



บทความวิจัย

ผลกระทบของความชื้นต่อสมรรถนะและคุณภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขานอ้อย

กันตภณ เปรมประยูร, วีรยุทธ จีเพชร, วิริยะ แสงทน, ภาคิไนย์ ภูวกเดชา, สุกัญญา ทองโยธี และ ชนินทร์ อุปลัมภ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตดอนแก่น

วสันต์ ตัวคำจันทร์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 8058 9398 อีเมล: chanin9398@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2025.01.002

รับเมื่อ 16 กันยายน 2567 แก้ไขเมื่อ 26 พฤศจิกายน 2567 ตอรับเมื่อ 6 มกราคม 2568 เผยแพร่ออนไลน์ 27 มกราคม 2568

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของระดับความชื้นที่แตกต่างกัน (10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์) ต่อสมรรถนะและคุณภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขานอ้อยคั้นน้ำ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีศักยภาพในการนำไปแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า การทดลองพบว่า ระดับความชื้น 15 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง โดยให้กำลังการผลิตสูงสุดที่ 70.65 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงในระดับความชื้นดังกล่าวมีความคงทนสูงสุด (98.25 ± 0.41 เปอร์เซ็นต์) และค่าความร้อน (16.11 ± 0.06 เมกะจูล/กก.) ที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงเป็นไปตามมาตรฐาน ในขณะที่ความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วง 535.00–575.88 กก./ลบ.ม. ซึ่งยังต่ำกว่าค่ามาตรฐานทุกค่าที่กำหนดโดย มอก. 2772–2560 ซึ่งให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับปรุงอุปกรณ์การผลิต ระดับความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้สมรรถนะการอัดเม็ดลดลงอย่างชัดเจน และค่าความคงทนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดการวัตถุดิบ เช่น การควบคุมความชื้นและการเตรียมวัสดุอย่างเหมาะสม เพื่อเพิ่มคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในระดับอุตสาหกรรม เช่น การปรับปรุงเครื่องจักร กระบวนการจัดเก็บ และการขนส่ง ตลอดจนการสร้างฐานข้อมูลเพื่อสนับสนุนการจัดการวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมน้ำอ้อยให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืนในอนาคต

คำสำคัญ: วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ชีวมวลอัดเม็ด การเพิ่มมูลค่า การจัดการของเสีย

การอ้างอิงบทความ: กันตภณ เปรมประยูร, วีรยุทธ จีเพชร, วิริยะ แสงทน, ภาคิไนย์ ภูวกเดชา, สุกัญญา ทองโยธี, ชนินทร์ อุปลัมภ์ และ วสันต์ ตัวคำจันทร์, “ผลกระทบของความชื้นต่อสมรรถนะและคุณภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขานอ้อย,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 4, หน้า 1–11, เลขที่บทความ 254-067696, ต.ค.-ธ.ค. 2568.



Effects of Moisture Content on the Performance and Quality of Sugarcane Bagasse Biomass Pellet

Kantapon Premprayoon, Veerayut Jeepetch, Wiriya Dangeton, Phakinai Phupuakdech, Sukanya Thongyothee and Chanin Oupathum*

Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Khon Kaen, Thailand

Wasan Duangkhamchan

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 8058 9398, E-mail: chanin9398@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2025.01.002

Received 16 September 2024; Revised 26 November 2024; Accepted 6 January 2025; Published online: 27 January 2025

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This study analyzes the effects of varying moisture levels (10%, 15%, and 20%) on the performance and quality of pelletized fuel made from sugarcane bagasse obtained from juice extraction. This agricultural waste material holds significant potential for value-added processing. The experiment revealed that a moisture level of 15% was optimal for producing pelletized fuel, achieving the highest production rate of 70.65 kg/hour. The pellets produced at this moisture level exhibited the highest durability ($98.25 \pm 0.41\%$) and calorific value (16.11 ± 0.06 MJ/kg), both of which meet industry standards. Additionally, the diameter and length of the pellets conformed to the required specifications. However, the bulk density ranged from 535.00 to 575.88 kg/m³, which falls below the values specified by the Thai Industrial Standard (TIS) 2772–2560, highlighting the need for equipment improvements. At a moisture level of 20%, pelletizing performance significantly decreased, and durability fell below the acceptable threshold. These findings underscore the importance of raw material management, including precise moisture control and material preparation, to enhance pellet quality and production efficiency. This research provides a foundation for industrial applications, such as equipment optimization, storage, and transportation processes. Furthermore, it contributes to the development of a comprehensive database to support the efficient and sustainable management of agricultural residues in the sugarcane industry.

Keywords: Agricultural Waste, Pelleted Biomass, Value Addition, Waste Management

Please cite this article as: K. Premprayoon, V. Jeepetch, W. Dangeton, P. Phupuakdech, S. Thongyothee, C. Oupathum, and W. Duangkhamchan, "Effects of moisture content on the performance and quality of sugarcane bagasse biomass pellet," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 4, pp. 1–11, ID. 254-067696, Oct.–Dec. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตน้ำอ้อยได้รับความนิยมนอย่างมากในหลายประเทศที่มีการทำเกษตรกรรม เช่น ประเทศไทย อินเดีย และบราซิล และประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกน้ำตาลรายใหญ่เป็นอันดับสองของโลก รองจากบราซิล โดยมียอดการส่งออกน้ำตาลประมาณ 11 ล้านตัน [1] การคั้นน้ำอ้อยเพื่อผลิตน้ำอ้อยบริสุทธิ์นั้นมักจะเหลือเศษวัสดุเหลือทิ้งที่เรียกว่า ขานอ้อย ซึ่งปัจจุบันถูกนำไปใช้ประโยชน์ไม่มากนัก ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดด้วยวิธีการเผาทิ้ง ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนในชุมชนใกล้เคียง [2]

ขานอ้อยในอุตสาหกรรม คือ วัสดุที่เหลือหลังจากที่ถูกบดให้เป็นเส้นใยหลังจากการสกัดน้ำตาลจากอ้อย และเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงงานน้ำตาล [3] อย่างไรก็ตาม ขานอ้อยเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตพลังงาน เช่น ความหนาแน่นต่ำ ความชื้นสูง (>50%) [4], [5] ความหนาแน่นที่ต่ำเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานเชิงพาณิชย์ การอัดเป็นเม็ดจึงเป็นวิธีที่พิสูจน์ให้เห็นว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการใช้ขานอ้อยส่วนเกิน [6] การผลิตเม็ดชีวมวลเป็นกระบวนการอัดชีวมวล (ปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างอนุภาค ส่วนประกอบ และแรง) โดยใช้แรงดันเชิงกลเพื่อผลิตเม็ดชีวมวลที่เพิ่มความหนาแน่นและอำนวยความสะดวกในการจัดการ เช่น การขนส่ง การจัดเก็บ และการใช้งาน [7] การศึกษาที่ผ่านมาได้ประเมินการใช้เชื้อเพลิงจากขานอ้อยถูกนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงหลักในโรงงานผลิตน้ำตาล และมีศักยภาพสูง [8], [9] ขานอ้อยแห้งประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 45% เฮมิเซลลูโลส 28% ลิกนิน 20% น้ำตาล 5% แร่ธาตุ 1% และเถ้า 1% ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้คล้ายกับองค์ประกอบของไม้ และทำให้มันเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีศักยภาพสำหรับการเพิ่มมูลค่า [10] ค่าความร้อนของขานอ้อยแห้งที่ไม่มีเถ้าอยู่ระหว่าง 17,632 กิโลจูล/กิโลกรัม ถึง 19,400 กิโลจูล/กิโลกรัม [11] อ้อยส่วนใหญ่จะถูกส่งเข้าโรงงานน้ำตาลเพื่อแปรรูปเป็นน้ำตาล และอ้อยอีกชนิด คือ อ้อยคั้นน้ำ ที่ถูกนำ

มาคั้นเป็นน้ำอ้อยสดมีขายกันอยู่ทั่วไปเพราะเป็นที่นิยมของผู้บริโภค ผลพลอยได้จากการนำลำอ้อยที่ถูกนำมาหีบเอาน้ำอ้อยยังมีวัสดุเหลือทิ้ง คือ ขานอ้อย ซึ่งยังไม่พบการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเชื้อเพลิงอัดเม็ดอย่างจริงจัง อีกทั้งกระบวนการอัดเม็ดยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการอัดเม็ดหลายอย่าง เช่น ขนาดอนุภาค ความชื้น แรงในการอัด เป็นต้น

การปลูกอ้อยเพื่อการผลิตน้ำอ้อยมีแนวโน้มที่จะเติบโตอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย จากพื้นที่เพาะปลูกอ้อยคั้นน้ำราว 120,000 ไร่ สามารถผลิตน้ำอ้อยเฉลี่ย 336 ล้านลิตร มีมูลค่าประมาณ 16,800 ล้านบาท (ราคา 50 บาทต่อลิตร) [12] ในปัจจุบันพบอ้อยคั้นน้ำพันธุ์ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยให้น้ำอ้อยเฉลี่ย 3,622 ลิตรต่อไร่ ซึ่งสูงกว่าพันธุ์เดิมร้อยละ 26 และให้ผลผลิตอ้อย 11.43 ตันต่อไร่ พิสูจน์แล้วว่าอ้อยคั้นน้ำสร้างผลตอบแทนมากกว่าอ้อยโรงงานถึง 10 เท่า [13] ด้วยเหตุนี้ตลาดน้ำอ้อยในภาคธุรกิจการเกษตรและการบริโภคจึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น [14] การเติบโตของอ้อยที่ใช้ในการคั้นน้ำสามารถช่วยเพิ่มปริมาณของวัสดุเหลือทิ้ง (ขานอ้อย) ในอนาคต การนำขานอ้อยจากการคั้นน้ำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากขานอ้อยมีองค์ประกอบและปริมาณที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพได้ดี ในอุตสาหกรรมน้ำตาลขานอ้อย คือ วัสดุที่เหลือหลังจากที่ถูกบดให้เป็นเส้นใยหลังจากการสกัดน้ำตาลจากอ้อย และเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของโรงงานน้ำตาล [15] ซึ่งอ้อย 1 ตัน จะผลิตขานอ้อยได้ 280 กิโลกรัม (ที่ความชื้น 50%) [16] นักวิจัยที่ผ่านมาได้พิสูจน์ให้เห็นว่าการอัดเม็ดขานอ้อยเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการใช้ขานอ้อยส่วนเกิน [6], [17], [18] ขานอ้อยที่ได้จากการคั้นน้ำอ้อยประกอบด้วยไฟเบอร์สูง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับขานอ้อยที่ได้จากการสกัดน้ำตาล และมีสมบัติที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเปลี่ยนแปลงฐานวัตถุดิบที่ไม่ถูกนำมาใช้ให้เป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดยังมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขานอ้อยจำเป็นเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่เหมาะสม การศึกษารังนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้



รูปที่ 1 ชานอ้อยจากการคั้นน้ำอ้อย

ในการนำชานอ้อยจากการคั้นน้ำอ้อยมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยมุ่งเน้นไปที่การประเมินปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด เช่น ความชื้นของชานอ้อย เปรียบเทียบคุณภาพตามมาตรฐาน การศึกษานี้จะรวมถึงการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชานอ้อยที่ได้จากการคั้นน้ำอ้อย และการทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตขึ้นโดยเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่นๆ เพื่อประเมินความสามารถในการใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง การศึกษาในครั้งนี้จะช่วยส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตชีวมวลและการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนในอนาคต และจัดการขยะทางเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมวัตถุดิบชานอ้อยก่อนการอัดเม็ด

เก็บรวมชานอ้อยที่ได้จากการคั้นน้ำอ้อยในแหล่งอำเภอมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น (รูปที่ 1) พันธุ์สุพรรณบุรี 50 หลังจากนั้นนำวัสดุมาตากแดดเพื่อลดความชื้นต่ำกว่า 10% ฐานเปียก จากนั้นนำชานอ้อยแห้งมาหاسبัตถิทางกายภาพ

2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพชานอ้อย

สมบัติทางกายภาพชานอ้อยมีวิธีการ คือ นำชานอ้อยแห้งถูกสุ่มวัดโดยไม้บรรทัดขนาด 36 นิ้ว และเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ได้แก่ ความกว้าง ความยาว และความหนา ต่อมา

นำชานอ้อยบรรจุในภาชนะที่ทราบปริมาตรที่แน่ชัดจนเต็มภาชนะ และนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวม [19] จากสมการที่ (1) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กก./ลบ.ม.)

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

เมื่อ

ρ คือ ความหนาแน่นรวม (กก./ลบ.ม.)

m คือ น้ำหนักของวัสดุ (กก.)

v คือ ปริมาตรภาชนะบรรจุ (ลบ.ม.)

มุกกอง คือ การหาขนาดของมุก นำไปใช้เพื่อการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้เก็บรักษา เช่น ซิโล (Silo) ฮอปเปอร์ (Hopper) อุปกรณ์ลำเลียง (Conveyor) ให้มีขนาดที่รองรับวัสดุได้อย่างเหมาะสม เพราะวัสดุจะมีมุกกองเป็นยอดแหลมทำให้เสียปริมาตรด้านข้างไปจำนวนหนึ่ง ต้องออกแบบชุดเขยปริมาตรส่วนที่หายไปด้วย โดยทำการวางจุชานอ้อยให้เป็นกองพะเนิน จากนั้นวัดความสูงของกองวัสดุ และเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานกอง ภายหลังจากอยู่ในสภาพสมดุล โดยคำนวณหามุกกองจากสมการที่ (2)

$$AOR = \tan^{-1} \left(\frac{h}{r} \right) \quad (2)$$

เมื่อ

AOR คือ มุกกองวัสดุ (องศา)

H คือ ความสูงของวัสดุโดยวัดจากปลายกระบอกขึ้นมา (ซม.)

R คือ รัศมีกระบอกตวงปริมาตร (ซม.)

หลังจากนั้นนำชานอ้อยเข้าเครื่องสับย่อยวัสดุเกษตรแบบชุดใบมีดจานสับ 4 ใบมีดพร้อมย่อยในชุดเดียวกัน ซึ่งมีตะแกรงเหล็กกรูกลมคัดขนาด 3 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของเครื่องสับย่อย 1,000 รอบต่อนาที กระทำการทดสอบจนเพียงพอต่อการศึกษา ซึ่งชานอ้อยก่อนเข้าเครื่องอัดเม็ดมีความชื้น $8.72 \pm 0.63\%$ และมีขนาดอนุภาค 2.17 มม. จากการเขย่าอนุภาคเครื่อง Sieve Analysis

2.3 ทดสอบเครื่องอัดเม็ดชีวมวล

การทดสอบการอัดเม็ดชีวมวลชานอ้อยใช้เครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบลูกกลิ้งอัดขนาดรูอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. สำหรับการเตรียมตัวอย่างก่อนอัดเม็ด ผงชานอ้อยที่ผ่านการสับย่อยถูกปรับความชื้นให้ได้ตามค่าที่กำหนดโดยการผสมน้ำตามสูตรผสมสมการที่ (3) [20] โดยมีปัจจัยที่ศึกษาในงานนี้คือ ระดับความชื้น 3 ระดับ ได้แก่ 10 15 และ 20% w/w กำหนดความเร็วรอบการอัดที่ 120 รอบ/นาที เป็นปัจจัยควบคุม

$$W_w = W_s \times \frac{m_f - m_i}{100 - m_f} \quad (3)$$

เมื่อ

W_w คือ น้ำหนักของน้ำ (กรัม)

W_s คือ น้ำหนักชีวมวล (กรัม)

m_f คือ ความชื้นสุดท้าย หรือความชื้นที่ต้องการผสมให้ได้ความชื้นที่ทดสอบ (%)

m_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง (%)

จากนั้นทำการอัดเม็ดแต่ละปัจจัย ในระหว่างนั้นสูบล้างวัสดุที่อัดได้ พร้อมจับเวลา หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักวัสดุ (แห้ง) เพื่อคำนวณค่ากำลังการผลิต ต่อมานำวัสดุชีวมวลร่อนผ่านตะแกรงกลม 3.5 มม. เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูป และนำวัสดุชีวมวลอัดเม็ดจากชานอ้อยไปตากแดดลดความชื้น 5 วัน เพื่อนำไปประเมินสมบัติเม็ดชีวมวลต่อไป

2.4 ประเมินสมบัติชานอ้อยอัดเม็ด

ตัวอย่างชานอ้อยที่เป็นเม็ดถูกประเมินสมบัติต่าง ๆ คือ ความชื้น (Moisture Content) ใช้เครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C อบตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน [21] คำนวณความชื้นโดยใช้สูตรสมการที่ (4)

$$Mc = \frac{w1 - w2}{w1} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ

Mc คือ ความชื้นฐานเปียก (% w/w)

$W1$ คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

$W2$ คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

ต่อมาหาขนาดเชื้อเพลิงอัดเม็ดชานอ้อยวัดจากอุปกรณ์เวอร์เนียคาลิเปอร์ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ด หลังจากนั้นนำชานอ้อยอัดเม็ดมาหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ทดสอบเช่นเดียวกันกับสมการที่ (1) ในด้านความแข็งแรงใช้ค่าชีวิตคือ ความคงทน (Durability) ถูกวัดตามมาตรฐาน ISO 17831-1 [22] จากเครื่อง Rotating Drum โดยใส่เม็ดชีวมวลลงในเครื่องทดสอบ 35 รอบต่อนาที ใช้เวลา 5 นาทีในการทดสอบ ตรวจสอบการแตกหักและการสูญเสียมวลแล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคงทนโดยใช้สูตรสมการที่ (5)

$$D_u = 100 \times \frac{WPW}{IW} \quad (5)$$

เมื่อ

D_u คือ ความคงทน (%)

WPW คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ค้างบนแรง (g)

IW คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ร่อนแล้วก่อนบรรจุลงในกล่องทดสอบ (กรัม)

สุดท้ายค่าความร้อน (Calorific Value) ใช้เครื่องบอมแคลอรีมิเตอร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ยี่ห้อ IKA รุ่น C200 น้ำหนักตัวอย่างที่ต้องการวัด (ประมาณ 0.5–1 กรัม) ใส่ในเครื่อง จากนั้นทำการเผาไหม้ตัวอย่างในสภาพที่มีออกซิเจน (ในเครื่องบอม Calorimeter) เครื่องจะวัดและบันทึกค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ ค่าความร้อนที่ได้จะถูกแสดงเป็น (เมกะจูล/กก.)

3. ผลการทดลอง และอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพชานอ้อย และผลการประเมินสมรรถนะเครื่องอัดเม็ดชีวมวล

การศึกษาศักยภาพของชานอ้อยเป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยประเมินความเหมาะสมของวัสดุ การปรับปรุงกระบวนการผลิตและการจัดการวัตถุดิบ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์สมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขานอ้อยคั้นน้ำ และงานวิจัยเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขานอ้อย

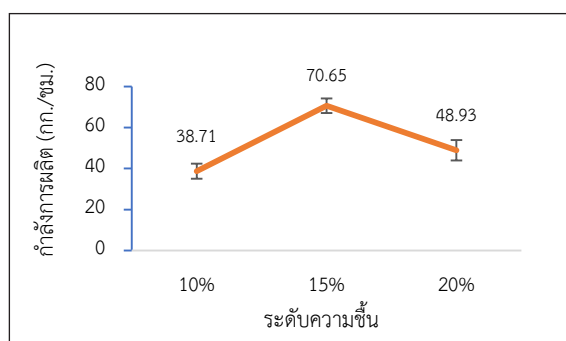
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความยาว (มม.)	ความชื้น (%)	ความหนาแน่นรวม (กก./ลบ.ม.)	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กก.)	ความคงทน (%)
ขานอ้อย 10%	6.64 ±0.19	12.52 ±2.01	5.27 ±0.13	575.88 ±17.95	16.08 ±0.09	98.39 ±0.51
ขานอ้อย 15%	6.52 ±0.18	16.92 ±1.16	5.91 ±1.58	568.86 ±11.33	16.11 ±0.06	98.25 ±0.41
ขานอ้อย 20%	6.48 ±0.29	9.72 ±1.98	6.20 ±1.87	535.00 ±6.94	16.08 ±0.10	93.53 ±0.38
มอก. 2772-2560	6-25 ±1	3.15-40.00	<15	>600	>14.5	96.0
[18]	6.27	20.40	<10	696.98	>14.5	97.90
[23]	6.5 ±0.2	35.9±1.4	10.9 ±0.3	560.05 ±2.3	17.7 ±0.5	95.9 ±0.8

ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งต้องคำนึงถึงความแปรปรวนของขนาดและรูปร่างของวัตถุดิบ แสดงผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

จากตารางที่ 1 ช่วงความกว้างของขานอ้อยมีตั้งแต่ 34.00–38.00 มม. ช่วงความยาวของขานอ้อยมีตั้งแต่ 22.34–22.88 มม. ในขณะที่ความหนามีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น 1.26–1.67 มม. โดยรวมแล้วขานอ้อยที่ศึกษาแสดงถึงความสม่ำเสมอในแง่ของความกว้างและความยาว แต่มีความหลากหลายมากขึ้นในด้านความหนา ซึ่งอาจเป็นเพราะขนาดของลำอ้อยคั้นน้ำมีความแตกต่างกัน ความหนาแน่นรวมเฉลี่ยอยู่ที่ 151.02 ± 11.03 กก./ลบ.ม. (ตารางที่ 1) ใกล้เคียงกับการศึกษาขานอ้อยของ [24] ที่ความหนาแน่น 130 กก./ลบ.ม. การรู้ความหนาแน่นรวมของวัสดุช่วยในการวางแผนการขนส่งและจัดเก็บอย่างมีประสิทธิภาพ และทำนายลักษณะทางกายภาพของส่วนผสม [25] ซึ่งเป็นค่าที่ช่วยในการประเมินการขนส่งและการจัดเก็บวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมุมมองของขานอ้อยที่ได้มีค่าเฉลี่ยที่ 50.08 ± 19.28 องศา ซึ่งมีประโยชน์ในการคาดการณ์ความเสถียรของกองวัสดุและการออกแบบพื้นที่เก็บ

จากสมการ (3) ผลการศึกษาการปรับระดับความชื้นของขานอ้อย สำหรับขานอ้อยน้ำหนัก 1 กิโลกรัม แต่ละปัจจัยที่มีความชื้น $8.72 \pm 0.63\%$ พบว่า เมื่อต้องการความชื้นสุดท้ายที่ 10% 15% และ 20% ต้องเติมน้ำ 14.20 73.80 และ 141.00 กรัม ตามลำดับ

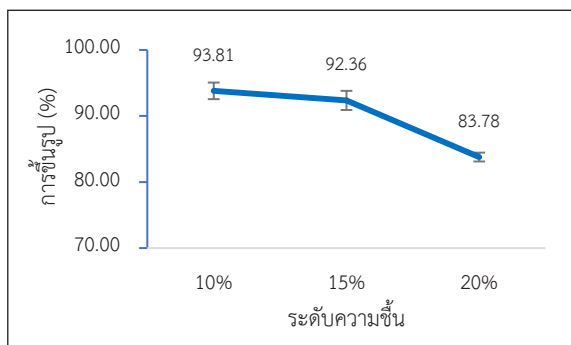
การประเมินสมรรถนะของเครื่องอัดเม็ดชีวมวลเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการวิเคราะห์ และประเมินประสิทธิภาพ

**รูปที่ 2** ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นกับกำลังการผลิตขานอ้อยอัดเม็ด

ของกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังต่อไปนี้

ผลการประเมินสมรรถนะเครื่องอัดเม็ดชีวมวลดังรูปที่ 2 พบว่า กำลังการผลิตมีผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน โดยที่ระดับความชื้น 10–15% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความชื้นเพิ่มขึ้นถึง 20% มีแนวโน้มกำลังการผลิตลดลง เนื่องจากวัสดุมีความชื้นและอ่อนนุ่มเกินไป ผลลัพธ์แสดงถึงความสำคัญของความชื้นที่เหมาะสมในการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ กำลังการผลิตสูงสุดที่ระดับความชื้นในการผลิตเม็ดชีวมวล คือ 15% ที่ 70.65 กก./ชม.

รูปที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปของเม็ดชีวมวลพบว่า เมื่อระดับความชื้นเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปของเม็ดชีวมวลลดลง ซึ่งสูงสุด 93.81% ที่ระดับความชื้น 10% และน้อยสุดที่ระดับความชื้น 20% คือ 83.78% ความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเม็ดชีวมวล



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นกับเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปขานอ้อยอัดเม็ด

ลดลง เหตุผลอาจทำให้ความสามารถในการยึดติดของวัสดุลดลง ส่งผลให้เม็ดชีวมวลมีคุณภาพในการขึ้นรูปต่ำลง การลดลงของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปอาจเกิดจากการที่ความชื้นที่มากขึ้นทำให้วัสดุมีความนุ่มและไม่สามารถรักษารูปร่างได้ดีเท่าที่ควร

3.2 ผลการประเมินสมบัติขานอ้อยอัดเม็ด

ผลการประเมินสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขานอ้อย ผลการทดลองในด้านความชื้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ความหนาแน่นรวม ความคงทน และค่าความร้อนของขานอ้อยอัดเม็ดสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

3.2.1 ความชื้น

จากตารางที่ 1 เมื่อความชื้นของขานอ้อยอัดเม็ดเพิ่มขึ้น จาก 10% w/w เป็น 20% w/w ค่าความชื้นขานอ้อยอัดเม็ดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (จาก 5.27 เป็น 6.20 %) โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางบวกซึ่งเป็นแนวโน้มที่คาดไว้ การเปรียบเทียบกับมาตรฐานแสดงให้เห็นว่าทุกระดับความชื้นที่ระบุในตารางที่ 1 ยังอยู่ภายในข้อกำหนดมาตรฐานมอก. 2772-2560 (ไม่เกิน 15% w/w) ดังนั้น การควบคุมความชื้นจึงเป็นไปตามข้อกำหนดที่กำหนดไว้

3.2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาว

จากตารางที่ 1 ข้อมูลความชื้นที่ทดลอง (10% 15% 20%) มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของขานอ้อยอัดเม็ดที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดโดยมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ด



รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพขานอ้อยอัดเม็ด

เส้นผ่านศูนย์กลางทั้งหมดที่ระดับความชื้น 10 15 และ 20% (6.64 ± 0.19 6.52 ± 0.18 และ 6.48 ± 0.29 มม. ตามลำดับ) อยู่ในช่วงที่กำหนดโดยมาตรฐาน (6 มม. ถึง 25 มม.) และอยู่ในค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 มม. ของค่าระบุในใกล้เคียงกับการศึกษาที่ผ่านมา [23] ความยาวข้อมูลทดลองทั้งหมดที่ระดับความชื้น 10-20% (12.52 มม. 16.92 มม. 9.72 มม. ตามลำดับ) อยู่ในช่วงมาตรฐาน (3.15 มม. ถึง 40.00 มม.) สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 6 มม. ถึง 10 มม. การเพิ่มระดับความชื้นของขานอ้อยอัดเม็ดทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางลดลงและความยาวเพิ่มขึ้นจนถึงความชื้น 15% ก่อนลดลงที่ความชื้น 20% (รูปที่ 4) แม้ว่าความชื้นที่สูงขึ้นส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางลดลงและความยาวเพิ่มขึ้น แต่ระดับความชื้น 20% ส่งผลให้ขนาดลดลงเนื่องจากวัสดุมีความชื้นและไม่คงตัว ซึ่งบ่งบอกถึงผลกระทบของความชื้นต่อคุณภาพของเม็ดอัดที่ต้องควบคุมอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้มาตรฐานที่ต้องการ

3.2.3 ความหนาแน่นรวม

ผลลัพธ์ความหนาแน่นรวมของขานอ้อยอัดเม็ดในทุกะดับความชื้น (10 15 และ 20%) ต่ำกว่ามาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดทั้งในระดับคุณภาพ 1 และ 2 ซึ่งอยู่ระหว่าง 535.00-575.88 กก./ลบ.ม. แต่ใกล้เคียงกับการศึกษาก่อนหน้านี้ [23] เมื่อระดับความชื้นเพิ่มขึ้นความหนาแน่นรวมลดลงสอดคล้องกับการศึกษาครั้งก่อน [26] เนื่องจากน้ำแทรกซึมระหว่างอนุภาคมากขึ้นทำให้อนุภาคอัดตัวไม่แน่น ปริมาตรเพิ่มขึ้นแต่มวลคงที่ ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง [27] ดังนั้นควรศึกษาปัจจัยด้านเครื่องผลิตเพื่อปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงให้สามารถมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เช่น ความเร็วรอบ อย่างไร

ก็ตามการอัดเม็ดชีวมวลสามารถเพิ่มความหนาแน่นรวมได้ถึง 3-4 ความหนาแน่นรวมสามารถคาดการณ์ปริมาณวัสดุที่ต้องขนส่งและจัดเก็บ ทำให้การวางแผนมีประสิทธิภาพขึ้น [28]

3.2.4 ความคงทน

จากตารางที่ 1 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าความคงทนของขานอ้อยอัดเม็ดจะลดลงเมื่อระดับความชื้นเพิ่มขึ้น ที่ระดับความชื้น 10% และ 15% ความคงทนของผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด (มาตรฐานมอก. 2772-2560 กำหนดไม่น้อยกว่า 96.0 % w/w) แต่ที่ระดับความชื้น 20% ความคงทนลดลงต่ำกว่ามาตรฐานซึ่งบ่งชี้ว่าผลกระทบความชื้นที่สูงขึ้นส่งผลต่อสมบัติการใช้งานของขานอ้อยอัดเม็ด [29] เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นความทนทานของเม็ดจะลดลงในลักษณะเดียวกัน เพราะหากวัตถุดิบชีวมวลมีความชื้นมากเกินไป น้ำจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น ซึ่งสอดคล้องกับ Sanchumpu และคณะ [18] ความทนทานที่สูงของเม็ดชีวมวล จะรับประกันคุณภาพสูงและลดการสูญเสียของเม็ดในระหว่างการจัดการและการขนส่ง [30]

3.2.5 ค่าความร้อน

จากตารางที่ 1 ค่าความร้อนสำหรับขานอ้อยอัดเม็ดที่ระดับความชื้น 10 15 และ 20% มีความใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 16.08 ถึง 16.11 เมกะจูล/กก. ค่าความร้อนนี้แตกต่างกันเล็กน้อยเหตุผล คือ ความชื้นวัสดุที่นำมาหาค่าความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน และเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ระดับความชื้นในการอัดขึ้นรูปไม่ได้ส่งผลโดยตรง แต่อาจส่งผลโดยอ้อม [31] ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการศึกษาเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขานอ้อยก่อนหน้านี้ที่มีค่าความร้อน 17.65 ± 0.8 เมกะจูล/กก. [23] ซึ่งหมายความว่าวัสดุที่มีศักยภาพเป็นเชื้อเพลิง

4. สรุป

การปรับปรุงการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขานอ้อยจากกระบวนการคั้นน้ำอ้อย สรุปได้ว่า ระดับความชื้นส่งผลกระทบต่อสมรรถนะเครื่องจักรและคุณภาพวัสดุโดยระดับความชื้นที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต คือ 15% w/w ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการอัดเม็ดและสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จใน

การบรรลุวัตถุประสงค์หลัก ได้แก่ การประเมินสมบัติทางกายภาพขานอ้อย สมรรถนะเครื่องผลิตชีวมวลอัดเม็ด และสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดของขานอ้อย แต่ทั้งนี้ผู้วิจัยขอเสนอแนะให้ทดสอบปัจจัยด้านเครื่องจักรที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้มีคุณภาพสูงสุด การศึกษานี้ไม่เพียงแต่มีความสำคัญในการสร้างฐานข้อมูลเชิงวิชาการแต่ยังสามารถจัดการกับปริมาณขานอ้อยที่เพิ่มขึ้นในอนาคตงานวิจัยเกี่ยวกับสูตรที่เหมาะสมนี้ยังสามารถพัฒนาต่อยอดในด้านการปรับปรุงเครื่องจักรเพื่อเพิ่มคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิง และประเมินการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมการผลิต เช่น การใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานน้ำตาลและโรงไฟฟ้าชีวมวล การผลิตเม็ดชีวมวลเหล่านี้ไม่เพียงช่วยลดของเสียจากการเกษตร แต่ยังเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้พร้อมทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตามสัญญาเลขที่ EMG 1/66

เอกสารอ้างอิง

- [1] United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service. (2022). Sugar: World Markets and Trade. U.S. Department of Agriculture. [Online]. Available: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/sugar.pdf>
- [2] Alokika, Anu, A. Kumar, V. Kumar, and B. Singh, "Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 169, pp. 564-582, 2021.
- [3] M. J. B. Kabeyi and O. A. Olanrewaju, "Preliminary design of a bagasse based firm power plant for a sugar factory," in *2021 Southern African*

- Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Jan. 2021, pp. 1-9.
- [4] M. Soleimani, X. L. Tabil, R. Grewal, and L. G. Tabil, "Carbohydrates as binders in biomass densification for biochemical and thermochemical processes," *Fuel*, vol. 193, pp. 134-141, Apr. 2017.
- [5] J. S. Tumuluru, "Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass," *Carbon Resources Conversion*, vol. 1, no. 1, pp. 44-54, Apr. 2018.
- [6] X. Chen, J. Liang, P. Liao, W. Huang, J. He, and J. Chen, "Effect of process parameters and raw material characteristics on the physical and mechanical quality of sugarcane bagasse pellets," *Biomass and Bioenergy*, vol. 154, pp. 106242, Nov. 2021.
- [7] T. Sung-inthara, S. Juntahum, K. Senawong, S. Katekaew, and K. Laloon, "Pelletization of soil amendment: Optimizing the production and quality of soil amendment pellets from compost with water and biochar mixtures and their impact on soil properties," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 33, pp. 103505, Feb. 2024.
- [8] M.J.B.Kabeyi and O.A.Olanrewaju, "Performance analysis and electricity potential for Nzoia sugar factory," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 755-764, Dec. 2022.
- [9] S. Majid, M. Talaeipour, H. Khademieslam, and B. Bazayr, "Investigation of physical and thermal properties of fuel briquettes made of bagasse," *Bioresources*, vol. 17, no. 2, pp. 2053-2073, Feb. 2022.
- [10] J. Nikodinovic-Runic, M. Guzik, S. T. Kenny, R. Babu, A. Werker, and K. E. O'Connor, "Carbon-rich wastes as feedstocks for biodegradable polymer (polyhydroxyalkanoate) production using bacteria," *Advances in Applied Microbiology*, vol. 84, pp. 139-200, Jun. 2013.
- [11] E. Hugot, *Handbook of Cane Sugar Engineering*, 3rd ed. Elsevier, 2014.
- [12] Department of Plant and Agricultural Materials Control. The Best Sugarcane Variety 'Kok. Suphanburi 1'. [Online]. Available: https://web.facebook.com/permalink.php/?story_fbid=517531280526091&id=100068076707389&_rdc=1&_rdr.
- [13] Division of Seed Development Research, "Guide for producing pre-variety sugarcane juice 'Sri Samrong 1'," Department of Agriculture, Apr. 2023.
- [14] P. Thinkum, "Research and development on sugarcane for juice and other local products," Department of Agriculture, Bangkok, Thailand, 2021.
- [15] M.J.B.Kabeyi and O.A.Olanrewaju, "Development of a cereal grain drying system using internal combustion engine waste heat," in *11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Singapore, Mar. 2021.
- [16] A. K. Chandel, S. S. da Silva, W. Carvalho, and O. V. Singh, "Sugarcane bagasse and leaves: Foreseeable biomass of biofuel and bio-products," *Journal of Chemical Technology &*



- Biotechnology*, vol. 87, no. 1, pp. 11–20, Nov. 2012.
- [17] A. Akbar, U. Aslam, A. Asghar, and Z. Aslam, “Effect of binding materials on physical and fuel characteristics of bagasse-based pellets,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 150, pp. 106118, Jul. 2021.
- [18] P. Sanchumpu, W. Suaili, S. Nonsawang, C. Junsiri, P. Ansuree, and K. Laloon, “Biomass pellet processing from sugar industry byproducts: A study on pelletizing behavior and energy usage,” *Sustainability*, vol. 16, no. 14, pp. 6035, Jul. 2024.
- [19] *Solid biofuels — Determination of bulk density*, BS EN 15103:2009, 2009.
- [20] C. Dorsey-Redding, C. R. Hurburgh, L. A. Johnson, and S. R. Fox, “Adjustment of maize quality data for moisture content,” *Cereal Chemistry*, vol. 67, no. 3, pp. 292–295, Nov. 1990.
- [21] *Geotechnical Investigation and Testing. Laboratory Testing of Soil. Part 5: Incremental Loading Oedometer Test*, UNE-EN ISO 17892-5, 2017.
- [22] *Solid Biofuels—Determination of Mechanical Durability of Pellets and Briquettes—Part 1: Pellets*, ISO 17831-1, 2015.
- [23] B. R. de Almeida Moreira, M. R. Barbosa Júnior, A. L. de Brito Filho, and R. P. da Silva, “Production of high-quality biogenic fuels by co-pelletization of sugarcane bagasse with pinewood sawdust and peanut shell,” *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 14, no. 5, pp. 6797–6820, May. 2024.
- [24] C. J. L. G. Navalta, K. G. C. Banaag, O. R. Von Adrian, A. W. Go, L. K. Cabatingan, and Y. H. Ju, “Solid fuel from co-briquetting of sugarcane bagasse and rice bran,” *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 1941–1958, 2020.
- [25] L. Nunes, M. Pasalodos-Tato, I. Alberdi, A. C. Sequeira, J. A. Vega, V. Silva, and F. C. Rego, “Bulk density of shrub types and tree crowns to use with forest inventories in the Iberian Peninsula,” *Forests*, vol. 13, no. 4, pp. 555, Mar. 2022.
- [26] I. Ahmed, A. Ali, B. Ali, M. Hassan, S. Hussain, H. Hashmi, Z. Ali, A. Soomro, and K. Mukwana, “Production of pellets from furfural residue and sawdust biomass: Effect of moisture content, particle size and a binder on pellet quality and energy consumption,” *BioEnergy Research*, vol. 15, pp. 1292–1303, Sep. 2022.
- [27] J. S. Lee, S. Sokhansanj, A. K. Lau, and C. J. Lim, “Physical properties of wood pellets exposed to liquid water,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 142, pp. 105748, Nov. 2020.
- [28] D. Rajkumar and P. Venkatachalam, “Physical properties of agro residual briquettes produced from cotton, soybean and pigeon pea stalks,” *International Journal on Power Engineering and Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 414–417, Jan. 2013.
- [29] J. S. Tumuluru, K. Rajan, C. Hamilton, C. Pope, T. G. Rials, J. McCord, N. Labbé, and N. O. André, “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*, vol. 9, pp. 788284, Jan. 2022.
- [30] A. A. Siyal, L. Yang, B. Ali, M. Hassan, C. Zhou, X. Li, I. Ahmed, A. Soomro, G. Liu, and J. Dai,



“Characterization and quality analysis of biomass pellets prepared from furfural residue, sawdust, corn stalk, and sewage sludge,” *Fuel Processing Technology*, vol. 241, pp. 107620, Mar. 2023.

[31] J. S. Tumuluru, K. Rajan, C. Hamilton, C. Pope,

T. G. Rials, J. McCord, and N. O. André, “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*, vol. 9, pp. 788284, Jan. 2022.

