

การใช้ก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล : ผลของความชื้นต่อการอัดเม็ด

Utilization of Spent Mushroom Substrate for Biomass Fuel Pellets Production: Effect of Moisture Content on Pelletization

ศิวกร โนนสว่าง

Siwakorn Nonsawang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น ประเทศไทย

Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

สิงห์ธัญ ชารี

Singrun Charee

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

พระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย

Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology

Suvarnabhumi, PhraNakhon Si Ayutthaya, Thailand

คุณนิตี ดวงผึ้ง

Khunnithi Doungpueng

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ขอนแก่น ประเทศไทย

Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus,

Khon Kaen, Thailand

ชนินทร์ อุปัทมภ์, พิศาล หมั่นแก้ว, กันตภณ เปรมประยูร*

Chanin Oupathum, Pisal Muenkaew, Kantapon Premprayoon*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ขอนแก่น ประเทศไทย

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus,

Khon Kaen, Thailand

* Corresponding author E-mail: kantapon.pr@muti.ac.th

Received 14 March 2025; Revised 22 September 2025; Accepted 28 November 2025

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ : ก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะเห็ดที่มีปริมาณมาก และอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมหากไม่มีการจัดการอย่างเหมาะสม การนำก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วมาแปรรูปเป็นเม็ดชีวมวลเป็นแนวทางที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน อย่างไรก็ตาม ปริมาณความชื้นของก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วมีผลต่อกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระดับความชื้นต่อประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของเม็ดชีวมวลที่ได้จากก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้ว โดยพิจารณาทั้งด้านความหนาแน่น ความทนทาน ค่าความร้อน และประสิทธิภาพการผลิต

วิธีดำเนินการวิจัย : งานวิจัยนี้ใช้ก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วจากแหล่งเพาะเห็ดในประเทศไทย ตากแดดเป็นเวลา 1 3 6 7 และ 9 วัน เพื่อให้ได้ระดับความชื้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ MC32 (31.52%), MC27 (27.05%), MC21 (21.41%), MC15 (15.23%) และ MC8 (7.77%) ตามลำดับ จากนั้น นำวัสดุเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบแผ่นเพลทหมุนที่มีขนาดรูอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ประเมินสมบัติต่าง ๆ ของเม็ดชีวมวลที่ได้ ได้แก่ ประสิทธิภาพการผลิต ความสามารถในการกักตัว ขนาดมิติ ความหนาแน่นรวม ความทนทานเชิงกล และค่าพลังงานความร้อน เปรียบเทียบผลลัพธ์ทั้งหมดกับค่ามาตรฐานเพื่อระบุระดับความชื้นที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเม็ดชีวมวล

ผลการวิจัย : ระดับความชื้นมีผลต่อทั้งประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิงอย่างชัดเจน ระดับความชื้นสูง (MC32) ให้กำลังการผลิตสูงสุด (27.78 kg/hr) และการใช้พลังงานต่ำสุด (92.26 Whr/kg) แต่ความทนทานของเม็ดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ในขณะที่ระดับความชื้นต่ำ (MC8) ให้ความทนทานเพียงพอ แต่ประสิทธิภาพการผลิตต่ำและเปอร์เซ็นต์การกักตัวต่ำที่สุด (78.56%) ช่วงความชื้นที่เหมาะสมที่สุดอยู่ระหว่าง MC15–MC21 ซึ่งให้ผลการขึ้นรูปสูง (90.72%) ความทนทานเชิงกลสูงสุด (97.79%) และความหนาแน่นรวม 540–568 kg/m³ สอดคล้องกับมาตรฐาน EN ISO 17225-6 แม้จะต่ำกว่าเกณฑ์ มอก. 2772-2560 เล็กน้อย สำหรับค่าความหนาแน่นรวม และค่าพลังงานความร้อนอยู่ในช่วง 14.63–14.68 MJ/kg ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำของมาตรฐานทุกข้อ

สรุป : การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วสามารถทำได้จริง โดยระดับความชื้นมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิง พบว่า ความชื้นปานกลาง (15–21%) เหมาะสมที่สุดสำหรับการอัดเม็ด เนื่องจากช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป ความทนทาน และความหนาแน่น รวมทั้งให้ค่าความร้อนที่ตรงตามมาตรฐาน การควบคุมความชื้นวัตถุดิบจึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการพัฒนากระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือทิ้งประเภทนี้

การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ : การใช้ก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเม็ดชีวมวลมีศักยภาพในการลดปัญหาขยะจากอุตสาหกรรมเพาะเห็ดและเป็นทางเลือกสำหรับพลังงานทดแทน ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และอาจขยายไปสู่การใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทอื่น ๆ ในอนาคต ทั้งนี้ ยังเป็นไปในทิศทางของเศรษฐกิจหมุนเวียนที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

คำสำคัญ : ก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้ว, เม็ดชีวมวล, การจัดการของเสีย

Abstract

Background and Objectives: Spent mushroom substrate (SMS) is an agricultural byproduct generated in large quantity from mushroom cultivation, posing environmental concerns if not properly managed. Converting SMS into biomass pellets presents a sustainable waste

management approach that enhances resource utilization and supports circular bioeconomy principles. However, moisture content significantly affects the pelletization process and the final product quality. This study aimed to investigate the impact of moisture content level on the production efficiency and quality of biomass pellets derived from SMS, focusing on bulk density, mechanical durability, calorific value and specific energy consumption.

Methodology: SMS obtained from mushroom farms in Thailand was utilized. The substrate was sun-dried for 1, 3, 6, 7, and 9 days to achieve different moisture content levels, i.e., MC32 (31.52%), MC27 (27.05%), MC21 (21.41%), MC15 (15.23%) and MC8 (7.77%), respectively. Each dried substrate was pelletized using a rotary die pellet mill with a die diameter of 6 mm. The produced biomass pellets were evaluated for several properties, including production efficiency, pellet formation capacity, dimensional characteristics, bulk density, mechanical durability and calorific value. All results were compared with relevant standards to determine the optimal moisture content for biomass pellets production.

Main Results: Moisture content significantly influenced both production efficiency and pellet quality. High moisture content (MC32) resulted in the highest production rate (27.78 kg/hr) and the lowest energy consumption (92.26 Whr/kg); mechanical durability of the pellets was nevertheless below the standard value. Conversely, low moisture content (MC8) provided pellets with sufficient durability, but resulted in low production efficiency and the lowest pellet formation percentage (78.56%). The optimal moisture content range was MC15–MC21, which resulted in high pellet formation (90.72%), maximum mechanical durability (97.79%) and bulk density of 540–568 kg/m³, aligning with EN ISO 17225-6 standards, although slightly below the Thai Industrial Standard TIS 2772-2560 for bulk density. The calorific value ranged from 14.63–14.68 MJ/kg, exceeding all minimum standard requirements.

Conclusions: Production of biomass fuel pellets from SMS is plausible, with moisture content playing a crucial role in determining the pellet quality. Moderate moisture levels (15–21%) were found to be optimal for pelletization as they enhance pellets formation, mechanical durability and bulk density, while also providing calorific values that meet standard requirements. Controlling the moisture content of a raw material is a key strategy for improving the pellets production process from this type of agricultural waste.

Practical Application: Utilizing SMS as a raw material for the production of biomass pellets as an alternative renewable energy source exhibits potential for the reduction of waste from the mushroom cultivation industry. The present study provides a guideline for improving the efficiency

of biomass pellets production and may be extended to other agricultural residues in the future. Furthermore, it aligns with the principles of circular economy by promoting efficient resource utilization.

Keywords: Spent Mushroom Substrate, Biomass Pellet, Waste Management

Introduction

การผลิตเห็ดจากก้อนเชื้อเห็ดเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในหลายประเทศ เนื่องจากเป็นกิจกรรมที่สร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงและต้องการการลงทุนเริ่มต้นต่ำ ทำให้เกษตรกรขนาดเล็กและผู้ประกอบการสามารถเข้าถึงได้ง่าย [1] โดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร เช่น ฟางข้าว เศษไม้ และวัสดุชีวมวลอื่น ๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเห็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้แล้ว ยังมีส่วนช่วยลดปัญหาขยะเกษตรกรรมและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตามการผลิตเห็ดแต่ละครั้งก่อให้เกิดวัสดุเหลือใช้จำนวนมาก โดยทั่วไปการผลิตเห็ดกินได้ทุก ๆ 1 กิโลกรัม จะก่อให้เกิดก้อนเชื้อเห็ดที่หมดอายุประมาณ 5 กิโลกรัม [2] ปริมาณของเสียจำนวนมากนี้เป็นปัญหาสำคัญ โดยเฉพาะในฟาร์มขนาดใหญ่ที่มีการผลิตอย่างต่อเนื่อง หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสม อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขอนามัยของพื้นที่โดยรอบ [3-4]

ก้อนเชื้อเห็ดคือวัสดุเพาะเห็ดที่บรรจุในภาชนะ ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของวัสดุต่าง ๆ เช่น ขี้เลื่อย ฟางข้าว ัณูพืช และวัสดุทางการเกษตรอื่น ๆ [5] ที่ผ่านมา มีการศึกษาหลายแนวทางเพื่อใช้ประโยชน์จากก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้ว เช่น การนำไปผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์ [6] การแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดก้อน [7] และการนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ [8] อย่างไรก็ตาม แม้จะมีแนวทางการใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย แต่ก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วจำนวนมากมักถูกกำจัดโดยไม่คำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [7] นอกจากนี้ สมบัติเฉพาะของก้อนเชื้อเห็ด เช่น ค่าความร้อนต่ำเนื่องจากปริมาณความชื้นสูง และความหนาแน่นต่ำ [9] ยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการพัฒนาแนวทางการจัดการที่มีประสิทธิภาพ

การผลิตเม็ดชีวมวลเป็นกระบวนการอัดชีวมวลด้วยแรงดันทางกล เพื่อให้ได้เม็ดที่มีความหนาแน่นสูง ช่วยให้การขนส่ง การเก็บ และการใช้งานสะดวกขึ้น การเปลี่ยนของเสียจากก้อนเชื้อเห็ดให้เป็นพลังงานอาจเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพ เนื่องจากเป็นแนวทางที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริงในการจัดการของเสีย รายงานล่าสุดระบุว่าชีวมวลอัดเม็ดจากของเสียทางการเกษตรมีความหนาแน่นเชิงกลสูงขึ้น มีความหนาแน่นรวมที่เพิ่มขึ้น และช่วยปรับปรุงเสถียรภาพในการจัดเก็บ [10-11] นอกจากนี้ การศึกษาค่าความร้อนของก้อนเชื้อเห็ดที่ผ่านการอัดพบว่ามีความหนาแน่นประมาณ 17.47 MJ/kg [7] ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน มอก. 2772-2560 ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg ทั้งนี้ da Silva Alves และคณะ [3] ระบุว่ามีความเป็นไปได้ในการแปรรูปก้อนเชื้อเห็ดประเภทต่าง ๆ ที่ใช้แล้วให้เป็นเม็ดเชื้อเพลิง แนวทางการแก้ปัญหาในการผลิตเม็ดชีวมวลจากก้อนเชื้อเห็ดสามารถดำเนินการได้โดยการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เหมาะสม เช่น การควบคุมความชื้นของวัตถุดิบก่อนการอัดก้อน เพื่อลดการใช้พลังงานในการอบแห้งและเพิ่มประสิทธิภาพการอัดตัวของเม็ดชีวมวล เนื่องจาก

ชีวมวลแต่ละประเภทมีปฏิกิริยาต่อระดับความชื้นที่แตกต่างกัน [12]

ก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้ว แม้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การทำปุ๋ยอินทรีย์หรือเชื้อเพลิงอัดก้อน แต่ยังขาดการศึกษาที่มุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลโดยเฉพาะ ปัญหาหลักคือความชื้นสูงและความหนาแน่นต่ำ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการอัดเม็ดคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิง และสมรรถนะการเผาไหม้ ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการประเมินระดับความชื้นที่เหมาะสมและแนวทางปรับปรุงกระบวนการอัดเม็ดจากก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้ว โดยเปลี่ยนเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีมูลค่า เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน พร้อมพัฒนาเทคโนโลยีชีวมวลโดยปรับปรุงสมบัติวัตถุดิบให้เหมาะสมกับการอัดเม็ดและการเผาไหม้

Materials and Methods

การเตรียมวัตถุดิบ

ในการศึกษานี้ ได้รวบรวมก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วจากกลุ่มเกษตรกรเพาะเห็ดในบ้านป่าหวาย ตำบลคำเหือดแก้ว อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดกาฬสินธุ์ หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว ซึ่งก้อนเชื้อเห็ดเหล่านี้มักถูกทิ้งเนื่องจากหมดประโยชน์ในกระบวนการเพาะเห็ด ตากก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้ในการศึกษากลางแดดวันละ 8 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 1 3 6 7 และ 9 วัน ตามลำดับ จากนั้นวัดค่าความชื้น (% w/w) ของวัตถุดิบในแต่ละวัน โดยค่าความชื้นมีดังนี้: 31.52% (MC32) สำหรับวัน 1, 27.05% (MC27) สำหรับวัน 3, 21.41% (MC21) สำหรับวัน 6, 15.23% (MC15) สำหรับวัน 7 และ 7.77% (MC8) สำหรับวัน 9 จากนั้น เก็บตัวอย่างก้อนเชื้อเห็ดในถุงกันความชื้นเพื่อรักษาสภาพ แล้วนำตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ดเพื่อประเมินผลกระทบของระดับความชื้นต่อคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของก้อนเชื้อเห็ด

1. ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของตัวอย่างวัสดุจากก้อนเชื้อเห็ดที่ผ่านการตากแดดในแต่ละระยะเวลา จะใช้เครื่องอบแห้งยี่ห้อ BINDER ประเทศเยอรมนี โดยตั้งอุณหภูมิที่ 105 °C และอบตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ISO 18134-1:2015 หลังจากนั้นคำนวณความชื้นจากมวลเริ่มต้นและมวลหลังอบแห้งโดยใช้สูตรสมการที่ (1)

$$MC = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

MC แทน ความชื้นฐานเปียก (% w/w)

w_1 แทน มวลตัวอย่างก่อนอบ (g)

w_2 แทน มวลตัวอย่างหลังอบ (g)

2. ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ก้อนเชื้อเห็ดที่ผ่านกระบวนการตากแดดในแต่ละระดับความชื้นบรรจุลงในภาชนะที่มีปริมาตรที่แน่ชัดจนเต็มภาชนะ และทำการชั่งมวลตัวอย่าง EN 15103:2009 สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวมของก้อนเชื้อเห็ดที่มีระดับความชื้นแตกต่างกัน โดยใช้สมการ (2) ซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

เมื่อ

ρ แทน ความหนาแน่นรวม (kg/m^3)

m แทน มวลของวัสดุ (kg)

v แทน ปริมาตรภาชนะบรรจุ (m^3)

การทดสอบเครื่องอัดเม็ดชีวมวล

การทดสอบนี้ใช้เครื่องอัดเม็ดแบบแผ่นเพลทหมุนขนาดรูอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm โดยนำก้อนเชื้อเห็ดที่ใช้แล้วซึ่งผ่านการตากแดดเป็นเวลา 1 3 6 7 และ 9 วัน มาใช้ในการทดลอง โดยมีความชื้น (% w/w) ดังนี้: 31.52% (MC32), 27.05% (MC27), 21.41% (MC21), 15.23% (MC15) และ 7.77% (MC8) ตามลำดับ วัตถุดิบมีขนาดอนุภาค 8.50 ± 0.54 mm จากการเขย่าอนุภาคเครื่อง Sieve analysis มาทำการอัดเม็ดในเครื่องอัดเม็ด ซึ่งกำหนดให้ความเร็วรอบการอัดอยู่ที่ 120 รอบ/นาที เป็นปัจจัยที่ควบคุมในการทดสอบ จากนั้นทำการอัดเม็ดวัสดุในแต่ละระดับความชื้น โดยในระหว่างกระบวนการอัดจะมีการสุมจับตัวอย่างวัตถุดิบเม็ดที่อัดได้พร้อมทั้งจับเวลา หลังจากนั้นทำการชั่งมวลวัตถุดิบที่อัดเสร็จ (แห้ง) เพื่อนำมาคำนวณหา กำลังการผลิต ในขณะที่เดียวกันจะมีการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอัดเพื่อนำมาคำนวณหาพลังงานจำเพาะของกระบวนการอัดเม็ด ต่อมา นำวัตถุดิบชีวมวลที่อัดแล้วมาร้อนผ่านตะแกรงกลมขนาด 3.5 mm เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปของเม็ด หรือประสิทธิภาพการก่อตัว ในสมการที่ 3 สุดท้ายนำวัตถุดิบชีวมวลอัดเม็ดไปตากแดดเป็นระยะเวลา 5 วัน เพื่อลดความชื้นและเตรียมวัสดุสำหรับการประเมินสมบัติของเม็ดชีวมวลในขั้นตอนต่อไป

$$P = \frac{W_p}{W_p + W_d} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

ρ แทน ประสิทธิภาพการก่อตัวเม็ด (%)

W_p แทน น้ำหนักเม็ดเชื้อเพลิงที่ผ่านการร้อน (kg)

W_d แทน น้ำหนักฝุ่นผง (kg)

การประเมินสมบัติก้อนเชื้อเห็ดอัดเม็ด

ประเมินสมบัติของตัวอย่างเม็ดเชื้อเห็ดที่อัดแล้ว รวมถึงความชื้น (Moisture content) โดยใช้วิธีเดียวกับตัวอย่างวัสดุก้อนเชื้อเห็ดที่ผ่านการตากแดด ตามสมการ (1) สำหรับการวัดขนาดเม็ดเชื้อเพลิง ใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง โดยสุ่มตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิง 30 เม็ดจากแต่ละระดับความชื้น และคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อนำเสนอผลตามมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ด หลังจากนั้น นำก้อนเชื้อเห็ดอัดเม็ดมาหาความหนาแน่นรวม (Bulk density) ทดสอบเช่นเดียวกันกับสมการ (2) ส่วนในด้านความแข็งแรงใช้ค่าชี้วัดคือ ความคงทน (Mechanical durability) วัดตามมาตรฐาน ISO 17831-1 จากเครื่อง Rotating Drum โดยใส่เม็ดชีวมวลลงในเครื่องทดสอบ 35 รอบต่อนาที ใช้เวลา 5 นาที ในการทดสอบ ตรวจสอบการแตกหักและการสูญเสียมวล แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคงทนโดยใช้สูตรสมการ (4)

$$D_u = 100 \times \frac{WPW}{IW} \quad (4)$$

เมื่อ

D_u แทน ความคงทน (%)

WPW แทน มวลตัวอย่างที่ค้างบนแรง (g)

IW แทน มวลตัวอย่างที่ร่อนแล้วก่อนบรรจุลงในกล่องทดสอบ (g)

วิเคราะห์ค่าความร้อน (Calorific value) โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ IKA รุ่น C200 ภายในห้องปฏิบัติการเคมี มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ตัวอย่างมวลประมาณ 0.5–1 g ถูกบรรจุในเครื่องและเผาไหม้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน เครื่องจะวัดและบันทึกพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ โดยค่าความร้อนที่ได้จะแสดงผลในหน่วยเมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg)

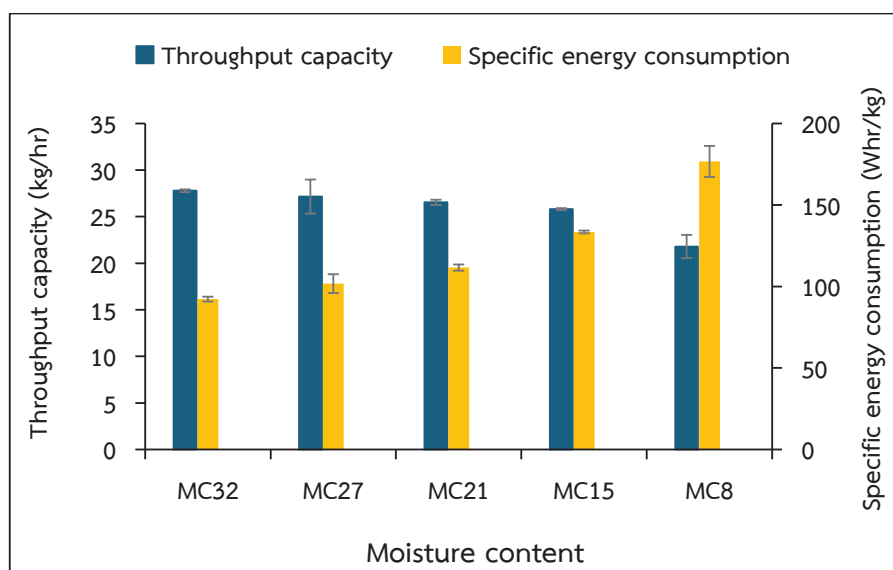


Figure 1 Throughput capacity and specific energy consumption values of spent mushroom substrate pellets

Results and Discussion

ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงแลกเปลี่ยนที่ชัดเจนระหว่างความสามารถในการผลิต และการใช้พลังงานจำเพาะในเครื่องจักรที่ทดสอบการผลิตเม็ดชีวมวลจากวัสดุเพาะเห็ดใช้แล้ว (Figure 1) พบว่าเมื่อระดับความชื้นในการอัดลดลง ความสามารถในการผลิตลดลงเล็กน้อยจาก MC32 ถึง MC15 แต่พลังงานจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับ MC8 (7.77% w/w) การใช้พลังงานสูงสุดแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการผลิตที่ต่ำสุด ซึ่งบ่งชี้ถึงความไม่มีประสิทธิภาพในการทำงาน ในทางกลับกัน MC32 ซึ่งมีปริมาณความชื้นสูงสุด (31.52%) แสดงประสิทธิภาพที่สมมูลกว่า โดยมีความสามารถในการผลิตสูง (27.78 kg/hr) และมีการใช้พลังงานต่ำกว่า (92.26 Whr/kg) ผลการค้นพบนี้สอดคล้องกับการศึกษาล่าสุดที่พบว่าปริมาณความชื้นที่ลดลงจะทำให้ความต้องการพลังงานระหว่างการผลิตเม็ดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงเสียดทานที่มากเกินไประหว่างอนุภาคชีวมวลและแม่พิมพ์อัดเม็ด [13] อีกทั้งความสามารถการผลิตน้อยลงต่อหน่วยเวลาโดยเพิ่มแรงเสียด [14-15] การวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการอัดเม็ดชีวมวลขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นเป็นอย่างมาก และการควบคุมพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ไม่ดีสามารถทำให้เกิดความแปรปรวนซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง

การปรับปริมาณความชื้นของวัตถุดิบให้เหมาะสมเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดแรงเสียดทาน และความต้องการพลังงาน ความชื้นที่มากเกินไปอาจนำไปสู่ความทนทานของเม็ดลดลงและความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นดังที่แสดงในการทดลองที่มีระดับความชื้นที่แตกต่างกัน [16] การประเมินคุณภาพของก้อนเชื้อเห็ดอัดเม็ดอย่างครอบคลุมจะช่วยให้การตัดสินใจว่า ความสามารถในการผลิตและพลังงานที่ใช้คุ้มค่าหรือไม่ หรือจำเป็นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการเพิ่มเติม

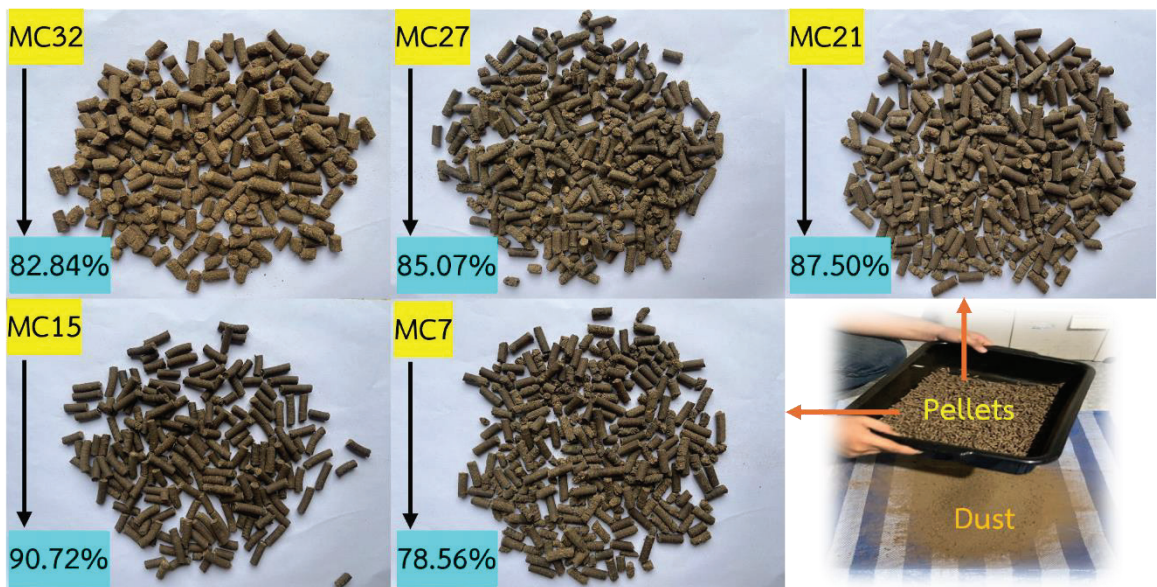


Figure 2 Pelleted spent mushroom substrates at different moisture levels (MC32-MC8), with arrows indicating the percentage of pellets formation after sieving

ประสิทธิภาพการก่อตัวของก้อนเชื้อเห็ดอัดเม็ดจะแตกต่างกันไปตามปริมาณความชื้น ดังที่แสดงใน Figure 2 เปอร์เซ็นต์แสดงถึงสัดส่วนของเม็ดที่ก่อตัวหรือการขึ้นรูปสำเร็จหลังจากการอัดเม็ดแล้วผ่านการร่อน ซึ่งเน้นย้ำถึงอิทธิพลของความชื้นต่อคุณภาพของเม็ด ระดับความชื้นจาก MC32-MC15 มีแนวโน้มช่วยเพิ่มการยึดเกาะของเม็ด ทำให้ได้ผลผลิตเม็ดที่สมบูรณ์มากขึ้น การขึ้นรูปวัสดุสูงสุดใน MC15 (15.23% w/w) คือ 90.72% ในขณะที่ระดับความชื้นใน MC8 การขึ้นรูปต่ำสุดคือ 78.56% กลับส่งผลให้มีสัดส่วนของเศษผงและเม็ดแตกหักเพิ่มขึ้น การสังเกตนี้สอดคล้องกับการวิจัยก่อนหน้านี้ที่ระบุว่าความชื้นที่เพียงพอเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการยึดเกาะของอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพในระหว่างกระบวนการอัดเม็ด [12] ความชื้นที่ไม่เพียงพอจะลดความยืดหยุ่นของวัสดุชีวมวล ทำให้ความสมบูรณ์ของเม็ดไม่ดี ในขณะที่ความชื้นที่มากเกินไปอาจขัดขวางการบีบอัดและนำไปสู่ความไม่เสถียรทางโครงสร้าง [17] ดังนั้น การปรับปริมาณความชื้นให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการบรรลุการขึ้นรูปของเม็ดคุณภาพสูงโดยมีการสูญเสียวัสดุน้อยที่สุด

Table 1 Pelleted fuel properties from spent mushroom substrates and standard values

Example	Moisture content (%)	Diameter (mm)	Length (mm)
MC32 (31.52%)	8.57 $\pm$ 0.11	6.37 $\pm$ 0.20	18.55 $\pm$ 1.10
MC27 (27.05%)	8.43 $\pm$ 0.21	6.30 $\pm$ 0.07	17.79 $\pm$ 1.49
MC21 (21.41%)	8.46 $\pm$ 0.15	6.24 $\pm$ 0.11	18.22 $\pm$ 2.02
MC15 (15.23%)	7.86 $\pm$ 0.19	6.21 $\pm$ 0.06	18.78 $\pm$ 2.71
MC8 (7.77%)	7.54 $\pm$ 0.14	6.15 $\pm$ 0.06	18.43 $\pm$ 2.32
TIS 2772-2560	<15	6-25 $\pm$ 1	3.15-40.00
ISO 17225-6	$\leq$ 15	6-10	3.15-40.00

Note: Numbers after $\pm$ are standard deviation values.

จาก Table 1 ปริมาณความชื้นของก้อนเชื้อเห็ดอัดเม็ดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อระดับความชื้นในการผลิตลดลง เป็นผลมาจากการคายความชื้นของวัสดุในระหว่างกระบวนการตากแดด 5 วันหลังการอัดเม็ด รวมถึงโครงสร้างที่ถูกอัดแน่นทำให้ความชื้นภายในถูกขับออกเหลือบางส่วน และเม็ดเชื้อเพลิงมีการปรับตัวเข้าสู่สมดุลความชื้นกับบรรยากาศโดยรอบ ส่งผลให้ค่าความชื้นลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างแต่ละช่วงเวลา แต่ทั้งนี้ตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2772-2560 และ EN ISO 17225-6 การรักษาปริมาณความชื้นของวัสดุให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 10% ถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการจัดเก็บที่ดีเพื่อป้องกันความไม่เสถียรทางกล และประสิทธิภาพการเผาไหม้ [18-19]

Table 1 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้อยู่ในช่วง 6.15-6.37 mm ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ด ระดับความชื้นที่ลดลงในระหว่างกระบวนการอัดส่งผลกระทบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความชื้นมีบทบาทสำคัญต่อการคลายตัวของชีวมวลหลังการอัดเม็ด สำหรับความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตภายใต้ระดับความชื้น MC32-MC8 พบว่าอยู่ระหว่าง

17.79-18.78 mm ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐาน มอก. 2772-2560 และ EN ISO 17225-6 (3.15-40.00 mm) ซึ่งบ่งชี้ว่าเงื่อนไขการอัดที่ใช้สามารถผลิตเม็ดเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพตรงตามข้อกำหนดทางอุตสาหกรรม

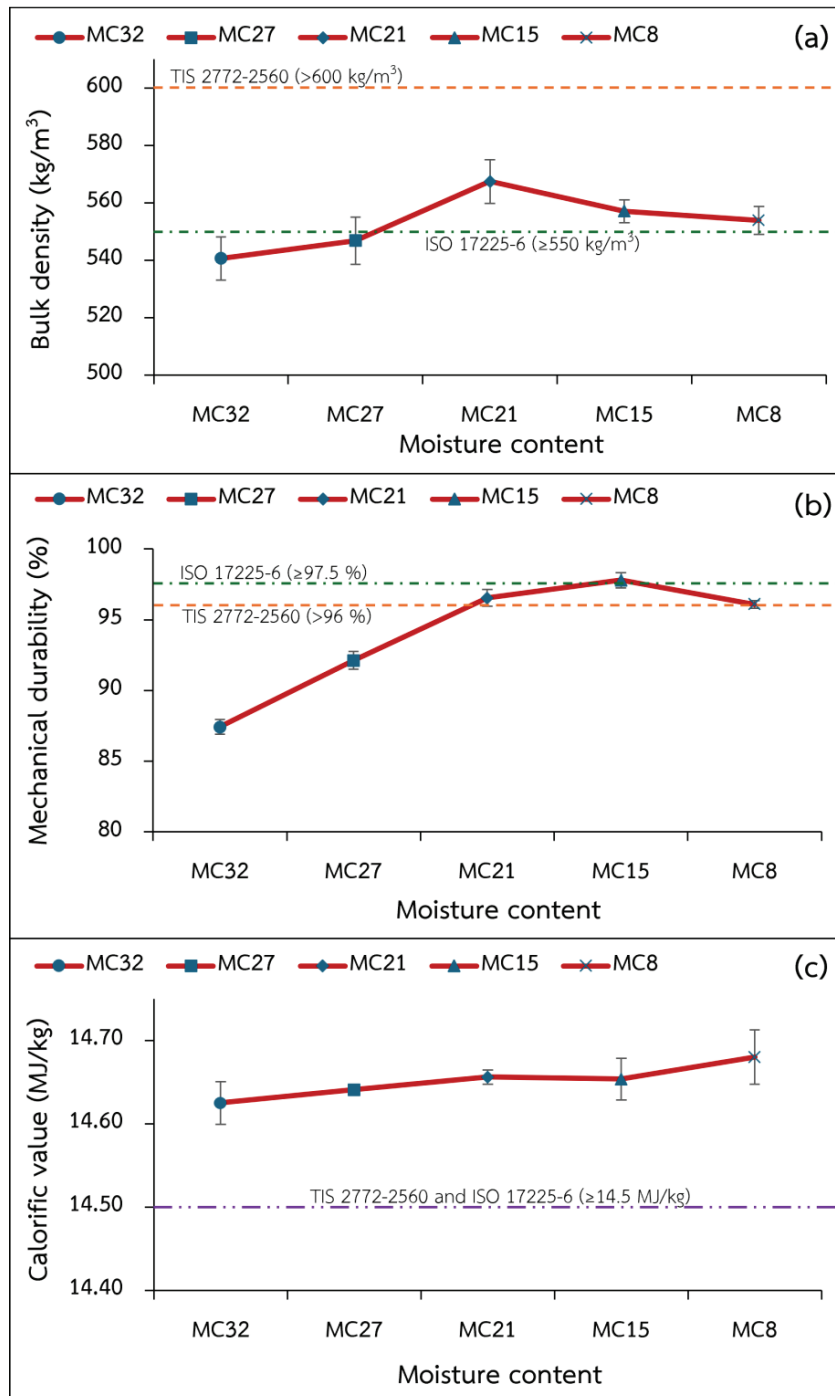


Figure 3 Effect of moisture content on bulk density (a), mechanical durability (b), and calorific value (c) of pellets produced from spent mushroom substrate

ความหนาแน่นรวมที่สูงขึ้นช่วยให้สามารถเก็บชีวมวลได้มากขึ้นในพื้นที่ที่เล็กกว่า เพิ่มประสิทธิภาพสิ่งแวดล้อมในการจัดเก็บ [20] ผลการศึกษานี้พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วง 540.62-567.74 kg/m³ (Figure 3) ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดของมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย (มอก. 2772-2560, >600 kg/m³) แต่สอดคล้องกับมาตรฐาน EN ISO 17225-6 (≥ 550 kg/m³) เฉพาะในกลุ่ม MC21, MC15 และ MC8 โดยเฉพาะ MC21 (21.41%) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นรวมสูงที่สุด ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกันกับการศึกษาของ Zulkornain และคณะ [21] ที่ศึกษาชีวมวลอัดเม็ดจากต้น *caragana korshinskii* kom. และ Xu และคณะ [22] ที่ผลิตชีวมวลจากแกลบร่วมนางข้าว โดยพบว่าวาระดับความชื้นประมาณ 20% สามารถให้เม็ดคุณภาพสูงได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมกับสารยึดเกาะที่เหมาะสม การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นว่าความชื้นในระดับปานกลางสามารถส่งเสริมการอัดตัวของอนุภาคชีวมวล การเปลี่ยนแปลงของความชื้นในระหว่างกระบวนการอัดส่งผลต่อแนวโน้มความหนาแน่นรวม โดยพบว่าในกลุ่ม MC32 ถึง MC21 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นก่อนจะลดลงในกลุ่ม MC15-MC8 อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้จากบทบาทของความชื้นที่ช่วยเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคชีวมวลในช่วงความชื้นที่เหมาะสม แต่เมื่อความชื้นสูงเกินไป อาจทำให้เกิดการสะสมของไอน้ำภายในโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดการคลายตัวของเม็ดเชื้อเพลิงหลังการอัด [23] นอกจากนี้ เนื่องจากวัตถุดิบไม่ได้ผ่านการบดย่อยลดขนาด คล้ายกับกระบวนการผลิตชีวมวล จึงมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ การเพิ่มขึ้นตอนการลดขนาดอนุภาคอาจช่วยให้เม็ดเชื้อเพลิงบรรจุแน่นขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมสูงขึ้นและมีโอกาสถึงเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ การพิจารณาเติมตัวประสานที่เหมาะสม หรือการผสมกับชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ชีวมวลไม้ อาจเป็นแนวทางเสริมที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงได้

Figure 3 แสดงผลลัพธ์ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเม็ดจากวัสดุเพาะเห็ดที่ใช้แล้วที่มีความชื้นต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่กำหนดไว้ในมอก. (TIS) 2772-2560 (>96.0%) และ EN ISO 17225-6 ($\geq 97.5\%$) ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าเชื้อเพลิงเม็ดที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงกว่า (MC32 และ MC27) จะมีความหนาแน่นต่ำกว่า โดยมีค่าอยู่ที่ 87.42% และ 92.13% ตามลำดับ เมื่อความชื้นลดลง ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเม็ดจะดีขึ้น โดย MC15 (ความชื้น 15.23%) มีความหนาแน่นสูงที่สุดที่ 97.79% ซึ่งตรงตามมาตรฐาน EN ISO 17225-6 อย่างไรก็ตาม MC8 (ความชื้น 7.77%) แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นที่ลดลงเล็กน้อย (96.08%) แม้ว่าจะยังคงเป็นไปตามข้อกำหนด มอก. 2772-2560 ก็ตาม ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาครั้งก่อนซึ่งระบุว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดชีวมวล ความชื้นที่มากเกินไปทำให้อัดแน่นได้ไม่ดีและโครงสร้างไม่แข็งแรง ในขณะที่ความชื้นที่ไม่เพียงพอจะลดการขึ้นรูป ซึ่งส่งผลต่อการยึดเกาะกันของเม็ดชีวมวล [24-25] อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลประสิทธิภาพการก่อตัวใน Figure 2 โดยชี้ให้เห็นว่าช่วงความชื้นระหว่าง 15% (MC15) ถึง 21% (MC21) เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดชีวมวล เนื่องจากระดับความชื้นดังกล่าวช่วยให้ลิกนินทำงานและยึดเกาะได้ดีขึ้นระหว่างกระบวนการอัดเม็ด ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์การก่อตัวสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความหนาแน่นของเม็ดชีวมวลได้

Figure 3 แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเม็ด (MC32–MC8) ที่ได้จากวัสดุเพาะเห็ดที่ใช้แล้ว พบว่าตัวอย่างทั้งหมดอยู่ระหว่าง 14.63 ถึง 14.68 MJ/kg ซึ่งตรงตามหรือเกินข้อกำหนด EN ISO 17225-6 (≥ 14.5

MJ/kg) และมาตรฐานไทย (>14.5 MJ/kg) เล็กน้อย ซึ่งบ่งชี้ว่าเชื้อเพลิงเม็ดที่ใช้วัสดุเพาะเห็ดที่ใช้แล้วมีปริมาณพลังงานเพียงพอสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล แม้ว่าค่าความร้อนจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่สามารถอธิบายได้จากความชื้นของวัสดุที่นำมาทดสอบ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและเป็นวัสดุประเภทเดียวกัน ระดับความชื้นในการอัดขึ้นรูปอาจไม่ได้ส่งผลโดยตรง แต่สามารถมีผลกระทบโดยอ้อมได้ [26] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่าความร้อนจะเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด แต่ก็ไม่ได้สูงขึ้นมากนัก ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดในการแข่งขันเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น เช่น ชีวมวลอัดเม็ดจากไม้ โดยชีวมวลเม็ดไม้มักจะมีค่าความร้อนตั้งแต่ 16.5 MJ/kg ถึง 19.18 MJ/kg ขึ้นอยู่กับประเภทของชีวมวลและสภาพการผลิต [27-28] ผู้วิจัยจึงแนะนำให้มีการปรับปรุงหรือเสริมวัสดุชีวมวลที่มีค่าพลังงานเชิงความร้อนสูง เพื่อเพิ่มปริมาณพลังงานของเชื้อเพลิงเม็ดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Conclusions

การศึกษารั้วนี้ชี้แจงถึงปริมาณความชื้นมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของเม็ดชีวมวลจากวัสดุเพาะเห็ดที่ใช้แล้ว ระดับความชื้นที่ต่ำลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตเม็ดชีวมวลลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานและการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความชื้นมากเกินไปจะลดความทนทานของเม็ดชีวมวลและความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ช่วงความชื้นที่เหมาะสมที่สุดในการอัดเม็ดอยู่ระหว่าง 15% ถึง 21% ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการผลิตที่ยอมรับได้ ความทนทานสูงสุด และความหนาแน่นรวมที่เหมาะสม นอกจากนี้ เม็ดชีวมวลที่ผลิตได้ทั้งหมดยังเป็นไปตามข้อกำหนดค่าความร้อนขั้นต่ำ อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นรวมของตัวอย่างบางส่วนต่ำกว่ามาตรฐานไทย ซึ่งบ่งชี้ถึงความจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการหรือการเติมสารเสริม การศึกษายืนยันว่าการควบคุมความชื้นที่เหมาะสมช่วยให้เม็ดชีวมวลดีในด้านการจัดการ และลดการใช้พลังงานในการอัดเม็ด โดยรวมแล้วถือเป็นแนวทางการจัดการขยะทางการเกษตร และใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ การวิจัยในอนาคตควรศึกษาสารเติมแต่งหรือการผสมวัสดุชีวมวลชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงความหนาแน่น และค่าพลังงานสูงขึ้น ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้มีส่วนช่วยขยายแนวทางการใช้ประโยชน์จากวัสดุเพาะเห็ดที่ใช้แล้ว และพัฒนาเทคโนโลยีชีวมวลให้สามารถตอบโจทย์ด้านพลังงานสะอาดและการจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

Limitations

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดเม็ดแบบแผ่นเพลทหมุนขนาดรูอัด 6 mm ซึ่งอาจจำกัดการประเมินผลสำหรับเครื่องอัดเม็ดขนาดอื่นหรือการผลิตในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ ความแปรผันในสมบัติของวัตถุดิบเพาะเห็ดที่ใช้แล้ว เช่น ส่วนประกอบชนิดที่ผลิตมาจากแหล่งเดียวทางกายภาพ และทางเคมี อาจมีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดเม็ดและคุณภาพของเม็ดชีวมวล ผลลัพธ์จึงอาจแตกต่างหากใช้วัสดุหรือเงื่อนไขการทดลองที่แตกต่าง การศึกษารั้วต่อไปจึงควรพิจารณาปัจจัยเหล่านี้เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความทั่วไปของผลการทดลอง

References

1. Kalpana, M., Balakrishnan, N., Rajavel, M. and Divya, M. 2024. A Review on economic viability and challenges in mushroom agribusiness in Tamil Nadu, India. *Asian Journal of Current Research*, 9, 135-142.
2. Chang, B.V., Yang, C.P. and Yang, C.W. 2021. Application of fungus enzymes in spent mushroom composts from edible mushroom cultivation for phthalate removal. *Microorganisms*, 9, 1989.
3. a Silva Alves, L., de Almeida Moreira, B.R., da Silva Viana, R., Pardo-Gimenez, A., Dias, E.S., Noble, R. and Zied, D.C. 2021. Recycling spent mushroom substrate into fuel pellets for low-emission bioenergy producing systems. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127875.
4. Li, X., Chen, G., Li, X. and Yao, F. 2023. Three pleurotus mushroom species ultivated in a mixed phragmites australis substrate differ in nutrient utilization capacity. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 104924.
5. Miah, M.N., Begum, A., Shelly, N.J., Bhattacharjya, D.K., Paul, R.K. and Kabir, M.H. 2017. Effect of different sawdust substrates on the growth, yield and proximate composition of white oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Bioresearch Communications (BRC)*, 3, 397-410.
6. Ngan, N.M. and Riddech, N. 2021. Use of spent mushroom substrate as an inoculant carrier and an organic fertilizer and their impacts on roselle growth (*Hibiscus sabdariffa* L.) and Soil Quality. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 3801-3811.
7. Kamal Baharin, N.S., Koesoemadinata, V.C., Nakamura, S., Azman, N.F., Muhammad Yuzir, M.A., Md Akhir, F.N., Iwamoto, K., Yahya, W.J., Othman, N., Ida, T. and Hara, H. 2020. Production of bio-coke from spent mushroom substrate for a sustainable solid fuel. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 4095-4104.
8. Rangubhet, K.T., Mangwe, M.C., Mlambo, V., Fan, Y.K. and Chiang, H.I. 2017. Enteric methane emissions and protozoa populations in Holstein steers fed spent mushroom (*Flammulina velutipes*) substrate silage-based diets. *Animal Feed Science and Technology*, 234, 78-87.
9. Ma, X., Yan, S. and Wang, M. 2025. Spent mushroom substrate: A review on present and future of green applications. *Journal of Environmental Management*, 373, 123970.

10. Sui, H., Chen, J., Cheng, W., Zhu, Y., Zhang, W., Hu, J., Jiang, H., Shao, J. and Chen, H. 2024. Effect of oxidative torrefaction on fuel and pelletizing properties of agricultural biomass in comparison with non-oxidative torrefaction. *Renewable Energy*, 226, 120423.
11. Nath, B., Chen, G., Bowtell, L. and Nguyen-Huy, T. 2025. Enhancement of wheat straw pellet quality for bioenergy through additive blending. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 75, 387-404.
12. Jagtap, A. and Kalbande, S. 2023. Effect of moisture content and particle size on haracteristics of fuel pellets using flat die type pelleting machine. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13, 174-182.
13. Yılmaz, H., Topakcı, M., Çanakcı, M. and Karayel, D. 2022. Effect of die geometry and moisture content on pelletizing of palm pruning residues. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19, 204-214.
14. Nguyen, Q.N., Cloutier, A., Stevanovic, T. and Achim, A. 2017. Pressurized hot water treatment of sugar maple and yellow birch wood particles for high quality fuel pellet production. *Biomass and Bioenergy*, 98, 206-213.
15. Ungureanu, N., Vladuț, V., Paraschiv, G., Ionescu, M., Zabava, B.S. and Grigore, I. 2016. Production status of biomass pellets–Review. *Annals of the University of Craiova-Agriculture Montanology Cadastre Series*, 46, 574-581.
16. Jiang, X., Cheng, W., Liu, J., Xu, H., Zhang, D., Zheng, Y. and Cai, H. 2020. Effect of moisture content during preparation on the physicochemical properties of pellets made from different biomass materials. *BioResources*, 15, 557.
17. Matúš, M., Križan, P., Šooš, L.U. and Beniak, J. 2015. Effects of initial moisture content on the physical and mechanical properties of Norway Spruce Briquettes. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 9, 1227-1233.
18. Triatmoko, J., Arifin, F. and Bow, Y. 2023. Comparison moisture of biopellet from sugarcane bagasse and coconut dregs as raw materials for co-firing power plant. *Journal of Mechanical, Civil and Industrial Engineering*, 4, 34-39.
19. Sadeq, A., Frank, A., Tyslik, M., Jägers, J., Pietsch-Braune, S., Scherer, V. and Heinrich, S. 2023. Influence of cyclic water content changes during long-term storage on the mechanical stability of wood pellets. *Powder Technology*, 428, 118866.

20. Rosales-Serna, R., Carrillo-Parra, A., Rios-Saucedo, J.C., Reyes-Jáquez, D., Sierra-Zurita, D., Santana-Espinoza, S., Jiménez-Ocampo, R., Domínguez-Martínez, P.A. and Nava-Berumen, C.A. 2024. Biomass densification to improve management efficiency and to obtain high value products in México. *Resources*, 13, 48.
21. Zulkornain, M.F., Mohd Rawian, N.A., Neshaeimoghaddam, H., Shamsuddin, A.H., Md Saad, J., Abd Rahman, A., Samsuri, S. and Naning, F.H. 2022. Influence of organic binder and moisture content on the durability of rice husk and rice straw-based pellets. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 19, 1-6.
22. Xu, X., Yu, G., Wang, J., Xu, X., Zhang, W. and Xu, Y. 2024. Study on preparation technology of high-quality biomass fuel pellets using *Caragana korshinskii* Kom. Powder. *Wood Research*, 69, 157-168.
23. Scott, C., Desamsetty, T.M. and Rahmanian, N. 2024. Unlocking power: Impact of physical and mechanical properties of biomass wood pellets on energy release and carbon emissions in power sector. *Waste and Biomass Valorization*, 16, 441-458.
24. Styks, J., Knapczyk, A. and Łapczyńska-Kordon, B. 2021. Effect of compaction pressure and moisture content on post-agglomeration elastic springback of pellets. *Materials*, 14, 879.
25. Lee, J.S., Sokhansanj, S., Lau, A.K., Lim, J. and Bi, X.T. 2021. Moisture adsorption rate and durability of commercial softwood pellets in a humid environment. *Biosystems Engineering*, 203, 1-8.
26. Tumuluru, J.S., Rajan, K., Hamilton, C., Pope, C., Rials, T.G., McCord, J., Labbé, N. and André, N.O. 2022. Pilot-scale pelleting tests on high-moisture pine, switchgrass, and their blends: Impact on pellet physical properties, chemical composition, and heating values. *Frontiers in Energy Research*, 9, 788284.
27. Gorzelany, J., Zardzewiaty, M., Murawski, P. and Matłok, N. 2020. Analysis of selected quality features of wood pellets. *Agricultural Engineering*, 24, 25-34.
28. Marian, G., Gelu, I., Gudîma, A., Nazar, B., Istrate, B., Banari, A., Pavlenco, A. and Daraduda, N. 2023. Calorific value of pellets produced from raw material collected from both sides of the river Prut. *Journal of Engineering Science*, 29, 126-13.