

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบดของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์

Analysis of Factors Affecting the Grinding Performance of a Solar-Powered Charcoal Grinder

วรพงศ์ พงศ์ภักทรวุฒิ¹, ธีรภัทร เยื้องกลาง¹, พิชัยภูษิต แก้วทอง¹ และ ณภัทร อินทนนท์^{1*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (วิทยาเขตขอนแก่น)

150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

Worapong Phongphattarawut¹, Teeraphat Yueangklang¹, Pichaipusit Kaewthong¹ and Naphatara Intanon^{1*}

¹Department of Industrial Technology, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Isan (Khon Kaen campus)

150 Srichun Road. Nai Mueang, Mueang Khon Kaen, Khon Kaen 40000

*Corresponding author Email: naphatara.in@rmuti.ac.th

(Received: June 10, 2026 / Revised: June 22, 2026 / Accepted: June 25, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องบดพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ เป็นเครื่องบดชนิดเหวี่ยงกระแทก ใช้มอเตอร์กระแสตรงขนาด 750 วัตต์ ความเร็วรอบของการบด 1000 รอบต่อนาที และตะแกรงร่อนขนาดไม่เกิน 450 ไมครอน ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณถ่านก่อนบด 2 ระดับ (1 และ 2 กิโลกรัม) และเวลาในการบด 3 ระดับ (5, 6 และ 10 นาที) โดยทำการทดลองซ้ำในแต่ละเงื่อนไข ประสิทธิภาพของเครื่องวัดจากร้อยละของผงถ่านที่ได้ และสภาวะที่เหมาะสมคือสภาวะที่ทำให้ต้นทุนการดำเนินงานต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า กรณีบดครั้งละ 1 กิโลกรัม จะได้ผงถ่านที่ปริมาณสูงกว่าการบดครั้งละ 2 กิโลกรัมในทุกช่วงเวลาการบด และปริมาณถ่านก่อนบดและเวลาในการบดมีอิทธิพลต่อร้อยละของผงถ่านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ .05 ประสิทธิภาพของเครื่องสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 99.53 และสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนการดำเนินงานต่ำสุด คือ บดครั้งละ 2 กิโลกรัม และใช้เวลาการบด 6 นาทีต่อครั้ง โดยมีต้นทุนต่อผงถ่านที่ได้คือ 17.81 บาทต่อกิโลกรัม

คำสำคัญ: เครื่องบดถ่าน, พลังงานแสงอาทิตย์, ผงถ่าน, ประสิทธิภาพการบด, ชีวมวล

Abstract

This research aimed to evaluate the performance and determine the optimal operating conditions of a solar-powered charcoal grinder. The grinder used in this study was a hammer mill powered by a 750-W DC motor operating at a rotational speed of 1,000 rpm and equipped with a sieve having an aperture size of less than 450 μ m. The experimental factors consisted of two charcoal feed quantities (1 and 2 kg) and three grinding times (5, 6, and 10 min). Each treatment combination was replicated four times. The performance of the grinder was evaluated based on the percentage yield of charcoal powder, whereas the optimal operating condition was determined by the lowest operating cost. The results showed that the grinder produced a higher charcoal powder yield when processing 1 kg of charcoal per batch than when processing 2 kg per batch at all grinding times. Statistical analysis indicated that both charcoal feed quantity and grinding time significantly affected the charcoal powder yield at the 0.05 significance level. The highest grinding efficiency reached 99.53%. Economic analysis revealed that

the optimal operating condition was a feed quantity of 2 kg and a grinding time of 6 min per batch. Under this condition, the production cost was reduced to 17.81 THB/kg of charcoal powder.

Keywords: Charcoal grinder, Solar-powered, Charcoal powder, Grinder efficiency, Biomass

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบัน การใช้ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นพลังงานที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสนับสนุนแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) [1] ถ่านไม้ (Charcoal) จัดเป็นผลิตภัณฑ์ชีวมวลที่มีบทบาทสำคัญในภาคครัวเรือน ภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมขนาดเล็ก โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา เนื่องจากมีค่าความร้อนสูง สามารถจัดเก็บและขนส่งได้สะดวก และมีต้นทุนการผลิตต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทอื่น [2] นอกจากการใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงแล้ว ปัจจุบันผงถ่าน (Charcoal Powder) ยังเป็นวัตถุดิบสำคัญในหลายอุตสาหกรรม เช่น การผลิตถ่านอัดแท่ง (Charcoal Briquette) การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง การผลิตวัสดุดูดซับกลิ่นและสารปนเปื้อน การผลิตถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ตลอดจนการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตรและสิ่งแวดล้อม [3], [4] โดยคุณภาพของผงถ่านที่ได้มีผลโดยตรงต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ปลายทาง ทั้งด้านความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล อัตราการเผาไหม้ และประสิทธิภาพในการดูดซับสาร [5]

อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตผงถ่านในระดับชุมชนและผู้ประกอบการรายย่อยยังประสบปัญหาหลายประการ โดยเฉพาะการใช้แรงงานคนในการบดหรือการใช้เครื่องบดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพต่ำ ส่งผลให้กำลังการผลิตไม่เพียงพอ สูญเสียวัตถุดิบจากการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่าน และมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าสูง [6] นอกจากนี้ ในหลายพื้นที่ชนบทหรือพื้นที่ห่างไกลยังประสบปัญหาการเข้าถึงไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การใช้เครื่องจักรไฟฟ้ามีข้อจำกัดและไม่สามารถผลิตได้อย่างสม่ำเสมอ จากสถานการณ์ดังกล่าว การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเครื่องจักรกลเกษตรและเครื่องจักรแปรรูปชีวมวลจึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาด สามารถนำมาใช้ได้อย่างยั่งยืน มีต้นทุนการดำเนินงานต่ำ และเหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยซึ่งได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 18–20 MJ/m²/day ตลอดทั้งปี [7] งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า การประยุกต์ใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับเครื่องจักรกลเกษตรสามารถช่วยลดต้นทุนพลังงานได้มากกว่า 30% และเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงเทคโนโลยีของชุมชนชนบท [8]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า มีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องบดวัสดุชีวมวลหลายประเภท เช่น เครื่องบดเปลือกหอยแมลงภู่ เครื่องบดเศษไม้ และเครื่องบดเศษหน่อไม้ [9], [10], [11] ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดการใช้แรงงานได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ยังพบงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องบดถ่านที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับชุมชนค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะการศึกษาประสิทธิภาพการบดภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน และการประเมินปริมาณผลผลิตที่ได้หลังการบด

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดเล็กที่สร้างขึ้น รวมถึงการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดของเครื่อง เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจักรแปรรูปชีวมวลที่ใช้พลังงานสะอาด ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับเศษถ่านเหลือใช้ ลดต้นทุนด้านพลังงาน และสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับชุมชนอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนการดำเนินงานต่ำสุด

3. เครื่องจักร และวัสดุการทดสอบ

เครื่องบดถ่านที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้ เป็นเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ ที่สร้างขึ้น (รูปที่ 1 ก) โดยมีแผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 350 W จำนวน 2 แผง ทำหน้าที่ในการประจุไฟฟ้า (Charger) ให้กับแบตเตอรี่ ขนาด 12V 60A. จำนวน 2 ตัว ต่อพ่วงแบบอนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 750 W ความเร็วรอบของมอเตอร์ 400 รอบต่อนาที ต่อพ่วงกับมูเลย์ อัตราทด 1:2.5 ได้ความเร็วรอบของชุดบด 1000 รอบต่อนาที ชุดบดถ่าน เป็นลักษณะเหวี่ยงกระแทก (Hammer mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน 25 มิลลิเมตร ความยาว 500 มิลลิเมตร ชุดค้อน 9 ชุด เส้นผ่านศูนย์กลางค้อน 60 มิลลิเมตร

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเศษถ่านไม้ที่มีขนาดเล็ก ไม่สามารถนำไปจัดจำหน่ายได้ (รูปที่ 1 ข) ถ่านที่นำมาใช้ในการทดลอง มีขนาดใกล้เคียงกัน เพื่อลดผลกระทบจากความแตกต่างของชนิดและคุณภาพของถ่านก่อนการทดลอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) เครื่องบดถ่านที่ใช้ในการทดสอบ (ข) ขนาดของถ่านที่ใช้ในการทดสอบ

เงื่อนไขของการทดสอบ ผงถ่านที่ได้ต้องผ่านการกรองของตะแกรง MESH 40 (ขนาดผงถ่าน เท่ากับ 450 ไมครอน) (รูปที่ 2 (ก)และ (ข)) และต้องมีผลผลิตไม่ต่ำกว่า 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยขนาดของช่องบรรจุถ่านของเครื่องบดถ่าน มีความจุสูงสุดประมาณ 2 กิโลกรัม ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลผลิตตามที่ต้องการ จึงกำหนดเงื่อนไขในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่อง ซึ่งวัดจากร้อยละของผงถ่านที่ได้จากการทดสอบไว้ดังตารางที่ 1



ก



ข

รูปที่ 2 (ก) ตะแกรง MESH 40 (ข) ผงถ่านที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรง MESH40

ตารางที่ 1 น้ำหนักของถ่าน และเวลาที่ใช้ในการบด

น้ำหนัก / ครั้ง(kg)	เวลาที่ใช้/ครั้ง	ผลผลิต (kg./ชม.)	หมายเหตุ
1	5	12	สูงกว่าเป้าหมาย
1	6	10	ตรงตามเป้าหมาย
1	10	6	ต่ำกว่าเป้าหมาย
2	5	24	สูงกว่าเป้าหมาย
2	6	20	สูงกว่าเป้าหมาย
2	10	12	สูงกว่าเป้าหมาย

การทดลองครั้งนี้ ในแต่ละเงื่อนไขทำการทดลอง 4 ซ้ำ

4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบ

หลังจากเครื่องบดถ่านทำงานครบกำหนดเวลาที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยจะนำผงถ่านที่ได้มาร่อนเพื่อนำเศษถ่านที่มีขนาดเล็กกว่ากำหนดออก หลังจากนั้นจะนำผงถ่านที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นค่าร้อยละ เปรียบเทียบกับน้ำหนักของถ่านที่ใส่เข้าไป ผลการทดสอบที่ได้ เป็นดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ร้อยละของผงถ่านที่ได้จากการทดสอบ

ที่	ปริมาณก่อนบด 1kg			ปริมาณก่อนบด 2kg		
	เวลา 5 นาที	เวลา 6 นาที	เวลา 10 นาที	เวลา 5 นาที	เวลา 6 นาที	เวลา 10 นาที
1	96.1	99.0	99.4	92.60	95.05	96.40
2	97.1	99.3	99.6	93.05	94.85	96.75
3	96.9	98.7	99.5	93.95	96.05	96.60
4	96.4	99.1	99.6	93.10	95.45	96.50
เฉลี่ย	96.63	99.03	99.53	93.18	95.35	96.56

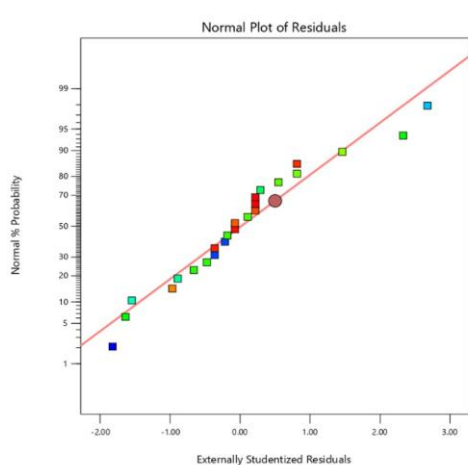
จากตารางที่ 2 พบว่าทั้งปริมาณถ่านก่อนบดและเวลาในการบดส่งผลต่อร้อยละของผงถ่านที่ได้อย่างชัดเจน โดยเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 1 kg ให้ค่าร้อยละของผงถ่านสูงกว่าการใช้ถ่าน 2 kg ในทุกช่วงเวลาการบด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 96.63–99.53% ขณะที่การใช้ถ่าน 2 kg ให้ค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 93.18–96.56% เมื่อพิจารณาผลของเวลาในการบด พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการบดจาก 5 นาทีเป็น 10 นาที ส่งผลให้ร้อยละของผงถ่านเพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีของการบดถ่าน 1 kg และ 2 kg เนื่องจากอนุภาคถ่านได้รับแรงกระแทกชุดไบต์เป็นระยะเวลานานขึ้น ทำให้เกิดการแตกหักของอนุภาคจนมีขนาดเล็กเพียงพอที่จะผ่านตะแกรงคัดขนาดได้มากขึ้น

4.2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการบด

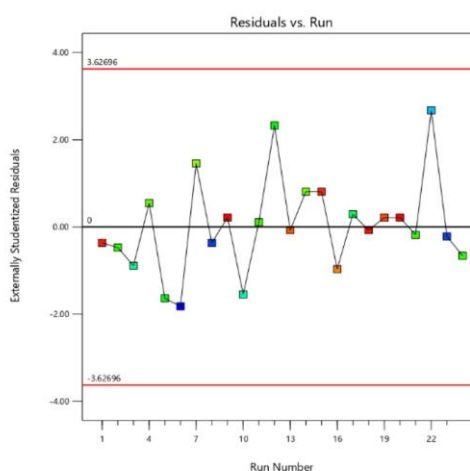
จากข้อมูลที่ได้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้โปรแกรม Design Expert ช่วยในการวิเคราะห์ ผลที่ได้สามารถสรุปได้ตามลำดับต่อไปนี้

1) ความเพียงพอของตัวแบบ

การวิเคราะห์ความเพียงพอของตัวแบบพิจารณาได้จากกราฟ Normal Plot of Residual (รูปที่ 3 ก) และกราฟ Residual VS. Run (รูปที่ 3 ข) ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ข้อมูลที่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยพิจารณากราฟ Normal Plot of Residual พบว่าจุดข้อมูลจะเรียงตัวอยู่ใกล้เส้นตรงอ้างอิง (Reference Line) ไม่มีการโค้งเป็นรูปตัว S ที่ชัดเจน การเบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมีไม่มากนักผิดปกติ และจากการพิจารณากราฟ Residual VS. Run พบว่า ค่าที่ได้ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence of Errors) และไม่มีอิทธิพลจากลำดับการทดลองหรือปัจจัยแทรกซ้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์ ANOVA และแบบจำลองถดถอยมีความน่าเชื่อถือทางสถิติ ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 (ก) กราฟ Normal Plot of Residual (ข) กราฟ Residual VS. Run

1) การวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัย

ในการหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัย ทำได้โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	110.63	5	22.13	147.41	< 0.0001	significant
A-weight	67.84	1	67.84	451.94	< 0.0001	
B-time	42.26	2	21.13	140.78	< 0.0001	
AB	0.5306	2	0.2653	1.77	0.1991	
Pure Error	2.70	18	0.1501			
Cor Total	113.33	23				

ตารางที่ 4 ค่าความสอดคล้องทางสถิติ (Fit Statistics)

Std. Dev.	0.3874	R ²	0.9762
Mean	96.71	Adjusted R ²	0.9695
C.V. %	0.4006	Predicted R ²	0.9576
		Adeq Precision	32.7799

จากตารางที่ 3 และ 4 พบว่าแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0001$) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9762 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 97.62% และมีค่า Predicted R^2 เท่ากับ 0.9576 ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่า Adjusted R^2 (0.9695) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำและสามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี

เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก พบว่าทั้งปริมาณถ่านก่อนบด (A) และเวลาในการบด (B) มีอิทธิพลต่อร้อยละของผงถ่านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0001$) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยปริมาณถ่านก่อนบดมีอิทธิพลมากที่สุด โดยมีค่า F-value เท่ากับ 451.94 และมีค่า Sum of Squares เท่ากับ 67.84 คิดเป็นประมาณ 61.3% ของความแปรปรวนทั้งหมดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้ ขณะที่เวลาในการบดมีค่า F-value เท่ากับ 140.78 และ Sum of Squares เท่ากับ 42.26 หรือประมาณ 38.2% ของความแปรปรวนทั้งหมด

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณถ่านที่ป้อนเข้าสู่เครื่องบดเป็นปัจจัยที่สำคัญกว่าระยะเวลาในการบด เนื่องจากปริมาณวัสดุที่มากเกินไปส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของอนุภาคภายในห้องบด ทำให้พลังงานจากใบตีถูกใช้ไปกับการเคลื่อนที่ของมวลวัสดุจำนวนมาก แทนที่จะถูกใช้ในการแตกหักของอนุภาค ส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดขนาดลดลง แม้ว่าจะเพิ่มเวลาบดก็ตาม ในทางตรงกันข้าม เวลาในการบดส่งผลต่อการสะสมพลังงานที่ใช้ในการลดขนาดอนุภาค เมื่อระยะเวลาบดเพิ่มขึ้น อนุภาคมีโอกาสดำรงแรงกระแทกซ้ำมากขึ้น จึงช่วยเพิ่มสัดส่วนของผงถ่านที่มีขนาดเล็กได้ อย่างไรก็ตาม ผลของเวลาในการบดมีความสำคัญน้อยกว่าปริมาณวัสดุป้อน

สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณถ่านและเวลาในการบด (AB) พบว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.1991$) แสดงให้เห็นว่าผลของเวลาในการบดมีแนวโน้มคงที่ในทุกระดับของปริมาณถ่าน และทั้งสองปัจจัยทำงานอย่างเป็นอิสระต่อกัน

2) สมการของตัวแบบ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงสถิติสามารถสร้างสมการพยากรณ์ร้อยละของผงถ่านที่ได้ในรูปแบบของสมการถดถอย ดังสมการที่ (1)

$$Y = 96.71 - 1.68A + 0.5103B[1] - 0.1975B[2] + 0.0603AB[1] + 0.0192AB[2] \quad (1)$$

เมื่อ

Y = ร้อยละของผงถ่านที่ได้

A = ปริมาณถ่านก่อนบด

B = เวลาในการบด

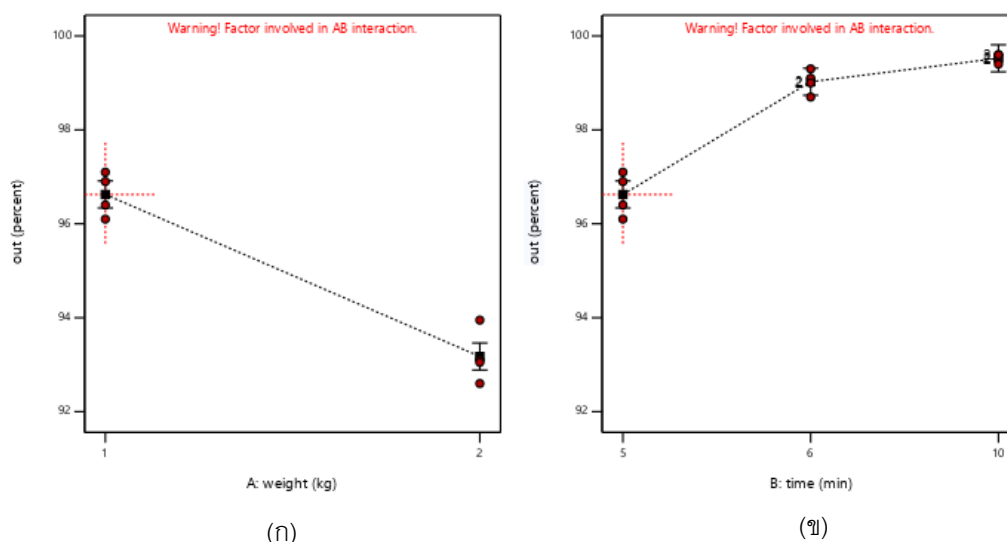
จากสมการพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย A มีค่าเป็นลบ (-1.68) และมีขนาดมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณถ่านก่อนบดส่งผลให้ร้อยละของผงถ่านลดลงอย่างชัดเจน ขณะที่ปัจจัยด้านเวลาในการบดมีผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการบด

จากสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการทำงานของเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสม โดยหากต้องการคุณภาพผงถ่านสูงสุด ควรเลือกใช้ปริมาณถ่าน 1 kg ต่อรอบ และระยะเวลาใน

การบด 10 นาที ซึ่งสามารถให้ร้อยละของผงถ่านสูงถึง 99.53% ขณะที่ยังคงรักษากำลังการผลิตให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

4.3 อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าทั้งปริมาณถ่านก่อนบดและเวลาในการบดส่งผลต่อร้อยละของผงถ่านที่ได้ อย่างชัดเจน โดยเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 1 kg ให้ค่าร้อยละของผงถ่านสูงกว่าการใช้ถ่าน 2 kg ในทุกช่วงเวลากการบด (รูปที่ 4 (ก)) เมื่อพิจารณาผลของเวลาในการบด พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการบดจาก 5 นาที เป็น 10 นาที ส่งผลให้ร้อยละของผงถ่านเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4 (ข))



รูปที่ 4 (ก) ความสัมพันธ์ของร้อยละของผงถ่านกับปริมาณ (ข) ความสัมพันธ์ของร้อยละของผงถ่านกับเวลา

ค่าร้อยละของผงถ่านสูงสุดเท่ากับ 99.53% เกิดขึ้นที่เงื่อนไขปริมาณถ่าน 1 kg และเวลาบด 10 นาที ในขณะที่ค่าต่ำสุดเท่ากับ 93.18% เกิดขึ้นที่ปริมาณถ่าน 2 kg และเวลาบด 5 นาที แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณถ่านในห้องบดมากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการบดลดลง เนื่องจากพื้นที่ว่างภายในห้องบดลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคและการถ่ายเทพลังงานจากใบตีไปยังอนุภาคถ่านเกิดขึ้นได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาต้นทุนในการดำเนินงาน โดยกำหนดค่าแรงในการทำงานชั่วโมงละ 40 บาท และถ่านก่อนการบด กิโลกรัมละ 15 บาท การบดครั้งละ 2 กิโลกรัม และบดนาน 6 นาที จะให้ต้นทุนการดำเนินงานต่ำสุด ที่ 17.81 บาท ต่อ กิโลกรัม

ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. [12] ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องบดชีวมวลแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer Mill) และรายงานว่าปริมาณวัสดุป้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบดมากกว่าระยะเวลาการทำงาน เนื่องจากปริมาณวัสดุที่มากเกินไปทำให้เกิดการอัดแน่นภายในห้องบด ส่งผลให้การถ่ายเทพลังงานลดลง

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานของ Miao et al. [13] ซึ่งศึกษาการลดขนาดของชีวมวลเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง พบว่าการเพิ่มเวลาบดช่วยเพิ่มสัดส่วนของอนุภาคละเอียด แต่เมื่อปริมาณวัสดุป้อนสูงเกินค่าที่เหมาะสม ประสิทธิภาพในการลดขนาดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และผลการศึกษาของ Olatunji Akinlabi and Madushele [14] ที่รายงานว่าความสามารถในการลดขนาดของวัสดุชีวมวลขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนวัสดุเข้าสู่เครื่องบดเป็นหลัก โดยการป้อนวัสดุในปริมาณต่ำช่วยให้เกิดการชนและแตกหักของอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า

5.สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องบดถ่านพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้น คือ การใช้ปริมาณถ่าน 1 kg และเวลาบด 10 นาที ซึ่งให้ร้อยละของผงถ่านสูงสุดเท่ากับ 99.53% โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบดมากที่สุดคือปริมาณถ่านก่อนบด รองลงมาคือเวลาในการบด ขณะที่อิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัยไม่นัยสำคัญทางสถิติ

6. ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ เครื่องที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการบรรจุได้จำกัด ทำให้ต้องทำการบดหลายครั้งจึงจะได้ปริมาณที่ต้องการ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่า ปริมาณที่ใส่หากล้นมากเกินไปจะทำให้ผงถ่านที่ได้มีปริมาณน้อยลง เนื่องจากเครื่องไม่สามารถบดให้ละเอียดได้ ดังนั้นในการออกแบบและสร้างเครื่องบด ควรต้องคำนึงปริมาณที่ใส่ เป็นสิ่งสำคัญ ต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมกับผลผลิตที่ต้องการ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Demirbas A. Bioenergy: Biomass to Biofuels. London: Springer; 2009.
- [2] Rosillo-Calle F, de Groot P, Hemstock SL, Woods J. The Biomass Assessment Handbook. London: Earthscan; 2007.
- [3] Sotannde OO, Oluyeye MO, Abah SO. Physical and combustion properties of charcoal briquettes from neem wood residues. *Int Agrophys*. 2010;24(2):189–194.
- [4] Sevilla M, Fuertes AB. The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. *Carbon*. 2009;47(9):2281–2289.
- [5] Kaliyan D, Morey RV. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy*. 2009;33(3):337–359.
- [6] Mani S, Tabil LG, Sokhansanj S. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass Bioenergy*. 2004;27(4):339–352.
- [7] Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE). Thailand Alternative Energy Report 2023. Bangkok: Ministry of Energy; 2023. (in Thai)
- [8] Hossain MA, Rahim NA, Selvaraj J, Pandey AK. Recent progress and development on power DC–DC converter topology, control, design and applications: A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018;81:205–230.
- [9] Rungrattanaubon K, Srisukho P, Chuen-atsadongkot T, Loetkhamphu N, Angkhahiran W. Design and construction of a mussel shell grinding machine for shell-clay production in community enterprises. *Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University*. 2024;12(2). (in Thai)
- [10] Meemon A, Pramunmak S, Jai-u J. Influence of agricultural residue particle size on biomass fuel pellet formation. Research Report under the Community Enterprise and Small and Medium Enterprise Research Program. Bangkok: National Research Council of Thailand; 2015. (in Thai)
- [11] Surin P, Kantha C, Mawilet W, Khanthakhiao Y, Jaikhampan M. Development of a bamboo shoot waste grinding machine. *Journal of Vocational Education Research and Innovation*. 2022;6(2). (in Thai)

- [12] Zhang Y, Wang L, Li H, Chen X. Effect of particle size reduction on biomass densification and fuel properties: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;158:112113.
- [13] Miao Z, Grift TE, Hansen AC, Ting KC. Energy consumption and particle size distribution in biomass grinding operations: Recent advances and future perspectives. *Biomass and Bioenergy*. 2021;149:106102
- [14] Olatunji OO, Akinlabi ET, Madushele N. Design considerations and performance evaluation of hammer mills for biomass processing: A review. *Sustainability*. 2023;15(8):6872.