

การใช้ประโยชน์เชิงมูลค่าอย่างยั่งยืนจากก้อนเชื้อเห็ดใช้แล้ว: ความเป็นไปได้ในการผลิต
เม็ดเชื้อเพลิงชีวภาพ

Sustainable Valorization of Spent Mushroom Substrate: Feasibility of Bio-Pellet
Production

ปฏิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ¹ ศิวัตม์ กมลคุณานนท์² ลลิตา เพชรใจหาญ³ และ ภคมน ปินตานา^{4*}
Patipat Thanompongchart¹ Siwat Kamonkunanon² Lalita Petchaihan³ and Pakamon Pintana^{4*}

- ¹ สาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงานในงานอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
¹ Industrial Energy Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Uttaradit 53000
- ² สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
² Construction Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Uttaradit 53000
- ³ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290
³ Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290
- ⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน (ต่อเนื่อง) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290
⁴ Energy Conservation Engineering (Continuing Program), School of Renewable Energy,
Maejo University, Chiang Mai 50290

*Corresponding author: Tel.: 09-86196155. E-mail address: p.pintana@gmail.com

Abstract

This study aimed to evaluate the feasibility of producing fuel pellets from spent mushroom substrate (SMS) of oyster mushrooms, focusing on their physical properties, energy potential, and economic viability. The SMS materials were collected from mushroom farms after six months of use and pelletized using a flat-die biomass pellet machine with a 8 mm die diameter to compare the performance between 2-roller and 3-roller compression systems. SMS was mixed with cassava starch binder at ratios of 100:0, 80:20, and 60:40 (w/w). The results showed that the 3-roller system produced pellets with a density of 426–529 kg/m³ and significantly reduced moisture content. The heating value of the pellets increased with higher binder proportions, with the 60:40 ratio achieving the highest calorific value of 12.74 MJ/kg. All pellet formulations demonstrated sufficient durability and low dust content, meeting ISO 17829 and DINplus standards. In terms of economics, the 100:0 formulation yielded the lowest production cost, highest profit, and a payback period of 0.20–0.35 years. The 80:20 formulation required a selling price of at least 8 THB/kg to break even, while the 60:40 formulation resulted in losses under all scenarios. Increasing binder content improved the physical and energy characteristics but also raised production costs. In conclusion, fuel pellets produced from spent

mushroom substrate can achieve enhanced density and energy value through appropriate binder ratios and moisture control, making them a suitable and economically viable green fuel alternative to firewood.

Keywords: Spent mushroom substrate, Biomass pellets, Feasibility study, Sustainable resource utilization, Renewable energy

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงจากก้อนเห็ดนางฟ้าใช้แล้ว (SMS) โดยมุ่งเน้นสมบัติทางกายภาพ พลังงาน และศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์ วัสดุใช้ในการทดลองเก็บจากฟาร์มเพาะเห็ดหลังใช้งานครบ 6 เดือน ใช้เครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบ Flat Die ขนาดรูแผ่นอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm เพื่อเปรียบเทียบระบบอัด 2 และ 3 ลูกกลิ้ง และทดสอบการผสม SMS กับแป้งมันสำปะหลังสัดส่วน 100:0 80:20 และ 60:40 พบว่า ระบบ 3 ลูกกลิ้ง ให้ความหนาแน่น 426–529 kg/m³ และลดความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ประสิทธิภาพค่าความร้อนของเม็ดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนตัวประสาน โดยสูตร 60:40 ให้ความร้อนสูงสุด 12.74 MJ/kg ทุกสูตรมีความคงทนและฝุ่นละออง ผ่านมาตรฐาน ISO 17829 และ DINplus ด้านเศรษฐศาสตร์ สูตร 100:0 มีต้นทุนต่ำ กำไรสูงสุด และคืนทุน 0.20–0.35 year สูตร 80:20 ต้องราคาขาย ≥ 8 ฿/kg จึงคืนทุนได้ ส่วนสูตร 60:40 ขาดทุนทุกกรณี การเพิ่มสัดส่วนตัวประสานช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและพลังงาน แต่เพิ่มต้นทุน สรุปได้ว่า เม็ดเชื้อเพลิงจากก้อนเห็ดใช้แล้วสามารถปรับปรุงความหนาแน่นและค่าพลังงานได้ด้วยการเลือกสัดส่วนผสมและควบคุมความชื้นอย่างเหมาะสม ทำให้เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทดแทนการใช้ฟืนได้และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

คำสำคัญ: ก้อนเห็ดใช้แล้ว เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ความเป็นไปได้ การใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน พลังงานทดแทน

บทนำ

ในปี 2567 การผลิตพลังงานทั้งหมดอยู่ที่ 36,639 ktoe เพิ่มขึ้น 2.0% จากปีก่อน โดยพลังงานเชิงพาณิชย์คิดเป็น 20,945 ktoe (57.2%) เพิ่มขึ้น 7.3% แบ่งเป็นถ่านหิน 1,866 ktoe ลดลง 1.7% ก๊าซธรรมชาติ 14,873 ktoe เพิ่มขึ้น 10.6% น้ำมันดิบ 2,271 ktoe เพิ่มขึ้น 7.9% และคอนเดนเสท 1,935 ktoe ลดลง 6.7% ส่วนพลังงานหมุนเวียนผลิตได้ 13,141 ktoe (35.8%) ลดลง 4.9% โดยพลังงานหมุนเวียนแบบดั้งเดิม 2,535 ktoe ลดลง 1.2% และพลังงานประเภทอื่น 18 ktoe ลดลง 47.1% [1] การผลิตพลังงานโดยรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยพลังงานเชิงพาณิชย์เติบโตต่อเนื่อง โดยเฉพาะก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดิบ ขณะที่พลังงานหมุนเวียนและพลังงานประเภทอื่นลดลงอย่างชัดเจน แตกต่างจากปัจจุบันที่พลังงานชีวมวลได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายทั่วโลกในฐานะพลังงานทดแทน ชีวมวลและอินทรีย์วัตถุสามารถผลิตพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้โดยตรงเพื่อความร้อน การผลิตแก๊สจากชีวมวล (Gasification) การสร้างแก๊สชีวภาพด้วยการหมัก (Biogas) และการผลิตเชื้อเพลิงเหลว เช่น เอทานอลหรือไบโอดีเซลผ่านการสกัดน้ำมันและทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน [2] การเผาไหม้โดยตรง เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแปรรูปวัสดุชีวมวลให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการเผาไหม้วัสดุนี้ในสภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอ โดยสามารถใช้วัสดุชีวมวลได้เลยหรือนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล และก้อนเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น [3] การผลิตเม็ดชีวมวลที่มีความหนาแน่นมีความท้าทายเนื่องจากยังขาดกลไกการรวมตัวของอนุภาคและบทบาทของพันธะทางเคมีเชิงโครงสร้างในกระบวนการอัดเม็ด โครงสร้าง

โมเลกุลและสารเติมแต่งประเภทต่าง ๆ [4] การอัดเม็ดจากชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้ก็มีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นจากข้อมูล 5 ปีที่ผ่านมา รวมไปถึงการประเมินคุณภาพ มีความสำคัญอย่างยิ่งเมื่อต้องจัดการกับกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากวัตถุดิบที่เป็นไปได้มากมายสำหรับการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง [5] การใช้เศษไม้ในปัจจุบันไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด การศึกษาปัจจัยข้อกำหนดตามมาตรฐานอัดเม็ดชีวมวลหรือข้อกำหนดสำหรับลักษณะทางกายภาพและทางกลของเม็ดชีวมวลที่ผลิตได้ ลักษณะของเม็ดชีวมวลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นเป็นหลัก เช่น ขนาดอนุภาค ความหนาแน่น [6] ปริมาณความชื้น [7] ค่าความร้อน เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณเถ้า [8] อุณหภูมิการติดไฟ [9] สภาวะการทำงานของเครื่องจักรกล ความดันที่ใช้ และอุณหภูมิแม่พิมพ์ เป็นต้น เทคโนโลยีอัดเม็ดชีวมวลยังได้รับความนิยมอย่างรวดเร็วในหลายประเทศ อนาคตของอุตสาหกรรมอัดเม็ดชีวมวลได้รับอิทธิพลอย่างมากจากสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ การเมือง และสังคมต่าง ๆ การจัดหาพลังงานที่ยั่งยืนหรือพลังงานสีเขียวจึงมีความท้าทายอย่างมากในอนาคต [10] การนำพลังงานชีวมวลมาใช้งานมีวิธีที่หลากหลายแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์ เกษตรกรส่วนมากในปัจจุบันมีการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ผลิตเป็นสารตั้งต้นในอาหารในการดำรงชีพ อย่างเช่น การผลิตเห็ดนางฟ้าหรือเห็ดอื่น ๆ ได้หลากหลายชนิด [11] สามารถนำชีวมวลจำพวกฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกมันสำปะหลัง และขี้เลื่อย ซึ่งเป็นผลพลอยได้ทั้งการเกษตรและอุตสาหกรรมชีวมวล ช่วยในการเพาะเห็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แทนที่จะปล่อยทิ้งเป็นของเสียหรือเผาทำลาย และยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เพียงแต่มีส่วนสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนในภูมิภาคและการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานในท้องถิ่นเท่านั้น แต่ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกอีกด้วย [12] การอัดเม็ดชีวมวลเป็นทางเลือกทดแทนที่ได้รับความนิยมและยั่งยืนมากขึ้นสำหรับการผลิตความร้อนและพลังงานทดแทนถ่านหิน [13] รวมไปถึงการนำของเสียจากอุตสาหกรรมการเพาะเห็ดนำมาเป็นแหล่งชีวมวลใหม่ในการผลิตพลังงานทดแทนได้ ช่วยสร้างระบบเศรษฐกิจแบบหมุนเวียน (Circular economy) ในกระบวนการผลิตเห็ดนางฟ้าจะต้องใช้ความร้อนจากไม้ฟืนจำนวนมากเพื่อใช้ในการฆ่าเชื้อเห็ดเป็นเวลามากกว่า 2 h [14] ดังนั้น จึงเกิดแนวคิดในการนำของเสียจากการเพาะเห็ดมาใช้เป็นแหล่งชีวมวลใหม่ โดยเฉพาะการนำก้อนเห็ดใช้แล้วมาศึกษาสภาวะการผลิตในรูปแบบเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหรือก้อนชีวมวล เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้สามารถใช้ทดแทนไม้ฟืนที่ขาดแคลนในตลาดได้ ทั้งยังช่วยลดต้นทุนการจัดการหาฟืนที่มีราคาสูงให้กับเกษตรกร ประชาชน และวิสาหกิจชุมชนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเห็ดนางฟ้า นอกจากนี้ การดำเนินการดังกล่าวยังมีส่วนช่วยเสริมสร้างความยั่งยืนด้านพลังงาน และสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียนในระดับท้องถิ่นอย่างเป็นรูปธรรม

วิธีการวิจัย

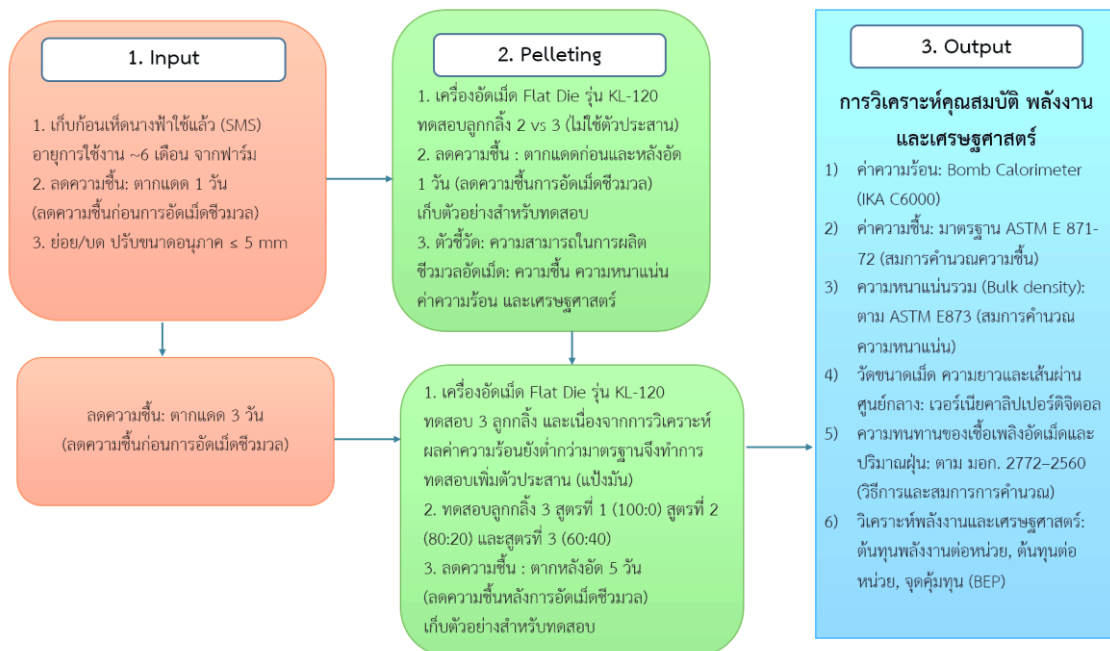
วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือก้อนเห็ดนางฟ้าใช้แล้ว (Spent Mushroom Substrate: SMS) ที่เก็บจากฟาร์มเพาะเห็ดหลังใช้งานครบ 6 เดือน [11,14] โดยใช้อุปกรณ์ ได้แก่ เครื่องย่อยวัตถุดิบ เครื่องผสมวัตถุดิบ และเครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบ Flat Die รุ่น KL-120 ขนาดเม็ด 8 mm ยาว 25.4 mm [5,10,13] การทดลองเริ่มจากการเปรียบเทียบเครื่องอัดเม็ดแบบ 2 และ 3 ลูกกลิ้ง โดยไม่ใช้ตัวประสาน ลดความชื้นของก้อนเห็ดด้วยการตากแดด 1 วัน ก่อนอัดเป็นเม็ด และตากแดดหลังอัดอีก 1 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สมรรถนะการผลิต ความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน และด้านเศรษฐศาสตร์ จากผลที่ได้เลือกใช้เครื่องอัดแบบ 3 ลูกกลิ้ง และเพิ่มเงื่อนไขการลดความชื้นก่อนอัดเม็ดด้วยการตากแดด 3 วัน พร้อมทดลองผสมก้อนเห็ดกับแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ทั้งหมด 3 สูตร ได้แก่ 100:0 80:20 และ 60:40 (ผงก้อนเห็ด: แป้งมัน) [9,14] หลังอัดเม็ดนำไปตากแดด 5 วัน ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในทุกเงื่อนไข แล้วบรรจุถุงซิปล็อค

เพื่อใช้วิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดต่อไป [5,13,15-16] ดังแสดงในภาพที่ 1-2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง ประกอบด้วย การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb Calorimeter) รุ่น C6000 ยี่ห้อ IKA Global Standards Oxygen Bomb Calorimeter เวอร์เนียคาลิเปอร์ดิจิตอล (Digital Vernier Caliper) เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับวัดความยาว (Length) เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ความหนาแน่น (Bulk density) สำหรับการหาค่าความหนาแน่นจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E873 ความชื้น ((Moisture content) จะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E 871-72 ความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Durability)



ภาพที่ 1 เครื่องอัดเม็ดชีวมวล

และปริมาณฝุ่นละออง (Fines/Dust) จะเป็นไปตามที่มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด มอก. 2772-2560 รวมไปถึงการวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานและต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ [7, 15-16] กระบวนการทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โดอะแกรมกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากชีวมวล

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ผลการอัดเม็ดชีวมวลจากเครื่องอัดแบบ 2 และ 3 ลูกกลิ้ง

จากการทดสอบพบว่า ก้อนเห็ดนางฟ้าเก่า มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูงมาก เท่ากับ $52.58 \pm 2.85\%$ ความหนาแน่น $280.98 \pm 10.81 \text{ kg/m}^3$ และค่าความร้อน 11.46 MJ/kg หลังผ่านการอัดเม็ดเป็นชีวมวลอัดเม็ดแล้ว พบว่าระบบอัดเม็ดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ให้ค่าความชื้น $41.62 \pm 0.75\%$ ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น $351.69 \pm 9.39 \text{ kg/m}^3$ และค่าความร้อน 9.86 MJ/kg ระบบอัดเม็ดแบบ 3 ลูกกลิ้ง ให้ค่าความชื้นลดลงเหลือ $32.82 \pm 0.90\%$ ความหนาแน่นเพิ่มสูงสุดเป็น $426.85 \pm 8.28 \text{ kg/m}^3$ และค่าความร้อน 9.62 MJ/kg ดังแสดงผลตามตารางที่ 1 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การอัดเม็ดสามารถเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในระบบ 3 ลูกกลิ้ง คุณสมบัติของก้อนเห็ดนางฟ้ามีค่าความชื้นสูง ก้อนเห็ดนางฟ้าเก่าเป็นวัสดุที่มีเส้นใยและโครงสร้างรูพรุน สามารถเก็บน้ำได้มาก [14] การอัดเม็ดสามารถลดความชื้นบางส่วนได้ แต่ยังคงเกินมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสากล (ISO 17225-2 กำหนดไม่เกินประมาณ 10%) [4, 6] ดังนั้นจำเป็นต้องมีการลดความชื้นก่อนหรือหลังการอัดเม็ดเพื่อให้ได้คุณภาพเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น เพราะจะส่งผลต่อค่าพลังงานที่ต่ำลงซึ่งมีผลมาจากการที่ค่ามีความชื้นสูง [7] ผลต่อความหนาแน่น การอัดเม็ดช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุอย่างชัดเจน [6] โดยเฉพาะการใช้ระบบ 3 ลูกกลิ้งที่ให้แรงอัดสูง ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีความแน่นและคงรูปได้ดีกว่า [9] ทั้งนี้การเพิ่มความหนาแน่นการอัดเม็ดมักทำให้ความชื้นลดลง เพราะมีการให้ความร้อน แรงเฉือน การระเหยบางส่วน [5] ผลของการทดสอบการศึกษาการเปรียบเทียบจำนวนของลูกกลิ้ง 2 และ 3 ลูกกลิ้ง พบว่ามีประเด็นของค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงต่ำกว่าก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าเก่า ซึ่งเป็นประเด็นที่นำมาพิจารณาต่อ เนื่องจากการลดความชื้นก่อนอัดเม็ดเพียง 1 วัน ยังไม่เพียงพอที่จะเพิ่มค่าพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักที่ยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานของมอก. 2772-2560 [4]

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนเห็ดเก่า และเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จาก 2 ลูกกลิ้ง และ 3 ลูกกลิ้ง

คุณสมบัติ	ก้อนเห็ดนางฟ้าเก่า	ชีวมวลอัดเม็ด 2 ลูกกลิ้ง	ชีวมวลอัดเม็ด 3 ลูกกลิ้ง
ค่าความชื้น (%)	52.58 ± 2.85	41.62 ± 0.75	32.82 ± 0.90
ความหนาแน่น (kg/m^3)	280.98 ± 10.81	351.69 ± 9.39	426.85 ± 8.28
ค่าความร้อน (MJ/kg)	11.46	9.86	9.62
ความสามารถในการผลิต (kg/hr)	-	52	80
ต้นทุนการผลิต (฿/month)	-	1,019	1,107
ระยะเวลาคืนทุน (month)	-	7.25	4.23

หมายเหตุ: การกำหนดราคาขายอยู่ที่ 5 ฿/kg

รวมถึงสาเหตุของการลดลงของค่าความร้อนอาจเกิดจากการสูญเสียสารระเหยในระหว่างกระบวนการอัดเม็ด [5,7] ลักษณะของวัตถุดิบก้อนเชื้อเห็ดมีส่วนที่แตกต่างกัน ลักษณะของเนื้อก้อนเห็ดด้านใน และลักษณะผิวของก้อนเห็ดด้านนอก ทำให้ชิ้นส่วนของวัสดุมีความเหนียว ความแข็งแตกต่างกัน และเกิดช่องว่างภายในของเม็ด ส่งผลให้ความหนาแน่นและพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักลดลง [6,9] การปรับปรุงสามารถทำได้โดย พัฒนากระบวนการต่อ โดยการคัดวัตถุดิบให้สม่ำเสมอ และตากหรือลดความชื้นก่อนอัดเม็ดเพิ่มขึ้น 3 วัน [4,14] ซึ่งจะช่วยให้เม็ดมีความหนาแน่นสูงขึ้น ลดช่องว่างภายใน และเพิ่มค่าความร้อนต่อกิโลกรัม แมต้นทุนรวมต่อเดือนของ 3 ลูกกลิ้งจะสูงกว่า 2 ลูกกลิ้ง เล็กน้อย แต่กำลังการผลิตที่สูงขึ้นทำให้ต้นทุนต่อกิโลกรัมลดลง และคืนทุนเร็วขึ้น [7] ซึ่งแสดงถึงการประหยัดต่อขนาดสำหรับการเพิ่ม

อัตราผลิต ถ้ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยกำลังเครื่องเท่ากัน แต่ผลิตได้มากขึ้น แสดงถึงพลังงานต่อกิโกรัมต่ำลง ในกรณี 3 ลูกกลิ้ง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบด้านต้นทุนพลังงานและความคุ้มค่ามากกว่า

2. การประเมินคุณสมบัติเม็ดเชื้อเพลิง ต้นทุน และศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์

ผลการทดสอบคุณสมบัติเม็ดเชื้อเพลิงจากการผสมวัตถุดิบในสัดส่วน 100:0 80:20 และ 60:40 พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดเชื้อเพลิงทั้งแบบยาวและสั้นอยู่ในช่วง 6.8–7.1 mm ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานเม็ดเชื้อเพลิงที่นิยมผลิต (6–8 mm) ส่วนความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยสูตร 60:40 มีค่าเฉลี่ยความยาวสูงที่สุดทั้งในเม็ดยาวและเม็ดสั้น ซึ่งอาจเกิดจากการไหลของวัตถุดิบที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างการอัด ส่งผลให้เม็ดมีการกระจายขนาดมากขึ้น สำหรับความหนาแน่นรวมพบว่าสูตร 60:40 มีค่าสูงสุด 529.5 kg/m³ บ่งบอกถึงความแน่นและความแข็งแรงของเม็ดเชื้อเพลิง ในขณะที่สูตร 80:20 มีค่าต่ำสุด 471.9 kg/m³ ซึ่งอาจมีผลต่อความแข็งแรงและการแตกหักในการขนส่ง ค่าความชื้นของทุกสูตรมีค่าต่ำมาก 0.07–0.21% ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (<10%) ซึ่งเป็นผลดีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ และที่สำคัญค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม โดยสูตร 60:40 ให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 12.74 MJ/kg แสดงถึงสมรรถนะด้านพลังงานที่ดีกว่าสูตรอื่น ๆ นอกจากนี้ค่าความคงทนของเม็ดเชื้อเพลิงทุกสูตรสูงกว่า 99% และค่าฝุ่นละอองอยู่ระหว่าง 1.30–1.45% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด สะท้อนให้เห็นว่าเม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็งแรง เหมาะสมต่อการจัดเก็บและขนส่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของชีวมวลอัดเม็ดในสัดส่วนการผสม 100:0 80:20 และ 60:40 อยู่ในช่วงมาตรฐาน ISO 17829 และ DINplus [15-16] ซึ่งเหมาะสมต่อการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบเผาไหม้อัตโนมัติได้ เนื่องจากมีขนาดไม่ยาวเกินไปจนเกิดการติดขัดในสกรูป้อนเชื้อเพลิง ความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงแตกต่างกัน โดยสูตร 60:40 มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด ส่งผลให้มีการอัดตัวแน่นและเพิ่มค่าพลังงานต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งเป็นข้อดีต่อการขนส่งและการเก็บรักษา ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมของตัวประสาน โดยสูตร 60:40 ให้ค่าความร้อนสูงสุด 12.74 MJ/kg รองลงมาคือ สูตร 80:20 เท่ากับ 11.15 MJ/kg และสูตร 100:0 เท่ากับ 9.42 MJ/kg ตามลำดับ



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของชีวมวลอัดเม็ดที่ไม่มีตัวประสาน 100:0 (a) แบบมีตัวประสาน 80:20 (b) และ 60:40 (c)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดเม็ดแบบไม่มีตัวประสานและแบบมีตัวประสาน

คุณสมบัติ	100:0 (a)	80:20 (b)	60:40 (c)
ค่าความชื้น (%)	0.07±0.08	0.10±0.04	0.21±0.07
ความหนาแน่นรวม (kg/m ³)	500.7±33.0	471.9±16.5	529.5±10.8
ค่าความร้อน (MJ/kg)	9.42	11.15	12.74
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย D_{50} (mm)	7.12±0.07	6.92±0.18	6.83±0.28

คุณสมบัติ	100:0 (a)	80:20 (b)	60:40 (c)
ความยาวเฉลี่ย $L_{ยาว}$ (mm)	21.21±1.72	20.41±3.46	24.04±2.05
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย $D_{เส้น}$ (mm)	7.13±0.22	6.94±0.26	6.95±0.25
ความยาวเฉลี่ย $L_{สั้น}$ (mm)	7.13±1.60	8.33±1.61	9.55±1.72
ความคงทน (%)	99.32±0.02	99.64±0.06	99.57±0.04
ค่าฝุ่นละออง (%)	1.45±0.57	1.32±0.04	1.30±0.09

แสดงให้เห็นว่าการผสมวัสดุคิบบช่วยปรับปรุงสมบัติด้านพลังงานของเม็ดเชื้อเพลิงได้อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มสัดส่วนการผสมจาก 100:0 ไปจนถึง 60:40 มีผลต่อการเพิ่มค่าความร้อนและความหนาแน่นรวม โดยสูตร 60:40 มีคุณสมบัติเด่นที่สุดในด้านค่าพลังงาน ความหนาแน่น และความแข็งแรงของเม็ดเชื้อเพลิง แม้จะมีข้อจำกัดเล็กน้อยในเรื่องความยาวเม็ดที่กระจายกว้าง แต่ยังคงเหมาะสมต่อการนำไปใช้ทั้งในเชิงอุตสาหกรรมและการใช้งานทั่วไป [4,5] ดังนั้นการเตรียมและวิเคราะห์ชีวมวลเป็นขั้นตอนพื้นฐานสำคัญ สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลและผลิตภัณฑ์ชีวภาพอื่น ๆ รวมถึงชีวมวลอัดเม็ด ทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและเหมาะสมกับการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม คุณภาพของวัสดุคิบบชีวมวลเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง การพัฒนาและปรับปรุงควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการนำไปผลิตเชื้อเพลิงทั้งชีวมวลที่เป็นเนื้อไม้และไม้ไผ่เนื้อไม้ได้ในอนาคต [5] การประเมินต้นทุนและศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงจากสัดส่วนการผสมวัสดุคิบบต่างกัน การวิเคราะห์การผลิตชีวมวลอัดเม็ดทั้ง 3 สูตร (สูตรที่ 1 100:0 สูตรที่ 2 80:20 และสูตรที่ 3 60:40) โดยผลิต 1,120 kg/month และต้นทุนแบริ่งมัน 32 B/kg [17] ส่วนราคาขายชีวมวลอัดเม็ดนั้นมีหลายราคา เช่น ชีวมวลไม้อัดเม็ด 4 B/kg แต่ขายเป็นกระสอบใหญ่ปริมาณ 1 ตัน [18] ในขณะที่ราคาปลีกในออนไลน์มีจำหน่ายที่ราคาประมาณ 40 B/kg [19] ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าสูตรที่ 1 มีต้นทุนต่ำที่สุด ทำให้กำไรสุทธิสูงสุดหากคิดในช่วงราคาขาย 5–8 B/kg (4,493–7,853 B/month) และคืนทุนเร็วที่สุด (0.20–0.35 year) ขณะที่สูตร 2 ขายตอนเมื่อราคาขาย 5–7 B/kg แต่สามารถทำกำไรได้ 735.4 B/month และคืนทุนประมาณ 2.15 year เมื่อราคาขาย 8 B/kg ส่วนสูตรที่ 3 มีต้นทุนสูงสุด ทำให้ขาดทุนทุกกรณีในช่วงราคาขาย 5–8 B/kg และไม่สามารถคืนทุนได้ จุดคุ้มทุน (BEP) ของสูตรที่ 1 ต่ำมากเพียง 17–38 kg/month ทำให้เริ่มคืนทุนได้ทันที ส่วนสูตรที่ 2 จุดคุ้มทุนเป็นลบที่ราคาขาย 5–7 B แต่ราคาขายที่ 8 B จุดคุ้มทุนการผลิตจะได้ประมาณ 204 kg/month (ประมาณ 18% ของกำลังผลิต) ส่วนสูตรที่ 3 ค่าจุดคุ้มทุนติดลบตลอด ทำให้ไม่คืนทุน กล่าวคือ สูตรที่ 1 เหมาะสมที่สุดสำหรับราคาขาย 5–8 B/kg สูตรที่ 2 ต้องราคาขายต้อง ≥ 8 B/kg จึงมีกำไร และสูตร 3 ต้องปรับสูตรหรือราคาขายสูงขึ้นเพื่อให้คืนทุนได้ [7,10] ผลเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า แม้การเพิ่มส่วนผสมของตัวประสาน (แบริ่งมันสำหรับหลัง) จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและพลังงานของเม็ดเชื้อเพลิง แต่กลับเพิ่มต้นทุนการผลิต ทำให้บางสูตรไม่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์เมื่อราคาขายต่ำ การวิเคราะห์ต้นทุนควบคู่ไปกับสมบัติทางกายภาพจึงมีความสำคัญ เพื่อให้สามารถเลือกสูตรผสมที่สมดุลทั้งด้าน คุณภาพเชื้อเพลิงชีวและความคุ้มค่าเศรษฐกิจ ดังนั้น การควบคุมคุณภาพวัสดุคิบบ การปรับสัดส่วนการผสม และการลดความชื้นก่อนอัดเม็ด ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงที่มีสมบัติทางกายภาพดี มีค่าพลังงานสูง และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เหมาะสมต่อการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

สรุปผลการวิจัย

การอัดเม็ดด้วยเครื่อง 3 ลูกกลิ้ง สามารถลดความชื้นและเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงได้ดีกว่าเครื่อง 2 ลูกกลิ้ง เม็ดเชื้อเพลิงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.8–7.1 mm และความยาวกระจายตามสัดส่วนการผสม โดยสูตร 60:40 ให้ค่าความร้อนสูงสุด 12.74 MJ/kg ความหนาแน่นสูงสุด 529.5 kg/m³ ความแข็งแรงและความคงทนทุกสูตร >99% และฝุ่นละออง 1.30–1.45% อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน การเพิ่มสัดส่วนตัวประสานช่วยปรับปรุงค่าพลังงานและความหนาแน่น แต่เม็ดมีความยาวกระจายมากขึ้นเล็กน้อย ด้านเศรษฐศาสตร์ สูตร 100:0 มีต้นทุนต่ำที่สุด กำไรสุทธิสูงสุด 4,493–7,853 ฿/month และคืนทุนเร็วที่สุด 0.20–0.35 year สูตร 80:20 ต้องราคาขาย ≥8 ฿/kg จึงคืนทุนได้ ส่วนสูตร 60:40 ขาดทุนทุกกรณี การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพด้วยตัวประสานช่วยเพิ่มพลังงานและความหนาแน่น แต่เพิ่มต้นทุน ทำให้บางสูตรไม่เหมาะสมในราคาขายต่ำ ข้อเสนอแนะคือ การควบคุมคุณภาพวัตถุดิบ การลดความชื้นของก้อนเห็ดก่อนการนำไปอัดเม็ด และการควบคุมสัดส่วนตัวประสาน การปรับเปลี่ยนหรือเสริมวัตถุดิบพลังงานสูงมาเพิ่มในการผลิต เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงคุณภาพสูงเชิงความร้อนและคุ้มค่าได้ในการพัฒนาให้เป็นไปตามมาตรฐานการผลิตเชื้อเพลิง สูตรที่ 1 และ 2 เหมาะที่สุดสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลแทนการซื้อขายไม้ฟืน ขณะที่สูตรที่ 3 อาจต้องปรับสูตรการผลิต ต้นทุน ราคาขาย รวมถึงการวิเคราะห์สมบัติและเศรษฐศาสตร์ควบคู่กันเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้การผลิตยั่งยืนและนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมที่เหมาะสมได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ขอขอบคุณอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ และวิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2568). **สถานการณ์การผลิตพลังงานทั้งหมด**. สืบค้นจาก <https://www.dede.go.th>
- [2] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. (2568). **การส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลในประเทศและต่างประเทศ**. สืบค้นจาก <https://www.ditp.go.th>
- [3]. นคร ทิพย์วาศ์. (2558). **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล** (พิมพ์ครั้งที่ 2). เชียงใหม่: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [4] Anukam, A., & Berghel, J. (2021). Biomass pretreatment and characterization: a review. **Biotechnological applications of biomass**, 1-17.
- [5] Picchio, R., Latterini, F., Venanzi, R., Stefanoni, W., Suardi, A., Tocci, D., & Pari, L. (2020). Pellet production from woody and non-woody feedstocks: A review on biomass quality evaluation. **Energies**, 13(11), 2937.
- [6] Senila, L., Tenu, I., Carlescu, P., Corduneanu, O. R., Dumitrachi, E. P., Kovacs, E., ... & Roman, C. (2020). Sustainable biomass pellets production using vineyard wastes. **Agriculture**, 10(11), 501.

- [7] Pantaleo, A., Villarini, M., Colantoni, A., Carlini, M., Santoro, F., & Rajabi Hamedani, S. (2020). Techno-Economic Modeling of Biomass Pellet Routes: Feasibility in Italy. *Energies*, 13(7), 1636. <https://doi.org/10.3390/en13071636>
- [8] da Silva, S. B., Arantes, M. D. C., de Andrade, J. K. B., Andrade, C. R., Carneiro, A. D. C. O., & de Paula Protásio, T. (2020). Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. *Renewable Energy*, 147, 1870-1879.
- [9] คีร์ต สร้อยทอง, ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู, รังสิรินทร์ ณ รังษี, & จารุวัตร เจริญสุข. (2562). ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33* (2-5 กรกฎาคม 2562, จังหวัดอุดรธานี).
- [10] Malik, B., Pirzadah, T. B., Islam, S. T., Tahir, I., Kumar, M., & Rehman, R. U. (2015). Biomass pellet technology: A green approach for sustainable development. *Agricultural Biomass Based Potential Materials*, 403-433.
- [11] กรมวิชาการเกษตร. (2568). *การผลิตเห็ดนางฟ้าหรือเห็ดอื่น ๆ*. สืบค้นจาก <https://www.doa.go.th>
- [12] Jiang, L., Yuan, X., Xiao, Z., Liang, J., Li, H., Cao, L., ... & Zeng, G. (2016). A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties. *Energy Conversion and Management*, 126, 509-515.
- [13] Mortadha, H., Kerrouchi, H. B., Al-Othman, A., & Tawalbeh, M. (2025). A comprehensive review of biomass pellets and their role in sustainable energy: production, properties, environment, economics, and logistics. *Waste and Biomass Valorization*, 1-33.
- [14] ครูปกรณ์ ละเอียดอ่อน. (2564). การประยุกต์ใช้ขานอ้อย ฟางข้าว และไมยราบยักษ์เป็นวัสดุเพาะเห็ดนางรมเทา. *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร*, 39(1): 28-39.
- [15] International Organization for Standardization. (2015). ISO 17829: **Solid biofuels Determination of length and diameter of pellets**. Geneva, Switzerland: ISO.
- [16] DIN CERTCO. (2015). **DINplus: Requirements for wood pellets for use in small furnaces**. Berlin, Germany: DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH.
- [17] Makro PRO. (2568). **เอโร แป้งมันสำปะหลัง 1 กก.** สืบค้นจาก <https://www.makro.pro/th/p/837684-6814743593155>
- [18] บริษัท เอ็น เอส เอ็นเนอร์ยี จำกัด. (2568). **ชีวมวลอัดเม็ดจากไม้ Wood Pellet - Big Bag**. สืบค้นจาก <https://www.nsethailand.com/product/187451-185316>
- [19] Shoopee. (2568). **Wood Pellet 10kg ซึ่เล็ยอัดเม็ด (Size 8 mm.)**. สืบค้นจาก [https://shopee.co.th/Wood-Pellet-10kg-\(Size8mm.\)-i.196077010.16791912617](https://shopee.co.th/Wood-Pellet-10kg-(Size8mm.)-i.196077010.16791912617)