การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าว โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ
Study on the Optimal Factors for Briquetting Charcoal from Coconut Shells Using a Full Factorial Experimental Design

ยศวัจน์ ชีววรนนท์ตรี[1*] กฤดิธฤต ทองสิน[1] และปิยะ รนต์ละออง[2]
Yossawat Cheewaworanontree[1*], Kridtharit Thongsin[1] and Piya Rontlaong[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าว โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k full factorial design) ซึ่งสร้างเครื่องอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าว โดยมีขนาดความกว้าง 60 เซนติเมตร ความยาว 66 เซนติเมตร และความสูง 149 เซนติเมตร เป็นระบบส่งกำลังกึ่งอัตโนมัติ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากำลัง 7.5 แรงม้า ไฟฟ้า 380 โวลต์ โดยมีมูเลย์ขับ 3.5 นิ้ว และมูเลย์ตาม 21 นิ้ว และได้ออกแบบการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว 30-32 เซนติเมตร ขนาดกระบอกอัด 45-47 มิลลิเมตร และความเร็วรอบมอเตอร์ 254-267 รอบต่อนาที โดยการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง ครั้งละ 30 ตัวอย่าง รวมจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 24 การทดลอง ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่เหมาะสมในการอัดถ่านแท่ง คือ ความยาวสกรูเกลียว 30 เซนติเมตร ขนาดกระบอกอัด 45 มิลลิเมตร และความเร็วรอบมอเตอร์ 254 รอบต่อนาที จากนั้นนำปัจจัยที่เหมาะสมไปทดลองเก็บข้อมูลอีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปัจจัยการทดลอง พบว่าก่อนการทดลองจำนวนการอัดถ่านแท่งเกิดการแตกหักหรืออัดไม่แน่นจำนวน 19 ก้อน คิดเป็นร้อยละ 21.10 และหลังการทดลองจำนวนการอัดถ่านแท่งเกิดการแตกหักหรืออัดไม่แน่นจำนวน 8 ก้อน คิดเป็นร้อยละ 8.90 ลดลงจากเดิม 11 ก้อน คิดเป็นร้อยละ 57.89

[1] สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการโซ่อุปทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

[1] Department of Industrial Management (Continuing Program), Faculty of Engineering and Industrial Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

[2] Department of Industrial Engineering and Supply Chain Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

[*] Corresponding author e-mail: yossawat.ch@bsru.ac.th

DOI: https://doi.org/10.65217/wichchajnstru.2026.v45i1.265278

Received: 11 November 2024, Revised: 25 March 2025, Accepted: 2 April 2025

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง ถ่านอัดแท่ง กะลามะพร้าว เครื่องอัดถ่าน

Abstract

This research aimed to investigate the optimal factors for compressing coconut shell charcoal briquettes using a full factorial design (2^k full factorial design). A coconut shell charcoal briquette compressing machine was developed with a width of 60 cm, a length of 66 cm, and a height of 149 cm. The machine employed a semi-automatic power transmission system driven by a 7.5-horsepower electric motor (380 V), equipped with a 3.5-inch drive pulley and a 21-inch driven pulley. The experimental design consisted of three factors: screw length (30-32 cm), compression cylinder size (45-47 mm), and motor speed (254-267 rpm). The experiment was repeated three times with 30 samples per trial, resulting in a total of 24 experimental runs. The results indicated that the optimal conditions for briquette compression were a screw length of 30 cm, a compression cylinder size of 45 mm, and a motor speed of 254 rpm. These optimal factors were subsequently applied in an additional experiment to collect comparative data. The results showed that, prior to optimization, 19 briquettes (21.10%) were broken or insufficiently compacted, whereas after optimization the number decreased to 8 briquettes (8.90%), representing a reduction of 11 briquettes (57.89%).

Keywords: Design of experiment, Charcoal, Coconut shell, Charcoal press

บทนำ

ในปัจจุบันการใช้พลังงานทางเลือกเป็นประเด็นสำคัญระดับโลก เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทวีความรุนแรงขึ้นจากการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ไม่ว่าจะเป็นภาวะโลกร้อน มลพิษทางอากาศ หรือทรัพยากรธรรมชาติที่ลดลง เพื่อรับมือกับปัญหาดังกล่าวพร้อมผลักดันให้ประเทศต่าง ๆ รวมถึงประเทศกำลังพัฒนาจัดทำแผนและยุทธศาสตร์มุ่งสู่สังคมคาร์บอนต่ำ (low carbon society) ประเทศไทยเองก็ตระหนักถึงความสำคัญของปัญหานี้ โดยได้แสดงเจตจำนงในการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกผ่านการลงนามในที่ประชุมภาคีอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ครั้งที่ 21 (conference of the parties: COP21) ซึ่งกำหนดเป้าหมายลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 20 ภายในปี พ.ศ. 2573 (กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม, 2567; อำนาจ และคณะ, 2565) แนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหานี้คือการพัฒนาและส่งเสริมพลังงานทดแทน โดยเฉพาะพลังงานชีวมวล ซึ่งสามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานฟอสซิล เช่น ปิโตรเลียม ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต

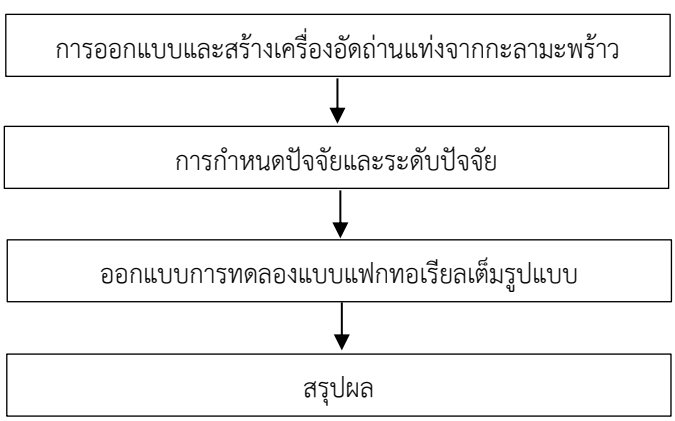
จังหวัดสมุทรสาครเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาพลังงานชีวมวล เนื่องจากเป็นศูนย์กลางอุตสาหกรรมอาหารทะเลและเกษตรกรรม โดยเฉพาะมะพร้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีจำนวนผลผลิตรวมมากที่สุดเมื่อเทียบกับพืชเศรษฐกิจอื่น ๆ โดยในเดือนมกราคม พ.ศ. 2567 พบว่ามีเกษตรกรที่ทำการเกษตรมะพร้าวน้ำหอมจำนวน 181 ราย มะพร้าวน้ำหอมบ้านแพ้ว มีพื้นที่เพาะปลูกครอบคลุม 3 อำเภอ จำนวน 20,972 ไร่ ปริมาณผลผลิต 102 ล้านผล (ผลผลิตเฉลี่ย 480 ผลต่อไร่) จากปริมาณผลผลิตดังกล่าวที่มีจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดของเสียทางเกษตรกรรมจำนวนมาก หนึ่งในวัตถุดิบที่เหลือใช้คือกะลามะพร้าว ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพลังงานชีวมวล โดยเฉพาะการผลิตถ่านอัดแท่ง นอกจากจะช่วยลดปัญหาขยะทางเกษตรกรรมแล้ว ยังสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจ และสนับสนุนการพัฒนาสู่สังคมคาร์บอนต่ำได้อีกด้วย ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมาก (อำนวย และคณะ, 2562; ประสิทธิ์ และนรงค์, 2565; รัชฌาธร และจารุวรรณ, 2565; กิตติชาติ และคณะ, 2566; นัฐวุฒิ และคณะ, 2566) ที่ศึกษาการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นถ่านอัดแท่ง โดยถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวมีข้อดีหลายประการ เช่น การให้ค่าความร้อนสูง เผาไหม้สะอาด และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าถ่านไม้ทั่วไป นอกจากนี้การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อปรับปรุงคุณภาพของถ่านอัดแท่งยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถแข่งขันในตลาดพลังงานทางเลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้การผลิตถ่านอัดแท่งมีประสิทธิภาพและตรงตามมาตรฐาน จำเป็นต้องมีการศึกษาการออกแบบทางวิทยาศาสตร์และเทคนิคทางวิศวกรรม เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในปัจจุบันชุมชนชาวจังหวัดสมุทรสาครได้นำเศษเปลือกมะพร้าวที่เหลือใช้โดยส่วนที่เป็นกะลามะพร้าวมาเพิ่มมูลค่าโดยนำมาบดและอัดขึ้นรูปเป็นถ่านแท่งที่ได้จากกะลามะพร้าวเพื่อนำไปจำหน่ายให้มีรายได้เพิ่มขึ้น แต่ด้วยเครื่องอัดถ่านแท่งที่มีอยู่มีการชำรุดและไม่ได้มาตรฐานทำให้กระบวนการอัดถ่านแท่งเกิดการแตกหักเสียหายจำนวนมากจึงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตถ่านอัดแท่ง (ยศวัจน์ และคณะ, 2566)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว โดยใช้แนวทางการออกแบบการทดลอง (design of experiments: DOE) โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางวิศวกรรมช่วยในการออกแบบการทดลอง (ยศวรรธน์ และนรัตว์, 2565) โดยในปัจจุบันการออกแบบการทดลองถูกนำมาใช้กันในการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ และศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ โดยมีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง เช่น การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลเถ้าชานอ้อยต่อความแข็งแรงอัดในการขึ้นรูปคอนกรีต (ณัฐพงษ์, 2565) การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแกะสลักสีด้วยเลเซอร์ (ศุภัทร และคณะ, 2567) การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตอุปกรณ์เช็คระดับน้ำมัน (ศุภัทร และจิรวัฒน์, 2567) การประยุกต์ใช้หลักการซิกซ์ซิกม่า (six sigma) เพื่อลดสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกาหนดในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่ม (เกวลิน และคณะ, 2567) จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าเทคนิคการออกแบบการทดลองมีความเหมาะสมกับการศึกษาระดับของปัจจัยที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามคุณลักษณะที่กำหนด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k full factorial design) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (optimization) ของระดับของปัจจัยในกระบวนการอัดแท่งถ่านจากกะลามะพร้าว ซึ่งประกอบด้วยความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด

และความเร็วรอบมอเตอร์ เพื่อให้แท่งถ่านเมื่อผ่านกระบวนการอัดแท่งมีการจับตัวเป็นก้อนได้ดี แข็งแรง ได้มาตรฐาน ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูง ตอบโจทย์การใช้งานในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม ตลอดจนส่งเสริมการใช้พลังงานทางเลือกในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศ อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าและสร้างรายได้ให้กับชุมชน (เสริมศักดิ์, 2561) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญทั้งในเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติ โดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อยกระดับอุตสาหกรรมพลังงานชีวมวลผลิตถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวให้มีคุณภาพที่สูงขึ้น ได้มาตรฐานและสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจให้กับชุมชนผ่านการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยผลักดันให้จังหวัดสมุทรสาครก้าวไปสู่การเป็นต้นแบบของการใช้พลังงานสะอาดและยั่งยืนในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การออกแบบเครื่องอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าว (2) การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัย และ (3) ออกแบบและวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สามารถอธิบายเป็นแผนผังแสดงเป็นลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (Montgomery, 2017) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

1. การออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าว

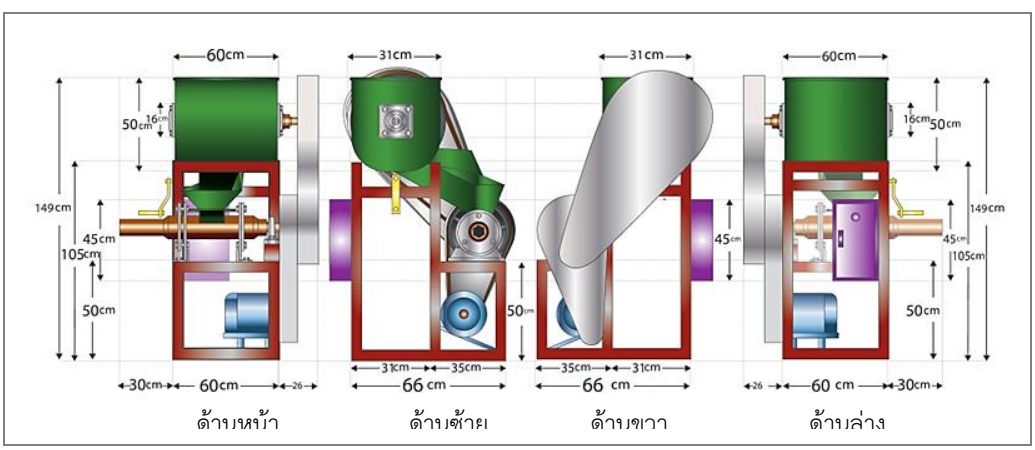
สำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าว แสดงดังภาพที่ 2 คณะผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลเพื่อสร้างเครื่องอัดถ่านแท่ง เพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูปผลิตถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว โดยคำนึงถึงหลักการดังต่อไปนี้

1.1 ขนาดของเครื่องอัดถ่านแท่ง

เพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูปผลิตถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าว โดยมีขนาดความกว้าง 60 เซนติเมตร ความยาว 66 เซนติเมตร และความสูง 149 เซนติเมตร

1.2 ชนิดของวัสดุ อุปกรณ์ และระบบความปลอดภัยที่นำมาใช้ในการสร้างเครื่องอัดถ่านแท่ง

วัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องอัดถ่านแท่งประกอบด้วยเหล็กแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร และเหล็กฉากขนาด 2 นิ้ว หนา 4 มิลลิเมตร ระบบส่งกำลังเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากำลัง 7.5 แรงม้า (5.5 กิโลวัตต์) ใช้ไฟฟ้า 380 โวลต์ มีมูเลย์ขับขนาด 3.5 นิ้ว และมูเลย์ตามขนาด 21 นิ้ว นอกจากนี้มีระบบวงจรไฟฟ้าสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่อง และติดตั้งระบบความปลอดภัยของเครื่องอัดถ่านแท่งเป็นสวิตช์นิรภัย (safety switch) จำนวน 1 จุด ได้แก่ สวิตช์หยุดการทำงานฉุกเฉิน (emergency stop switch) เพื่อใช้หยุดการทำงานในกรณีฉุกเฉินหรือเมื่อเครื่องเกิดความขัดข้องระหว่างการทำงาน



ภาพที่ 2 เครื่องอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าว (หน่วย: เซนติเมตร)

2. การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัย

การกำหนดปัจจัย (factor) ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง คณะผู้วิจัยได้ทำการระดมสมองในการกำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อการอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าว ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด และความเร็วรอบมอเตอร์ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการอัดแท่งถ่านจากกะลามะพร้าว และผลตอบสนองต่อการทดลอง คือ จำนวนถ่านแท่งที่แตกหัก โดยปัจจัยและระดับของปัจจัย (level) ที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	
	ต่ำ (-)	สูง (+)
ความยาวสกรูเกลียว (เซนติเมตร)	30	32
ขนาดกระบอกอัด (มิลลิเมตร)	45	47
ความเร็วรอบมอเตอร์ (รอบต่อนาที)	254	267

เหตุผลในการเลือกใช้ค่าความยาวสกรูเกลียว เท่ากับ 30 และ 32 เซนติเมตร เนื่องจากในคำแนะนำของผู้ใช้งาน พบว่าถ้าความยาวสกรูเกลียวมีความยาวต่ำหรือเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดจะส่งผลให้ถ่านอัดแท่งเกิดการเปราะและแตกหักง่าย และในทำนองเดียวกันถ้าขนาดกระบอกอัดมีขนาดไม่ตรงตามที่กำหนดระหว่าง 45 ถึง 47 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ถ่านอัดแท่งไม่แน่น และแตกหักและสุดท้ายความเร็วรอบมอเตอร์ที่กำหนด คือ 254 และ 267 รอบต่อนาที โดยถ้าความเร็วรอบมีความเร็วไม่ตรงตามที่กำหนด ก็จะส่งผลให้ถ่านอัดแท่งไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแท่งตามที่ต้องการได้

3. ออกแบบการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลอง คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองแก้ไขปัญหาโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเข้ามาประยุกต์เพื่อหาปัจจัยในการทดลองที่เหมาะสม ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด และความเร็วรอบมอเตอร์ โดยมีตัวแปรตอบสนองต่อการทดลอง คือ จำนวนถ่านแท่งที่แตกหัก ซึ่งในการออกแบบการทดลองนี้คณะผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยเป็นการออกแบบการทดลองในกรณีมีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณหรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำ ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยหลักที่สนใจแล้วยังทำให้ทราบปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ (interaction) โดยขั้นตอนของการออกแบบการทดลองโดยกำหนดปัญหา เลือกตัวแปรที่ใช้ชี้วัด กำหนดปัจจัย ออกแบบการทดลอง วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผล (เกวลิน และคณะ, 2567)

ผลการวิจัย

1. การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

คณะผู้วิจัยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยกำหนดจำนวนปัจจัย ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด และความเร็วรอบมอเตอร์ ทำการทดลองซ้ำตัวอย่างจำนวน 3 ครั้ง รวมจำนวนทั้งสิ้น 24 การทดลอง (ศุภัทร และคณะ, 2566) และผลลัพธ์ (response) ที่ได้จากแต่ละรูปแบบการทดลอง คือ จำนวนแท่งถ่านจากการอัดที่เกิดการแตกหักหรืออัดไม่แน่นที่เกิดขึ้น โดยรูปแบบการทดลองเป็นแบบสุ่ม แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองและค่าผลลัพธ์จากการทดลอง

มาตรฐานของการทดลอง	ลำดับที่	ปัจจัย			ค่าผลลัพธ์
		ความยาวสกรูเกลียว (เซนติเมตร)	ขนาดกระบอกอัด (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบมอเตอร์ (รอบต่อนาที)	
14	1	32	45	267	14
5	2	30	45	267	13
15	3	30	47	267	15
21	4	30	45	267	12
20	5	32	47	254	27

ตารางที่ 2 (ต่อ)

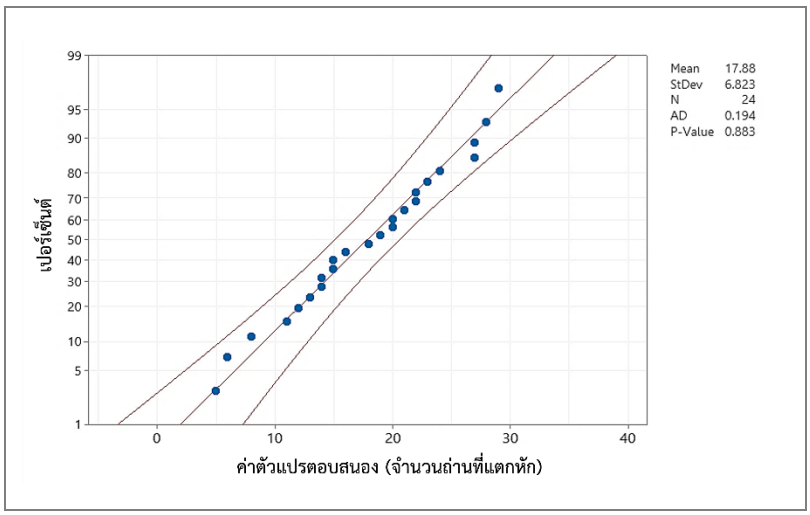
มาตรฐานของการทดลอง	ลำดับที่	ปัจจัย			ค่าผลลัพธ์
		ความยาวสกรูเกลียว (เซนติเมตร)	ขนาดกระบอกอัด (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบมอเตอร์ (รอบต่อนาที)	
22	6	32	45	267	15
10	7	32	45	254	21
17	8	30	45	254	5
4	9	32	47	254	28
19	10	30	47	254	24
16	11	32	47	267	20
6	12	32	45	267	14
13	13	30	45	267	11
24	14	32	47	267	23
7	15	30	47	267	16
23	16	30	47	267	20
18	17	32	45	254	19
2	18	32	45	254	18
11	19	30	47	254	22
8	20	32	47	267	22
9	21	30	45	254	6
1	22	30	45	254	8
3	23	30	47	254	27
12	24	32	47	254	29

2. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

สำหรับในการวิเคราะห์ผลข้อมูลการทดลองคณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าส่วนตกค้าง (residual) ของข้อมูลจากแบบจำลองการถดถอย โดยการตรวจสอบประกอบไปด้วยขั้นตอนทั้งหมด 3 ขั้นตอน

2.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล

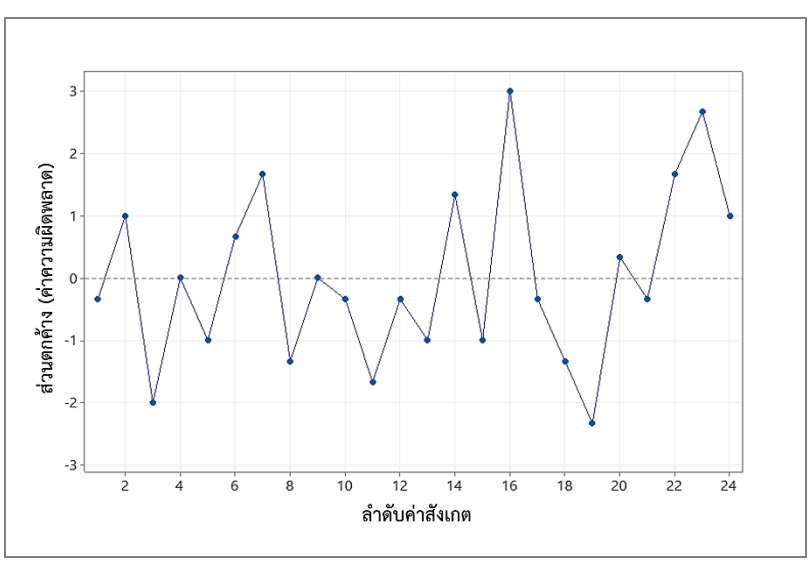
จากการพิจารณาแผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง เพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (normal distribution) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 3 และมีค่า *p-value* เท่ากับ 0.883 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ (α = 0.05) (ศุภกิจ และคณะ, 2567) จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง

2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

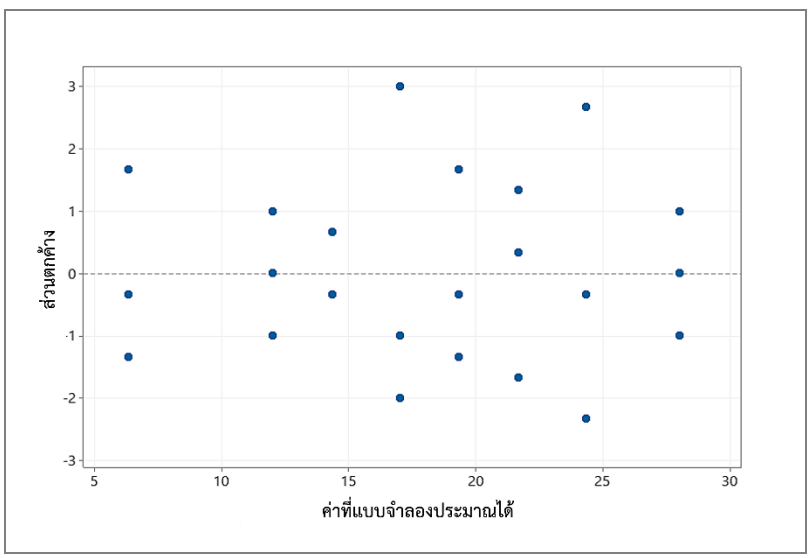
จากการพิจารณาแผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (independently distributed) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวเป็นรูปแบบอิสระ แสดงดังภาพที่ 4 เนื่องจากการกระจายตัวไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลอง

2.3 การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

จากการพิจารณาแผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าของตัวแปรตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย (fitted value) เนื่องจากการกระจายตัวไม่มีลักษณะที่เป็นรูปแบบหรือโครงสร้างใด ๆ จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (constant variance) อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แผนภาพการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าที่แบบจำลองประมาณได้

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3 4 และ 5 พบว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้างเป็นไปตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ จึงกล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและเหมาะสม และสามารถนำข้อมูลนี้ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไปได้

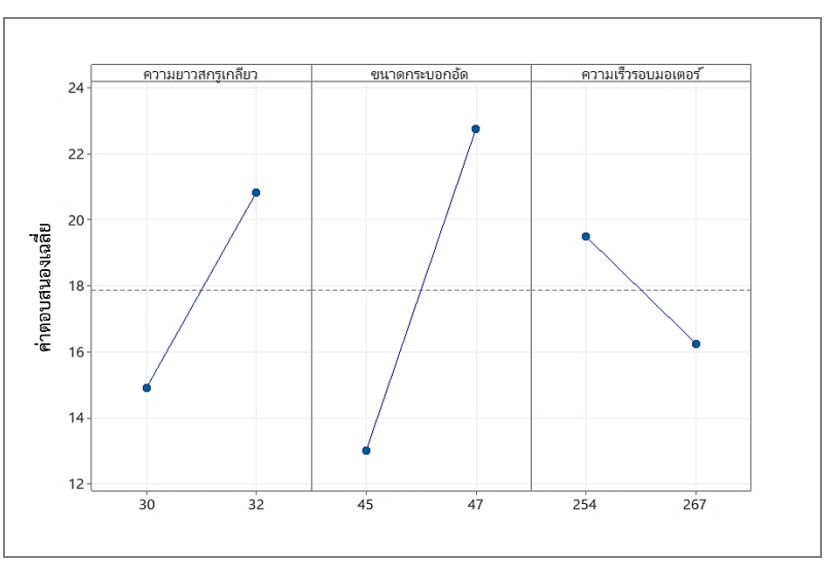
3. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบโดยกำหนดจำนวนปัจจัย ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด และความเร็วรอบมอเตอร์ (รอบต่อนาที) ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง มีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 24 การทดลอง แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลอง

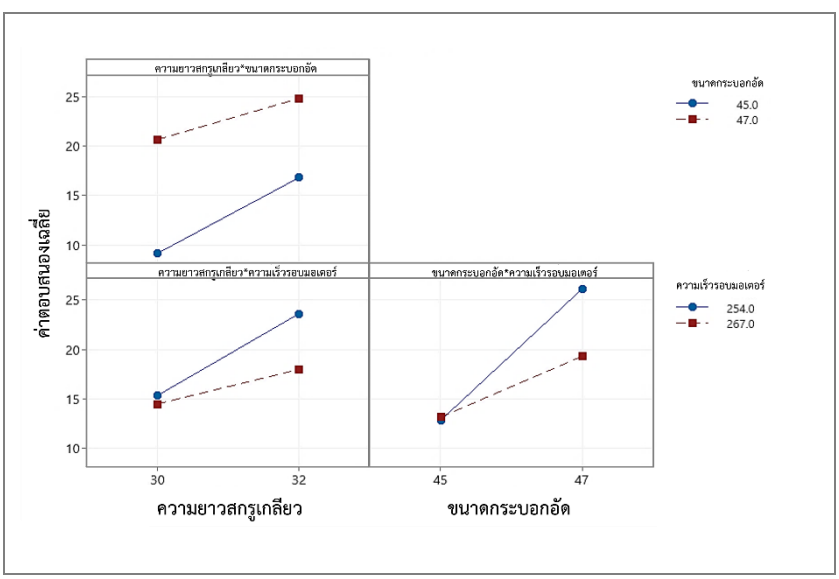
การปรับแบบจำลองแฟกทอเรียล: ตัวแปรตอบสนองเทียบกับความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด ความเร็วรอบมอเตอร์					
ค่าประมาณผลกระทบและค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรตอบสนอง (หน่วยเข้ารหัส)					
ตัวแปรต่อปัจจัย	**ผลกระทบ**	**Coef**	**SE Coef**	**T**	***p-value***
ความยาวสกรูเกลียว (เซนติเมตร)	5.917	2.958	0.344	8.61	0.000
ขนาดกระบอกอัด (มิลลิเมตร)	9.750	4.875	0.344	14.19	0.000
ความเร็วรอบมอเตอร์ (รอบต่อนาที)	-3.250	-1.625	0.344	-4.73	0.000
ความยาวสกรูเกลียว*ขนาดกระบอกอัด	-1.750	-0.875	0.344	-2.55	0.022
ความยาวสกรูเกลียว*ความเร็วรอบมอเตอร์	-2.417	-1.208	0.344	-3.52	0.003
ขนาดกระบอกอัด*ความเร็วรอบมอเตอร์	-3.583	-1.792	0.344	-5.21	0.000
ความยาวสกรูเกลียว*ขนาดกระบอกอัด* ความเร็วรอบมอเตอร์	2.917	1.458	0.344	4.24	0.001
S = 1.68	R-Sq = 95.77%		R-Sq (adj) = 93.91%		

จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดแตกหักหรืออัดไม่แน่น พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเกิดแตกหักหรืออัดไม่แน่นจากการอัดแท่งถ่านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (*p-value* < 0.05) ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด และความเร็วรอบมอเตอร์ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (บุญชัย และณัฐธยาน์, 2559) สามารถแสดงเป็นแผนภาพของอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบที่ทำให้เกิดการแตกหักหรืออัดไม่แน่นจากการอัดถ่านแท่งแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กราฟแสดงลักษณะอิทธิพลของปัจจัยหลัก

จากภาพที่ 6 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการแตกหักหรือการอัดไม่แน่นของถ่านแท่ง พบว่า (1) ความยาวสกรูเกลียว มีแนวโน้มเส้นกราฟชันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อความยาวสกรูเกลียวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การเกิดการแตกหักหรือการอัดไม่แน่นของถ่านแท่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (2) ขนาดกระบอกอัด มีแนวโน้มเส้นกราฟชันเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่มขนาดกระบอกอัดส่งผลให้การเกิดการแตกหักหรือการอัดไม่แน่นของถ่านแท่งเพิ่มขึ้น และ (3) ความเร็วรอบมอเตอร์ มีแนวโน้มเส้นกราฟชันลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบมอเตอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การเกิดการแตกหักหรือการอัดไม่แน่นของถ่านแท่งลดลง หรือกล่าวได้ว่าถ่านแท่งมีความแน่นและความสมบูรณ์มากขึ้น

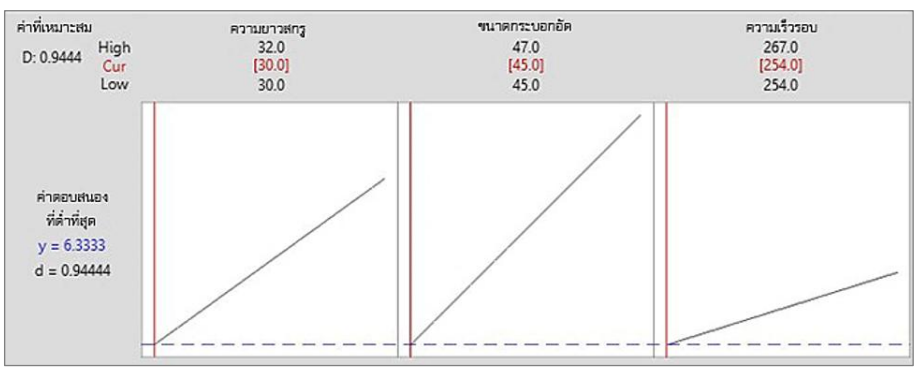


ภาพที่ 7 กราฟแสดงลักษณะอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบร่วม

จากภาพที่ 7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยทั้งสาม พบว่า (1) ความยาวสกรูเกลียวและขนาดกระบอกอัด มีอิทธิพลร่วมกัน โดยเมื่อกำหนดความยาวสกรูเกลียวเท่ากับ 30 เซนติเมตร และขนาดกระบอกอัดเท่ากับ 45 มิลลิเมตร จะส่งผลให้การอัดถ่านแท่งมีการแตกหักหรือการอัดไม่แน่นลดลง (2) ความยาวสกรูเกลียวและความเร็วรอบมอเตอร์ มีอิทธิพลร่วมกัน โดยเมื่อใช้ความยาวสกรูเกลียว 30 เซนติเมตร ร่วมกับความเร็วรอบมอเตอร์ 254 รอบต่อนาที ส่งผลให้การเกิดการแตกหักหรือการอัดไม่แน่นของถ่านแท่งลดลง และ (3) ขนาดกระบอกอัดและความเร็วรอบมอเตอร์ มีอิทธิพลร่วมกัน โดยเมื่อใช้ขนาดกระบอกอัด 45 มิลลิเมตร ร่วมกับความเร็วรอบมอเตอร์ 254 รอบต่อนาที จะช่วยลดการเกิดการแตกหักหรือการอัดไม่แน่นของถ่านแท่งได้อย่างชัดเจน

จากการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าวโดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอัดถ่านแท่งให้ลดการแตกหักหรือการอัดไม่แน่น พบว่าปัจจัยความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด และความเร็วรอบมอเตอร์ มีค่า *p-value* < 0.05 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการเกิดการแตกหักหรือการอัดไม่แน่น

ของถ่านแท่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย โดยใช้ฟังก์ชัน response optimization (Su *et al*., 2015) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยให้เหมาะสมที่สุด พร้อมทั้งประเมินค่าความพึงพอใจรวมของผลลัพธ์ (composite desirability: D) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 โดยผลการวิเคราะห์พบว่าค่า D เท่ากับ 0.94444 แสดงถึงระดับความพึงพอใจของผลลัพธ์อยู่ในระดับสูงมากหรือเกือบสมบูรณ์ (อธิวัฒน์ และเปรมพร, 2562) ดังแสดงในภาพที่ 8

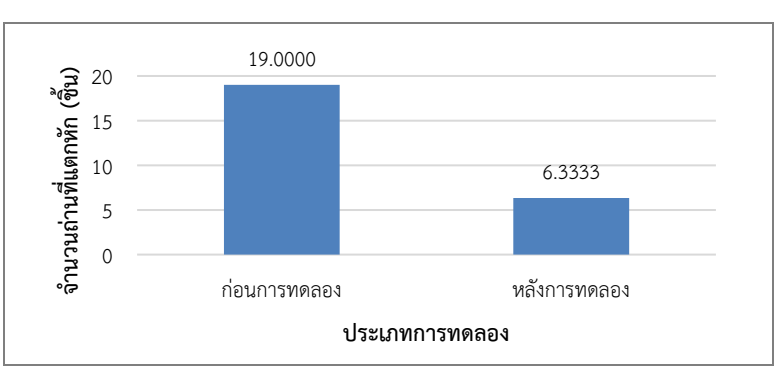


ภาพที่ 8 ค่าที่เหมาะสมในการอัดแท่งถ่านไม่ให้เกิดการแตกหักหรืออัดแน่น

จากภาพที่ 8 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการแตกหักหรือการอัดไม่แน่นของถ่านแท่ง พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว 30 เซนติเมตร ขนาดกระบอกอัด 45 มิลลิเมตร และความเร็วรอบมอเตอร์ 254 รอบต่อนาที โดยภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวคาดว่าจะเกิดถ่านแท่งที่แตกหักหรืออัดไม่แน่นเฉลี่ย 6.3333 ชิ้น ทั้งนี้ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองก่อนและหลังการปรับค่าปัจจัย แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4 และภาพที่ 9

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบอัดถ่านแท่งเกิดการแตกหัก ก่อนและหลังการทดลอง

ประเภทของเสีย	ก่อนการทดลอง (ชิ้น)	หลังการทดลอง (ชิ้น)
การแตกหัก	19.0000	6.3333



ภาพที่ 9 ผลการเปรียบเทียบการแตกหักก่อนและหลังการทดลอง

การอภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่าการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบสามารถใช้ในการวิเคราะห์และกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการอัดถ่านแท่งจากกะลามะพร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปัจจัยหลักทั้งสาม ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด และความเร็วรอบมอเตอร์ มีอิทธิพลต่อจำนวนถ่านอัดแท่งที่เกิดการแตกหักหรืออัดไม่แน่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ความยาวสกรูเกลียวและขนาดกระบอกอัดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเกิดการแตกหักของถ่านอัดแท่ง กล่าวคือ เมื่อค่าปัจจัยทั้งสองเพิ่มขึ้น จำนวนถ่านที่แตกหักหรืออัดไม่แน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงอัด และแรงเสียดทานภายในกระบวนการไม่เหมาะสมต่อการจับตัวของวัสดุ ในขณะที่ความเร็วรอบมอเตอร์มีความสัมพันธ์เชิงลบ โดยความเร็วรอบที่เหมาะสมช่วยให้การอัดขึ้นรูปมีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ส่งผลให้คุณภาพถ่านอัดแท่งดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยต่าง ๆ มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงกระบวนการอัดถ่านแท่งจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายตัวร่วมกัน ไม่สามารถพิจารณาเพียงปัจจัยเดียวได้ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม เมื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว 30 เซนติเมตร ขนาดกระบอกอัด 45 มิลลิเมตร และความเร็วรอบมอเตอร์ 254 รอบต่อนาที พบว่าสามารถลดจำนวนถ่านอัดแท่งที่แตกหักได้มากกว่าร้อยละ 50.00 เมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการ สะท้อนให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองสามารถช่วยลดของเสีย เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และยกระดับคุณภาพถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวได้

สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อทำการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอัดถ่าน เพื่อลดจำนวนถ่านอัดแท่งที่แตกหักจากกระบวนการ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยกำหนดปัจจัย ได้แก่ ความยาวสกรูเกลียว ขนาดกระบอกอัด และความเร็วรอบมอเตอร์ จากการทดลองหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าตัวแปรตอบสนอง คือ จำนวนถ่านอัดแท่งที่หักเสียหายจากกระบวนการด้วยเครื่องอัดถ่านแท่งน้อยที่สุด พบว่าระดับปัจจัยความยาวสกรูเกลียว 30 เซนติเมตร ขนาดกระบอกอัด 45 มิลลิเมตร และความเร็วรอบมอเตอร์ 254 รอบต่อนาที ส่งผลให้เกิดการแตกหักหรืออัดถ่านไม่แน่นจากเดิม 19 ชิ้น ลดลงมาเหลืออยู่ที่ 6.3333 ชิ้น ดังนั้นสำหรับการวิจัยในอนาคต ถ้าศึกษาปัจจัยและระดับของปัจจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับระยะห่างของสกรูเกลียวมาทำการออกแบบการทดลองร่วมด้วยคาดว่าจะส่งผลต่อการแตกหักของถ่านอัดแท่งมีจำนวนลดลงได้

เอกสารอ้างอิง

กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม. (2567). *แผนปฏิบัติการ NDC ด้านการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2564-2573 (NDC action plan on mitigation 2021-2030).* กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กิตติชาติ เผ่าพงษ์ไพบูลย์ กรกนก บุญเสริม และวีระ หอสกุลไท. (2566). การพัฒนาสมบัติทางกลและทางกายภาพของถ่านอัดแท่งจากเมล็ดยางพาราโดยผสมกับกะลามะพร้าวเพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, 16(1), 158-167.

เกวลิน สำเภาทอง กวินธร สัยเจริญ และสิทธิชัย แซ่เหล่ม. (2567). การประยุกต์ใช้หลักการซิกซ์ซิกม่าเพื่อลดสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่ม. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 14(3), 114-133.

ณัฐพงษ์ ศรีสุภะ. (2565). อิทธิพลเถ้าชานอ้อยต่อความแข็งแรงอัดในการขึ้นรูปคอนกรีต. *วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ*, 164(1), 111-119.

นัฐวุฒิ เพ็ชรชาติ พิมพ์ชนก ธาตรีวิจิตร หนึ่งหทัย ธราพร ศราวุฒิ ชูโลก และนวรัตน์ สีตะพงษ์. (2566). สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวลอัดแท่งและถ่านชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกกระท้อนและเปลือกมังคุด. *วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 42(1), 39-49, doi: https://doi.org/10.65217/wichchajnstru.2023.v42i1.254379.

บุญชัย แซ่สิ้ว และณัฐธยาน์ โสกุล. (2559). การลดของเสียในขั้นตอนกระบวนการบรรจุ โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา: บริษัทผลิตขนมขบเคี้ยว. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, 9(2), 30-44.

ประสิทธิ์ ไกรลมสม และนรงค์ วิชาผา. (2565). การวัดประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 18(2), 230-246.

ยศวรรธน์ จันทนา และนรัตว์ รัตนวัย. (2565). ปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อการปรับตั้งค่าเครื่องหั่นใบตะไคร้ด้วยเทคนิคออกแบบการทดลอง. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์*, 14(19), 83-95.

ยศวัจน์ ชีววรนนท์ตรี ปิยะ รนต์ละออง กฤดิธฤต ทองสิน และสมบัติ ทีฆทรัพย์. (2566). การลดของเสียในกระบวนการปั๊มชิ้นส่วนชุดหน้าคลัทช์โรงงาน กรณีศึกษา: โรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์แอร์รถยนต์. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*, 11(2), 27-38.

รัชฌาธร เทพรัตน์ และจารุวรรณ วงค์ทะเนตร. (2565). การนำเศษของเสียจากชีวภาพไปใช้ประโยชน์โดยผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 30(6), 124-136.

ศุภกิจ เศิกศิริ อามิณฑ์ หล้าวงศ์ วิชยุทธ จันทะรี อุทัย ธารพรศรี ไทยทัศน์ สุดสวนสี และปิยณัฐ โตอ่อน. (2567). การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบสามระดับ. *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*, 2(5), 34-43.

ศุภัทร ศิลาลอย ธรรมวิชช์ ประเสริฐ และจิรวัฒน์ ณ พัทลุง. (2567). การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแกะสลักสีด้วยเลเซอร์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. *วารสารข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการไทย*, 10(2), 18-24.

ศุภัทร ศิลาลอย ปริญญา ศรีสัตยกุล และจิรวัฒน์ ณ พัทลุง. (2566). พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกรรมวิธีการผลิตลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้น. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*, 8(1), 11-20.

ศุภัทร ศิลาลอย และจิรวัฒน์ ณ พัทลุง. (2567). การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตอุปกรณ์เช็คระดับน้ำมันโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น*, 12(2), 48-54.

เสริมศักดิ์ เกิดวัน รุ่งโรจน์ จีนด้วง และสุธาพร เกตุพันธ์. (2561). การผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกต้นสาคู. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

อธิวัฒน์ ลีนะธรรม และเปรมพร เขมาวุฒฒ์. (2562). การปรับปรุงกระบวนการผลิตลวดแกนกลางของผลิตภัณฑ์สายสวนหลอดเลือดหัวใจด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 14(2), 12-24.

อำนวย คำบุญ วรพจน์ ศิริรักษ์ พีรวัตร ลือสัก และเริงฤทัย ศิริรักษ์. (2562). การศึกษาของวัสดุผสมในถ่านอัดแท่งกะลามะพร้าวต่อสมบัติทางกลและทางความร้อน. *วารสารข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการไทย*, 5(2), 67-75.

อำนาจ วิชัย สุรัตน์ เศษโพธิ์ และการุณย์ ชัยวณิชย์. (2565). การศึกษาแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระดับเมือง กรณีศึกษา: เทศบาลเมืองพะเยา. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์*, 14(20), 30-44.

Montgomery, D.C. (2017). *Design and analysis of experiments*. (9th ed). New Jersey: John Wiley & Sons.

Su, H., Yao, H.M. and Zeng, H. (2015). The optimization research of the multi-response problems based on the SUR. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences,* 28, 731-737.