำแนกวิเคราะห์การแปลงหน้าที่ผลิตภัณฑ์เชิงคุณภาพให้เป็นแนวปฏิบัติ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2560; 5(2): 15-28. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/252105>
9. กฤษณ์ชาคริตส วัฒนประเสริฐ, กุสุมา ผลาพรหม. การพัฒนาดันแบบเครื่องอัดถ่านแท่งระบบอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ของชุมชนบ้านนาโสม อำเภอยะบะดี จังหวัดลพบุรี. วารสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2569; 13(1): 211-219. <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/JMND/article/view/295615>
10. พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น. การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย็นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชนและการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์บูรณาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมประยุกต์. 2559; 9(1): 34-48. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/lttech/article/view/58548>
11. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง มผช. 238/2547. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps238_47.pdf

12. M. Lubwama, V. A. Yiga, F. Muhairwe, J. Kihedu. Physical and combustion properties of agricultural residue bio-char bio-composite briquettes as sustainable domestic energy sources. Renewable Energy. 2020: 148; 1002-1016. doi:10.1016/j.renene.2019.10.085