

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพอัดเม็ดจากการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วิจิตรา สิงห์หิรัญสูตรณ์^{1*} ปณิตทัต ลือโสภา² และ วิชชุดา ภาโสสม³

¹ศูนย์สหวิทยาการการวิจัยเพื่อความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

²สำนักงานพลังงานจังหวัดหนองคาย กระทรวงพลังงาน

³คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

¹ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

²195/1 ถนนเฉลิมพระเกียรติ ตำบลหนองกอมเกาะ อำเภอเมืองหนองคาย จังหวัดหนองคาย 43000

³680 ถนนนิตโย ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

รับบทความ 16 สิงหาคม 2567 แก้ไขบทความ 13 มิถุนายน 2568 ตอรับบทความ 3 กรกฎาคม 2568

บทคัดย่อ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล อย่างไรก็ตามชีวมวลประเภทนี้มีคุณสมบัติและองค์ประกอบที่หลากหลาย และมีความผันแปรตามฤดูกาล แนวคิดการผสมผสานชีวมวลจึงเป็นกลยุทธ์ที่จะสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดดังกล่าว และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานให้แก่วัสดุ การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) ใบอ้อย (SL) ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) รวมทั้งศึกษาเทคนิคการผสมผสานวัสดุเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีคุณภาพ การศึกษาได้คำนึงถึงปริมาณผลผลิตที่สามารถนำไปใช้ได้ตามฤดูกาล โดยให้ RB, RW, และ SL เป็นวัสดุหลักซึ่งมีปริมาณมากในพื้นที่ และวัสดุที่เหลือซึ่งมีปริมาณน้อยเป็นวัสดุเสริม ผลการศึกษาพบว่า CL, SL และ CR เป็นกลุ่มชีวมวลที่มีค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value: HHV) สูงสุด คือ 19.29, 17.49 และ 16.92 MJ/kg ตามลำดับ ในขณะที่ RB และ RW มีค่าความร้อนสูงที่ต่ำกว่า (14.20 และ 14.31 MJ/kg ตามลำดับ) และมีระดับที่ต่ำกว่ามาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด ดังนั้นจึงได้เสนอแนวทางการผสมผสานวัสดุชีวมวล เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางพลังงานของวัสดุในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยเทคนิคการผสมผสานวัสดุ 2 ชนิด พบว่า วัสดุผสม SL:RW (80:20) มีค่าความร้อนที่สูงที่สุด 16.08 MJ/kg ในขณะที่การผสมผสานวัสดุ 3 ชนิด พบว่า วัสดุผสม SL:RW:RB (60:20:20) ให้ค่าความร้อนสูงถึง 15.68 MJ/kg การเพิ่มอัตราส่วนวัสดุเสริมที่มีค่าความร้อนสูงอย่างใบมัน (CL) และเหง้ามัน (CR) เป็นวัสดุผสม ส่งผลให้คุณภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดสูงขึ้น ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสมผสาน RW:CL (50:50) ให้ค่าความร้อนสูงถึง 16.25 MJ/kg แนวทางการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถแก้ปัญหาค่าความผันแปรของวัสดุตามฤดูกาล และเป็นทางเลือกในการใช้วัสดุเหลือทิ้งเพื่อผลิตเชื้อเพลิง ลดปัญหาการขาดแคลนวัสดุและราคาค่าต้นทุนที่สูงในบางฤดูกาล การใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การลดการเผาวัสดุหลังเก็บเกี่ยว ได้เชื้อเพลิงที่เป็นกลางทางคาร์บอน และสนับสนุนให้เกิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

คำสำคัญ : ชีวมวล; วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร; เชื้อเพลิงชีวภาพ; เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6881 5868, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: swichitra@gmail.com

Production of Biofuel Pellet by Blending Agricultural Residues

Wichitra Singhirunnusorn^{1*} Pannatat Luesopa² and Witchuda Pasom³

¹Multidisciplinary Research Center for Environmental Sustainability (MRCES), Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University

²Provincial Energy Office of Nong Khai, Ministry of Energy

³Faculty of Science and Technology, Rajabhat Sakon Nakhon University

¹Khamriang Sub-District, Kantarawichai District, Maha Sarakham Province, 44150

²195/1 Chalermphakiat Road, Nong Komkoh Sub-District, Mueang District, Nong Khai Province, 43000

³680 Nityo Road, That Choeng Chum Sub-District, Mueang District, Sakon Nakhon Province, 47000

Received 16 August 2024; Revised 13 June 2025; Accepted 3 July 2025

Abstract

Agricultural residues have significant potential as feedstock for biomass power plants. However, they have high variation of properties, compositions, and seasonal availability. Blending material becomes a promising strategy for addressing these limitations and improving the energy efficiency of residues. This study examines the properties and characteristics of five biomass materials including rice stubble (RB), rice straw (RW), sugar cane leaves (SL), cassava leaves (CL), and cassava rhizome (CR). Material blending strategy is examined based on seasonal availability in order to produce biomass pellet. RB, RW, and SL are categorized as the primary materials, with the remaining materials serving as supplements. The results show that CL, SL, and CR have the highest Higher Heating Value (HHV) of 19.29, 17.49, and 16.92 MJ/kg, respectively. Meanwhile, RB and RW show lower HHV levels (14.20 MJ/kg and 14.31 MJ/kg, respectively), which are below the heat standard of biomass pellet. To improve the energy property of pellets, the biomass blending techniques were suggested. The two-type blending technique reveals that SL:RW at 80:20 ratio has the maximum heat value of 16.08 MJ/kg. Three-type blending shows that SL:RW:RB in a 60:20:20 ratio has the highest heat value (15.68 MJ/kg). The energy quality of pellet can be increased by blending with the higher HHV materials as supplements, such as CL and CR. For example, the RW:CL (50:50) produced the greatest HHV, 16.25 MJ/kg. The biomass blending approach can provide the solution to the seasonal variation of materials proposed as an alternative use of residues to produce fuels and reduce material shortages and storage costs. Using agricultural wastes has a number of environmental benefits, including reducing harvesting burning, providing a carbon-neutral fuel supply, and promoting the circular economy.

Keywords : Biomass; Agricultural residues; Biofuel pellet; Biomass pellet fuel

** Corresponding Author. Tel.: +668 6881 5868, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: swichitra@gmail.com*

1. บทนำ

ประเทศไทยมุ่งขับเคลื่อนโมเดลเศรษฐกิจสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนให้เป็นวาระแห่งชาติ โดยเน้นการพัฒนาเศรษฐกิจของท้องถิ่นตามโมเดลเศรษฐกิจ BCG การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทน จึงมีส่วนสำคัญในการสร้างมูลค่าจากของเสีย เกิดเศรษฐกิจหมุนเวียนสร้างรายได้แก่ชุมชนจากวัสดุชีวภาพ ส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนภายในท้องถิ่น

ชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural Residues) ถูกพิจารณาว่าเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนสำคัญของโลก สามารถใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงที่มีความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าชีวมวลสู่บรรยากาศ ถูกทดแทนด้วยการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยพืชที่เพาะปลูก ถือว่าเป็นการชดเชยคาร์บอน (Carbon Offset) ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชชีวมวลเกษตรรุ่นต่อไป จึงสามารถสนับสนุนให้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สุทธิในบรรยากาศเท่ากับศูนย์ [1]

ประเทศไทยมีพื้นที่ใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรประมาณ 149 ล้านไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 53 ของพื้นที่ประเทศ มีผลผลิตชีวมวล 296 ล้านตัน/ปี เป็นส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์แล้ว 136 ล้านตัน และมีวัสดุที่เหลือทิ้ง 160 ล้านตัน [2] ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งที่ตกค้างในพื้นที่เหล่านี้ ส่วนใหญ่เกษตรกรมีการจัดการที่ไม่ถูกวิธี เช่น การเผาในที่โล่งแจ้ง ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบในหลายด้าน ทั้งผลต่อคุณภาพดินพื้นที่เพาะปลูกเสื่อมโทรม เกิดควั่นเถ่า และฝุ่นละอองขนาดเล็ก ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural Residues หรือ Crop Residues) หมายถึง ชิ้นส่วนพืชที่ไม่สามารถนำมาบริโภคได้ ซึ่งถูกทิ้งไว้หลังการเก็บเกี่ยว ทั้งนี้รวมถึงวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม [3] วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีความหลากหลายทั้งในแง่

ปริมาณ คุณสมบัติ และองค์ประกอบ [4] นอกจากนี้แล้ววัตถุดิบชีวมวลเหล่านี้ส่วนใหญ่มีน้ำหนักเบา ปริมาณมาก และความหนาแน่นทางพลังงานต่ำ ทำให้มีต้นทุนในด้านการจัดเก็บและการขนส่งสูง [5]

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพืชเศรษฐกิจหลักในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ข้าว อ้อย และมันสำปะหลัง ซึ่งพบว่าพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุด รวมทั้งวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเพาะปลูกยังมีศักยภาพทั้งด้านปริมาณ และคุณสมบัติทางพลังงาน การศึกษาก่อนหน้านี้ [6] แสดงให้เห็นว่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว ฟางข้าว ใบอ้อย ใบมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลัง (รูปที่ 1) สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนขั้นสูง (HHV) ที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยใบมันสำปะหลังมีค่า HHV เท่ากับ 19.29 MJ/kg รองลงมาคือ ใบอ้อย และเหง้ามันสำปะหลัง มีค่า HHV 17.49 และ 16.92 MJ/kg (HHV) ตามลำดับ ซึ่งวัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่มีการใช้ประโยชน์น้อย และถูกเผาทิ้งทำลาย [7] โดยฟางข้าวจะมีการนำไปใช้ที่หลากหลายที่สุด ส่วนตอซัง มีปริมาณน้อยที่นำไปเลี้ยงสัตว์ ส่วนเหลือทิ้งไม่ได้ใช้ประโยชน์ เช่นเดียวกับใบอ้อย ใบมัน และเหง้ามัน ที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ จะถูกปล่อยทิ้งไว้ในพื้นที่ และทำการเผาพื้นที่หลังเก็บเกี่ยว หรือเมื่อต้องการปลูกพืชในรอบต่อไป



ตอซังข้าว (Rice stubble : RB)



ฟางข้าว (Rice straw : RW)



ใบอ้อย (Sugar cane leaves : SL)



ใบมันสำปะหลัง (Cassava leaves : CL)



เหง้ามันสำปะหลัง (Cassava rhizome : CR)

รูปที่ 1 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในการศึกษา

เชื้อเพลิงชีวภาพอัดเม็ด (Biofuel Pellets) หรือ รู้จักกันในอีกชื่อว่า เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Biomass Pellet Fuel) เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งหรือของเสียจากเกษตรกรรม การแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อุตสาหกรรมป่าไม้ เช่น ชี้อ้อย เปลือกถั่ว ฟางข้าว ชังข้าวโพด เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่น (Densification) ขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นท่อนเล็กๆ หรือเม็ด (Pellets) [6], [7] การอัดเม็ดเชื้อเพลิงส่งผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นทางพลังงานและความคงทนของวัสดุ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการใช้งาน การจัดเก็บ และการขนส่ง

แนวคิดการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่เพาะปลูกหลังการเก็บเกี่ยวมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงพบว่า มีข้อจำกัดหลายประการ เนื่องจากความหลากหลายของชนิดพืช ซึ่งส่งผลต่อประเภทวัสดุเหลือทิ้ง คุณสมบัติและองค์ประกอบทางกายภาพ เคมี ชีวภาพ รวมทั้งคุณสมบัติทางพลังงาน คุณภาพชีวมวลที่ไม่สม่ำเสมอ และความแปรผันด้านปริมาณของวัสดุตามฤดูกาล ทำให้การใช้วัสดุชีวมวลเพียงชนิดเดียวในการผลิตเชื้อเพลิงมีความเสี่ยงต่อการประสบปัญหาวัสดุขาดแคลน รวมทั้งราคาวัสดุที่สูงในบางช่วงเวลา

งานวิจัยในอดีตได้นำแนวคิดการผสมผสานชีวมวลมาใช้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงด้วยวัตถุดิบประปรายต่างๆ กัน เช่น การผสมเชื้อเพลิงชีวมวลกับเชื้อเพลิงทั่วไปเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล [8] การผสมวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กับถ่านหินเพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหิน [5] การผสมแกลบ ชี้อ้อย กับถ่านหินเพื่อลดการใช้ถ่านหินและมลภาวะจากการใช้ถ่านหิน [9] และการผสมไม้สนกับวัสดุเหลือทิ้งจากต้นกาแฟเพื่อจัดการของเสียจากการเพาะปลูก [10] อย่างไรก็ตาม พบว่างานวิจัยในอดีตมุ่งเน้นการกำจัดของเสีย หรือมีความพยายามในการผสมผสานวัสดุเพื่อลดปริมาณวัสดุมากกว่าการพัฒนาคุณสมบัติทางพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวลจากการผสมผสาน

ด้วยความท้าทายในด้านความหลากหลายของวัสดุทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ งานวิจัยครั้งนี้จึงได้พัฒนาแนวทางการผสมผสานวัสดุชีวมวล (Biomass Blending) ที่เหมาะสม เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ข้าว อ้อย และมันสำปะหลัง โดยอาศัยกระบวนการอัดแน่นชีวมวล (Biomass Densification) ในรูปแบบเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) กระบวนการผสมผสานชีวมวลและการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ส่งผลให้ค่าความร้อนและความหนาแน่นทางพลังงานของวัสดุเพิ่มขึ้น ได้ผลิตเชื้อเพลิงที่มีความคงทน (Durability) เอื้อต่อการเก็บกักสำรอง คุ่มค่าต่อการขนส่งและใช้ประโยชน์ มีคุณภาพตามความต้องการของโรงไฟฟ้า ด้วยขนาดและรูปทรงที่สม่ำเสมอ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 รูปแบบการผสมผสานวัสดุชีวมวล

การวิจัยศึกษากระบวนการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและเป็นทางเลือกในการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรตลอดทั้งปี การศึกษาแบ่งวัสดุที่สนใจทั้ง 5 ประเภทออกเป็น 2 กลุ่ม ตามปริมาณวัสดุเฉลี่ยตลอดทั้งปีภายในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม [11] โดยแบ่งกลุ่มประเภทวัสดุที่มีปริมาณการผลิตที่สูงให้เป็น “วัสดุหลัก” ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) และใบอ้อย (SL) ในขณะที่วัสดุที่มีผลผลิตน้อย จัดให้เป็น “วัสดุเสริม” ได้แก่ ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) โดยตารางที่ 1 ได้แสดงข้อมูลองค์ประกอบโดยประมาณของวัสดุชีวมวลแต่ละประเภท

การศึกษาระบวนการผสมผสาน แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ได้แก่

1) การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) และใบอ้อย (SL)

ด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสม (Mixture design) แบบ Simplex Lattice โดยมีรูปแบบการผสมผสานวัสดุหลักสองรูปแบบ ได้แก่ การผสมวัสดุ 2 ชนิด และการผสมวัสดุ 3 ชนิดเข้าด้วยกัน กำหนดอัตราส่วนผสมวัสดุแต่ละประเภทจาก 0, 20, 40, 60, 80, 100 % โดยน้ำหนัก รวมทั้งสิ้น 21 ชุดการทดลอง วัสดุแต่ละชุดการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความร้อนขั้นสูง (Higher Heating Value: HHV) และองค์ประกอบโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า

2) การผสมผสานวัสดุหลักร่วมกับวัสดุเสริม การวิจัยต้องการศึกษาผลของการผสมผสานวัสดุเสริมที่มีค่าความร้อนสูง ได้แก่ ไขมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของชีวมวลประเภทวัสดุหลัก ที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์ โดยออกแบบการผสมผสานวัสดุเสริมในอัตราส่วนเพิ่มขึ้นทีละ 10% แต่ต้องไม่มากกว่าอัตราส่วนของวัสดุหลัก นอกจากนี้การวิจัยได้ศึกษาการผสมวัสดุเสริมแบบ 1 ชนิด และ 2 ชนิดพร้อมกัน รวมทั้งสิ้น 30 ชุดการทดลอง วัสดุแต่ละชุดการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความร้อนสูง (HHV) และองค์ประกอบโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า

2.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุชีวมวล

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) ของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture Content; MC) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter; VM) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3175 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon; FC) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172 และปริมาณเถ้า (Ash) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3174 [12] การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (HHV) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5865-13 [6], [13] โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter Cal2K รุ่น e2K ผลิตที่ประเทศแอฟริกาใต้

สำหรับการหาองค์ประกอบของเยื่อใยต่างๆ ในพืช ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และเถ้า (Ash) ทำการวิเคราะห์โดยวิธีการ Detergent Analysis [6]

องค์ประกอบต่างๆ ของชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในงานวิจัยนี้ ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบต่างๆ และคุณสมบัติทางพลังงานของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

องค์ประกอบ/คุณสมบัติ	วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (dry basis)				
	RB	RW	SL	CL	CR
องค์ประกอบโดยประมาณ (%)					
Moisture Content	8.57±0.13	7.70±0.09	6.97±0.11	7.29±0.18	7.22±0.18
Volatile Matter	66.99±0.98	67.14±0.44	75.69±1.05	72.13±0.49	73.74±0.53
Ash Content	12.70±0.45	11.32±0.07	4.31±0.05	6.87±0.28	3.77±0.36
Fixed Carbon	11.74±0.89	13.85±0.51	13.03±0.99	13.71±0.44	15.27±0.14
คุณสมบัติทางชีวเคมี (%)					
Hemicellulose	37.90±0.53	32.92±0.19	28.67±0.29	23.56±0.48	11.92±0.13
Cellulose	30.14±0.27	29.37±0.32	37.74±0.49	33.36±0.36	45.06±0.14
Lignin	21.90±0.34	27.78±0.56	26.69±0.32	39.01±0.55	38.38±0.27
Other	10.06±0.20	9.92±0.06	6.90±0.41	4.07±0.12	4.64±0.27
ค่าความร้อน (MJ/kg)					
Higher Heat Value	14.20±0.32	14.31±0.37	16.92±0.16	19.29±0.37	17.49±0.17

Note. RB: Rice Stubble (ตอซังข้าว); RW: Rice Straw (ฟางข้าว); SL: Sugar cane Leaves (ใบอ้อย); CL: Cassava Leaves (ใบมัน); CR: Cassava Rhizome (เหง้ามัน)

2.1.3 กระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวภาพแบบเม็ด (Pellet)

การศึกษาได้พิจารณาเลือกชุดการทดลองผสมผสานชีวมวลที่ให้ค่าความร้อนสูงสุดในแต่ละรูปแบบการผสมผสาน เพื่อนำไปสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวภาพแบบเม็ด โดยใช้เครื่องอัดเม็ดหรืออัดเป็นแท่งเล็ก (Pelletizing Press) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 มิลลิเมตร โดยมีวิธีการอัดขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 2

การอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงแบบเม็ด จะนำวัสดุที่ผ่านการตัดย่อยแล้วขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร ทำการผสมตามอัตราส่วนของแต่ละชุดการทดลอง โดยให้วัสดุมีความชื้นประมาณร้อยละ 30 – 35 ป้อนวัสดุปริมาณ 6 กิโลกรัมลงเครื่องอัดขนาด 10 แรงม้า (รูปที่ 3) โดยระหว่างการเดินเครื่องจะควบคุมอุณหภูมิแผ่นไดร์ให้อยู่ในช่วง 75- 100°C เมื่ออัดขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้ว นำเม็ดเชื้อเพลิงไปผึ่งลม และตากแดดเป็นระยะเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อลดอุณหภูมิและความชื้น และเก็บรักษาวัสดุไว้ในภาชนะปิดเพื่อทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุในการอัดขึ้นรูป



รูปที่ 3 เครื่องอัดเชื้อเพลิง (Pelletizing press)

การศึกษาได้คัดแยกคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิงออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) เม็ดเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี คือ ไม่มีรอยแตก เม็ดมีความมันวาว และเป็นแท่งตรง 2) เชื้อเพลิงคุณภาพไม่ดี คือเชื้อเพลิงที่มีรอยแตก รูปทรงบิดเบี้ยว และ 3) วัสดุที่ไม่สามารถอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ โดยจะประเมินปริมาณร้อยละของผลผลิตเชื้อเพลิงที่ได้ของแต่ละชุดการทดลอง

2.1.4 การทดสอบคุณสมบัติและความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

- 1) คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง
 - 1.1) ความหนาแน่นรวม (Bulk density; kg/m³) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 873-82 โดยเม็ดเชื้อเพลิงจะถูกเทลงภาชนะที่ระยะสูงจากขอบภาชนะ 15 เซนติเมตร ทำการบันทึกปริมาตรและน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นรวม [15]
 - 2) ความคงทน (Durability) ประกอบด้วย
 - 2.1) ค่าต้านทานแรงกด (Compressive Strength Test; Newton (N)) ทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่อง Universal Testing Machine บันทึกผล
 - 2.2) ความต้านทานการขัดสี (Tumbling Resistance Test; %) เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน Pellet Fuels Institute (PFI) นำตัวอย่างน้ำหนัก 500

กรัมใส่ในเครื่องทดสอบที่มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ขนาด $30 \times 30 \times 45$ เซนติเมตร มีความเร็วในการหมุน 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเชื้อเพลิงที่คงสภาพเป็นเม็ดอยู่ คำนวณเปอร์เซ็นต์ความต้านทานการขัดสี [6]

2.3) ความต้านทานการแตกกรว่น (Drop Shatter Test; %) ทดสอบโดยการนำตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดน้ำหนัก 100 กรัมบรรจุในถุงพลาสติก แล้วปล่อยวัสดุจากระดับความสูง 2 เมตรลงสู่พื้นซีเมนต์ 3 ครั้ง บันทึกข้อมูลน้ำหนักของวัสดุที่คงสภาพไม่แตกกรว่น และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความต้านทานการแตกกรว่น (มาตรฐาน ASTM 3083) [15]

2.4) การดูดซึมน้ำของเม็ดเชื้อเพลิง (Water Absorption Test; %) นำตัวอย่างแช่ในน้ำอุณหภูมิ 27°C ระดับน้ำสูง 25 มิลลิเมตร เป็นเวลา 30 วินาที บันทึกน้ำหนักหลังการทดสอบ เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ [6], [13]

3) คุณสมบัติทางพลังงาน (Energy Properties) การทดสอบค่าความร้อนสูง (Higher Heat Value; MJ/kg) ของเชื้อเพลิงด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter เครื่องหมายการค้า Cal2K รุ่น e2K ผลิตที่ประเทศแอฟริกาใต้” (มาตรฐาน ASTM D865-13 [6], [13])

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

องค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาเลือกวัสดุมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบและคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) ใบอ้อย (SL) ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ำมันสำปะหลัง (CR) พบว่า ใบมันสำปะหลัง (CL) มีค่าความร้อนสูงที่สุด 19.29 ± 0.37 MJ/kg รองลงมา ได้แก่ เหง้ำมันสำปะหลัง (CR)

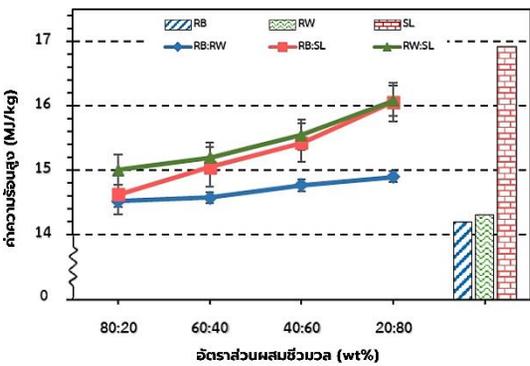
17.49 ± 0.17 MJ/kg และใบอ้อย (SL) 16.92 ± 0.16 MJ/kg ตามลำดับ เนื่องจากเป็นกลุ่มวัสดุที่มีปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว ลิกนิน และเซลลูโลสในสัดส่วนที่สูง และมีปริมาณเถ้าต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อค่าความร้อนที่สูงของวัสดุ ส่วนตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) เป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่าความร้อนต่ำกว่า คือ 14.20 ± 0.32 MJ/kg และ 14.31 ± 0.37 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งลักษณะสำคัญของวัสดุกลุ่มนี้คือมีปริมาณเถ้าสูง [7], [11] อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าความร้อนของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภทมีค่าที่สูงกว่าและใกล้เคียงกับวัสดุชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบในโรงไฟฟ้าชีวมวลในปัจจุบัน ได้แก่ ชิ้นไม้ (17.7 MJ/kg), แกลบ (14.6 MJ/kg) และส่วนผสมระหว่างชิ้นไม้: แกลบ (50:50) (15.8 MJ/kg) [6] หากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก.2772-2560 เชื้อเพลิงอัดเม็ดต้องมีค่าความร้อนไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg [15] ซึ่งจะเห็นว่า ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นหากจะนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานด้วยการผสมผสานวัสดุเสริมในขั้นตอนการศึกษาต่อไป

3.2 กระบวนการผสมผสานวัสดุชีวมวล

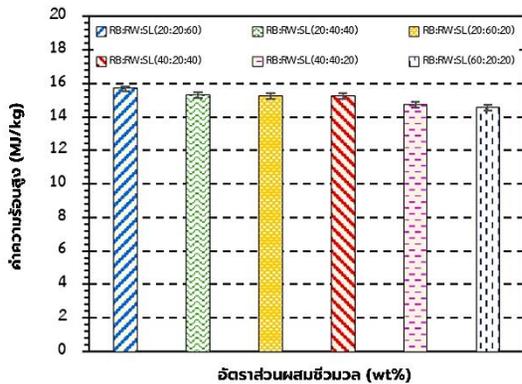
3.2.1 การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก

การศึกษาพิจารณาวัสดุประเภทหลักจากปริมาณผลผลิตในพื้นที่ทั้งหมด โดยแบ่งกระบวนการผสมผสานกลุ่มวัสดุหลักทั้ง 3 ชนิด ฟางข้าว (RW) ตอซังข้าว (RB) และใบอ้อย (SL) ออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การผสมผสานวัสดุแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด ผลการศึกษาพบว่าส่วนผสมที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด ได้แก่ ใบอ้อย (SL) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 80:20 (16.08 ± 0.25 MJ/kg) และใบอ้อย (SL) : ตอซังข้าว (RB) (80:20) ที่ให้ค่าความร้อน 16.06 ± 0.20 MJ/kg ในขณะที่ส่วนผสมระหว่างตอซังข้าว (RB) : ฟางข้าว (RW) อัตราส่วน 60:40 ให้ค่าความร้อนต่ำที่สุด อยู่ที่ 14.58 ± 0.10 MJ/kg (รูปที่ 4 และ 5)

นอกจากนี้ พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของไบอ้อย (SL) ในทุกส่วนผสมจะส่งผลให้ค่าความร้อนของวัสดุผสมสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะวัสดุที่มีค่าความร้อนต่ำอย่างตอซังข้าว (RB) และ ฟางข้าว (RW) ในขณะที่การผสมผสานระหว่างปริมาณตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4 และ 5) ทั้งนี้เพราะวัสดุทั้งสองประเภทมีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกัน



รูปที่ 4 ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) จากการผสมผสานวัสดุแบบ 2 ชนิด



รูปที่ 5 ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) จากการผสมผสานวัสดุแบบ 3 ชนิด

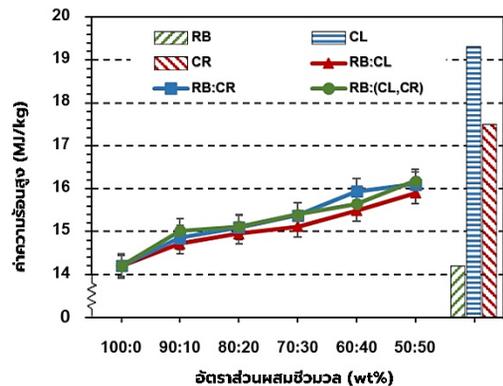
ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ดของประเทศไทย (มอก. 2772-2560) ซึ่งกำหนดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม่ต่ำกว่า 14.5 MJ/kg [15] จะพบว่า จากทั้งหมด 21 ชุดการทดลอง มีชุดการทดลองที่มีค่าความร้อนสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

จำนวน 19 ชุดการทดลอง และมีจำนวน 2 ชุดการทดลองที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน คือ ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW)

3.2.2 การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุเสริมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงาน

ชีวมวลประเภทวัสดุเสริม คือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณผลผลิตน้อยในพื้นที่ ได้แก่ ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) แต่ พบว่าเป็นวัสดุที่มีค่าความร้อนสูง การวิจัยจึงได้ศึกษาผลของการผสมผสานวัสดุทั้งสองเข้ากับวัสดุหลักที่มีค่าความร้อนต่ำอย่าง ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW)

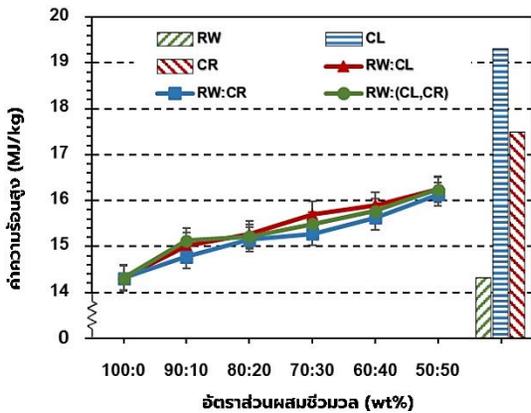
การศึกษาพบว่าการผสมผสานใบมันสำปะหลัง (CL) ชนิดเดียวกับตอซังข้าว ในอัตราส่วนต่างๆ ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้น 4.7% – 13.5% โดยอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด คือ ตอซังข้าว (RB) : ใบมันสำปะหลัง (CL) 50:50 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับการผสมใบมันสำปะหลัง (CL) กับฟางข้าว (RW) ในขณะที่การผสมวัสดุเสริมอย่างเหง้ามันสำปะหลัง ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของตอซังและฟางข้าวเพิ่มขึ้น 4% – 12% และ 3% – 13% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) จากการผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุเสริมกับตอซังข้าว (RB)

การศึกษาได้ทดลองการผสมผสานวัสดุเสริมทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน (CL, CR) โดยผลการศึกษาแสดง

อิทธิพลของการเพิ่มวัสดุเสริมทั้งสองรูปแบบ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเพิ่มวัสดุเสริมเพียงชนิดเดียว โดยการใช้วัสดุเสริมทั้งสองชนิด (CL,CR) ผสมผสานกัน ทั้งตอซังและฟางข้าวในอัตราส่วน 50:50 สามารถเพิ่มค่าความร้อนสูงของวัสดุให้สูงขึ้น 14% และ 13% ตามลำดับ และมีค่าความร้อนสูงสุด 16.18 ± 0.25 MJ/kg และ 16.24 ± 0.25 MJ/kg ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 7 ค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) จากการผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุเสริมฟางข้าว (RW)

3.3 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pellet) จากการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

3.3.1 คุณภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงจากการผสมผสานวัสดุชีวมวลพบว่า ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน พบวัสดุที่สูญเสียหรือไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันในแต่ละชุดการทดลอง โดยพบเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี มีความมันวาว และไม่มีรอยแตก อยู่ประมาณ 86% วัสดุที่มีคุณภาพไม่ดี มีรอยแตกประมาณ 6% และพบปริมาณวัสดุที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ประมาณ 7-9% นอกจากนี้ พบว่า การผสมผสานเหง้ามันสำปะหลัง (CR) กับตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) สามารถช่วยเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงคุณภาพที่ดี ลดปริมาณเชื้อเพลิงคุณภาพที่ไม่ดี และลดการสูญเสียวัสดุ

ระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิง เนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังมีปริมาณลิกนินเป็นองค์ประกอบที่สูง ซึ่งลิกนินเป็นสารอินทรีย์โพลีเมอร์ในพืช ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานตามธรรมชาติในกระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง [6]

3.3.2 ขนาดและรูปร่างของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ขนาดและรูปร่างของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการพิจารณาคัดเลือกเชื้อเพลิงเพื่อนำมาใช้ผลิตพลังงาน โดยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ดของไทย (มอก. 2772-2560) ชั้นคุณภาพ 1 และ 2 กำหนดให้เชื้อเพลิงต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ $6 \pm 1 - 25 \pm 1$ มิลลิเมตร ความยาวเฉลี่ย ตั้งแต่ 3.15 – 40.0 มิลลิเมตร ความยาวต่ำสุดไม่น้อยกว่า 3.15 มิลลิเมตร ความยาวสูงสุดไม่เกิน 45.0 มิลลิเมตร และมีความยาวที่เกินกว่า 40.0 มิลลิเมตร ไม่เกินร้อยละ 1 (โดยน้ำหนัก) [15] เชื้อเพลิงจากทุกชุดการทดลอง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง อยู่ระหว่าง 11.7 – 11.9 มิลลิเมตร เฉลี่ย 11.8 มิลลิเมตร และขนาดความยาวของแท่งเชื้อเพลิงเฉลี่ยอยู่ที่ 3.79 – 5.06 มิลลิเมตร โดยเชื้อเพลิงที่มีความยาวแท่งเฉลี่ยสูงที่สุดคือ เหง้ามันสำปะหลัง (CR) และเชื้อเพลิงที่มีความยาวเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ ตอซังข้าว (RB) : ใบอ้อย (SL) (20:80) ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้จากการศึกษาพบว่าสอดคล้องกับมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ดของประเทศไทย

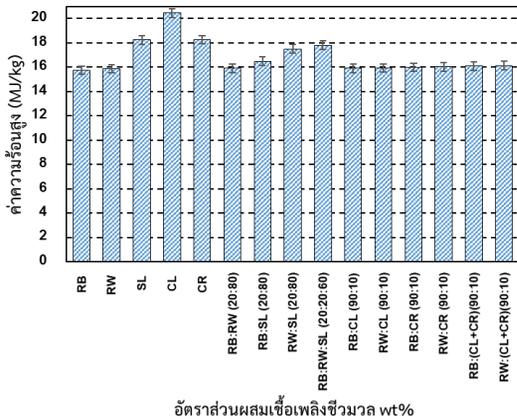
3.3.3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

1) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือปัจจัยหลักในการพิจารณาคัดเลือกเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการผลิตพลังงาน เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการเผาไหม้ ได้ค่าพลังงานที่คงที่ โดยทั่วไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ดของประเทศไทย (มอก. 2772-2560) ชั้นคุณภาพ

1 และ 2 กำหนดให้เชื้อเพลิงที่ผลิตจากชีวมวลจะต้องมีค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า 14.5 MJ/kg [15] ผลจากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากไบมันสำปะหลัง (CL) มีค่าความร้อนขั้นสูง (HHV) สูงที่สุด 20.45 MJ/kg รองลงมาได้แก่เหง้ามันสำปะหลัง (CR) 18.27 MJ/kg และ ใบอ้อย (SL) 18.25 MJ/kg ในขณะที่เม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตจากตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกัน คือ 15.75 MJ/kg และ 15.87 MJ/kg ตามลำดับ (รูปที่ 8)

เชื้อเพลิงชุดการทดลองที่มีส่วนผสมของใบอ้อย (SL) มีค่าปริมาณความร้อนสูงเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราส่วนที่มีค่าความร้อนสูงสุดที่สุด คือตอซังข้าว (RB) : ใบอ้อย (SL) อัตราส่วน 20:80 มีค่า 17.81 MJ/kg เมื่อพิจารณา ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทั้ง 15 ชุดการทดลอง เปรียบเทียบมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศไทย (มอก. 2772 – 2560) พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าความร้อนที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 8 ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

2) ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

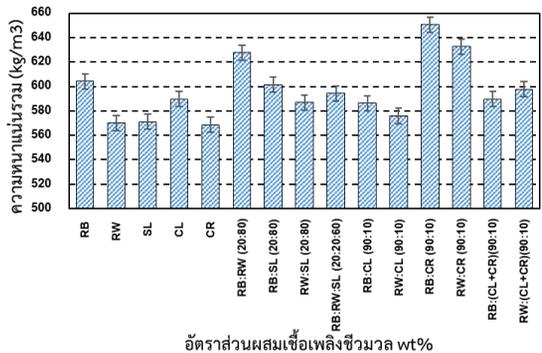
การนำชีวมวลมาอัดแข็งเพื่อเพิ่มความหนาแน่นจะเป็นประโยชน์ทั้งในแง่ของการเพิ่มความหนาแน่นทางพลังงานต่อปริมาตรเชื้อเพลิง และช่วยให้การขนส่งและเก็บรักษาเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ผลจากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง 569 – 650 kg/m³ โดยเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นรวมมากที่สุด ผลิตจากตอซังข้าว (RB): เหง้ามัน (CR) (90:10) ซึ่งมีความหนาแน่นรวมอยู่ที่ 650.49 kg/m³ (รูปที่ 9) ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ มอก. 2772-2560 กำหนดให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดต้องมีความหนาแน่นรวมไม่น้อยกว่า 600 kg/m³ [15]

3) ความหนาแน่นทางพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ความหนาแน่นทางพลังงาน (Energy Density: MJ/m³) ของเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งาน การขนส่ง และการจัดเก็บ ผลจากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเดี่ยว มีความหนาแน่นทางพลังงานอยู่ในช่วง 9,048 - 12,060 MJ/m³ โดยที่ไบมันสำปะหลัง (CL) ให้ค่าความหนาแน่นทางพลังงานสูงสุด คือ 12,060 MJ/m³

ส่วนเชื้อเพลิงที่ได้จากการผสมผสานวัสดุประเภทหลัก พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสมระหว่างตอซังข้าว (RB) : ใบอ้อย (SL) อัตราส่วน 20:80 มีความหนาแน่นทางพลังงานสูงสุด 10,708 MJ/m³ ในขณะที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีวัสดุเสริมอย่างเหง้ามัน (CR) ร่วมกับตอซัง (RB) มีความหนาแน่นทางพลังงานที่สูงที่สุด คือ 10,354 MJ/m³ ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 9 ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นทางพลังงาน (Energy Density) และการทดสอบความคงทนของเชื้อเพลิง

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนผสม (wt%)	ความหนาแน่นทางพลังงาน (MJ/m ³)	ความคงทนของเชื้อเพลิง		
			ความต้านทานการขัดสี (%)	ความต้านทานการแตกร่วน (%)	ความต้านทานการดูดซึมน้ำ (%)
วัสดุประเภทเดี่ยว	CL (100%)	12,060	90.34±0.65	99.13±0.21	91.06±0.31
	SL (100%)	10,423	95.86±0.48	99.86±0.04	95.89±0.62
	CR (100%)	10,391	98.44±0.25	99.95±0.01	92.13±0.31
	RB (100%)	9,512	96.62±0.20	99.83±0.09	88.49±0.99
	RW (100%)	9,048	97.48±0.65	99.83±0.04	88.24±0.92
การผสมผสานวัสดุประเภทหลัก	RB:SL (20:80)	10,708	96.08±0.06	99.78±0.19	89.03±1.16
	RW:SL (20:80)	10,276	96.04±0.47	99.87±0.06	91.64±1.11
	RB:RW (20:80)	9,992	97.20±0.39	99.84±0.11	92.30±0.79
	RB:RW:SL (20:20:60)	9,801	96.54±0.25	99.78±0.10	91.31±1.24
การผสมวัสดุประเภทหลัก	RB:CR (90:10)	10,354	98.27±0.05	99.90±0.03	86.73±1.33
	RW:CR (90:10)	10,140	97.15±0.06	99.82±0.06	89.94±0.89
ด้วยวัสดุประเภทเสริม	RW:(CL+CR) (90:10)	9,559	96.85±0.11	99.84±0.08	91.45±0.46
	RB:CL (90:10)	9,438	97.41±0.10	99.91±0.40	88.90±1.36
ประเภทเสริม	RB:(CL+CR) (90:10)	9,394	96.84±0.40	99.85±0.07	91.41±0.53
	RW:CL (90:10)	9,293	97.34±0.31	99.88±0.03	88.80±0.99

3.3.4 การทดสอบความคงทนของเชื้อเพลิง

1) ความต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพดีจะต้องมีความคงทน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขนส่ง และการจัดเก็บ [14] ผลจากการทดสอบความต้านทานการขัดสีของเชื้อเพลิงพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเหง้ามันมีความต้านทานการขัดสีมากที่สุด 98% โดยเชื้อเพลิงจากทุกชุดการทดลองมีความต้านทานการขัดสีผ่านเกณฑ์ มอก. 2772-2560 [15] ซึ่งกำหนดให้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจะต้องมีความคงทนไม่น้อยกว่า 96% ทั้งนี้ยกเว้นเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากใบมันสำปะหลัง มีความต้านทานการขัดสีน้อยที่สุด 90% (ตารางที่ 2)

2) ความต้านทานการแตกร่วน

การทดสอบค่าความต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดในแต่ละชุดการทดลองมีค่าสูงมากกว่า

99% โดยเชื้อเพลิงที่มีความต้านทานการแตกร่วนสูงที่สุด คือเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเหง้ามันสำปะหลัง (CR) (ตารางที่ 2)

3) ความต้านทานการดูดซึมน้ำ

เชื้อเพลิงที่มีดูดซึมน้ำได้ดี จะส่งผลให้วัสดุมีการพองตัว เสียรูปร่าง หรือเปื่อยยุ่ย มีโอกาสที่ทำให้วัสดุขึ้นรา หรือถูกย่อยสลายตามธรรมชาติได้ง่าย ผลจากการทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากใบอ้อย (SL) มีความต้านทานการดูดซึมน้ำสูงที่สุดอยู่ที่ 96% ในขณะที่ฟางข้าว (RW) มีค่าต้านทานการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด คือ 88.24% อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าคุณสมบัติการต้านทานการดูดซึมน้ำของฟางข้าวจะเพิ่มขึ้นได้ หากมีผสมผสานวัสดุชนิดอื่น อย่างใบอ้อย ดังแสดงในตารางที่ 2

4) ความต้านทานแรงกด

การศึกษาได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงกดใน 2 รูปแบบ ได้แก่การรับแรงกดในแนวตั้งของเม็ด

เชื้อเพลิง และการรับแรงกดในแนวนอน โดยผลการทดสอบพบว่า ความต้านทานแรงกดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเหง้ามันสำปะหลัง(CR) ในแนวตั้งสามารถรับแรงกดได้สูงสุด คือ 7.91 N รองลงมา คือ ตอซังข้าว (RB) รับแรงกดได้ 7.32 N ฟางข้าว (RW) 5.49 N และ

ไบอ้อย (SL) 3.63 N ตามลำดับ โดยเม็ดเชื้อเพลิงที่สามารถรับแรงกดได้น้อยที่สุด คือ ไบมันสำปะหลัง (CL) 2.65 N การทดสอบพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงสามารถรับแรงกดในแนวนอนได้มากกว่าแนวตั้ง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติความต้านทานแรงกด (Compressive Resistance) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ชุดการทดลอง	อัตราส่วนผสม (wt%)	การรับแรงกด (Newton)	
		แนวตั้ง	แนวนอน
วัสดุประเภทเดียว	RB (100%)	7.32±0.30	12.52±0.50
	RW (100%)	5.49±0.29	9.55±0.15
	SL (100%)	3.63±0.55	4.41±0.39
	CL (100%)	2.65±0.17	3.11±0.56
	CR (100%)	7.91±0.71	18.40±0.45
การผสมผสานวัสดุหลัก	RB:RW (20:80)	7.68±0.23	13.21±0.49
	RB:SL (20:80)	5.43±0.44	12.23±0.34
	RW:SL (20:80)	5.36±0.06	15.13±0.49
	RB:RW:SL (20:20:60)	6.37±0.64	16.54±0.41
การผสมวัสดุหลักด้วยวัสดุประเภทเสริม	RB:CL (90:10)	5.16±0.20	7.03±0.15
	RW:CL (90:10)	5.26±0.40	7.26±0.52
	RB:CR (90:10)	9.71±0.51	14.81±0.59
	RW:CR (90:10)	7.52±0.49	15.40±0.43
	RB:(CL+CR) (90:10)	7.88±0.50	14.12±0.51
	RW:(CL+CR) (90:10)	5.26±0.15	14.81±0.34

4. สรุป

จากการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภทในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม พบว่าไบมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง และไบอ้อย เป็นกลุ่มวัสดุที่ให้ค่าความร้อนที่สูง ในขณะที่ตอซังข้าว และฟางข้าว เป็นวัสดุที่มีศักยภาพทางด้านปริมาณตลอดทั้งปี แต่มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า การศึกษาจึงได้ปรับปรุงคุณภาพวัสดุชีวมวลด้วยการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีค่าความร้อนสูงกว่าผสมผสานกับวัสดุที่มีค่าความร้อนต่ำ โดยรูปแบบของการผสมผสานวัสดุหลักที่มีปริมาณมากในพื้นที่ จะพบว่าการเพิ่ม

สัดส่วนของไบอ้อย (SL) กับฟางและตอซังในอัตราส่วนต่างๆ 20% ส่งผลให้วัสดุมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 2 – 3% และมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ 14.5 MJ/kg ในขณะที่การผสมผสานวัสดุเสริมเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางพลังงานของฟางและตอซังข้าว พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของไบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) ในอัตราส่วน 50:50 ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด

การเพิ่มความหนาแน่นแก่วัสดุชีวมวลด้วยการอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงเม็ดจะทำให้ค่าความหนาแน่นทางพลังงาน หรือค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของ

วัสดุเพิ่มขึ้น สำหรับกลุ่มวัสดุหลัก การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากฟางและตอซังข้าวด้วยการผสมผสานใบอ้อย 20% จะส่งผลให้ค่าความร้อนและความหนาแน่นทางพลังงานสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การผสมผสานวัสดุเสริมที่มีปริมาณน้อยเพียง 10% ร่วมกับฟาง และตอซัง จะส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ มอก. 2772-2560

การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีค่าความร้อนสูงและต่ำเข้าด้วยกัน ส่งผลให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นทางพลังงานที่สูงขึ้น และมีความคงทนต่อการเสียดสี แรงกด การแตกร่วน และการดูดซึมน้ำ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้อัตราส่วนของการผสมผสานวัสดุที่เหมาะสม นอกจากจะคำนึงถึงค่าความร้อนที่ต้องการแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปริมาณวัสดุที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ในแต่ละช่วงเวลา สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากวัสดุเหล่านี้ในเชิงพาณิชย์ จึงจำเป็นต้องศึกษาฤดูกาลเก็บเกี่ยว ปริมาณผลผลิตที่เกิดขึ้นตลอดทั้งปี ปริมาณวัสดุที่ถูกใช้ประโยชน์ และที่เหลือทิ้งหรือสามารถใช้ประโยชน์เพื่อผลิตพลังงานได้ และต้องการศึกษาความพร้อมใช้และศักยภาพของวัสดุในพื้นที่เพื่อวางแผนการจัดการวัสดุเพื่อการผลิตอย่างต่อเนื่อง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2566 คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และทุนสนับสนุนการดำเนินการวิจัยจากศูนย์สหวิทยาการการวิจัยเพื่อความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Wang, W. Huang, H. Wang, J. Gao, R. Zhang, G. Xu, and Z. Wang, "Research on the improvement of carbon neutrality by utilizing agricultural waste: based on a life cycle assessment of biomass briquette fuel heating system," *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, no.1, pp. 140365, Jan. 2024.
- [2] DEDE. "Renewable Energy and Alternative Energy Development Plan 2018-2037 (AEDP 2018)". Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Bangkok, Thailand, 2020.
- [3] R. Lal, "World crop residues production and implications of its use as a biofuel," *Environment International*, vol. 31, no. 4, pp. 575-584, May. 2005.
- [4] K. Kaczyński, K. Kaczyńska, and P. Petka, "Characteristics of agro and wood biomass combustion in the stream of inert material," in *XIV Research & Development in Power Engineering*, 2019, vol. 137.
- [5] A. I. Anukam, S. N. Mamphweli, P. S. Mabizela, and E. L. Meyer, "Blending influence on the conversion efficiency of the Cogasification process of corn stover and coal," *Journal of Chemistry*, vol. 2016, pp. 1-8, Jul. 2016.

- [6] P. Wisoram, "Enhancing energy performance of perennial grass feedstock," MS. thesis, Dept. Envi. Tech., Maharakham Univ., Maharakham, Thailand, 2020.
- [7] P. Luesopa, and W. Singhirunnusorn, "Blending agricultural residue as a source for biofuel production," *Journal of Science and Technology Maharakham University*, vol.42, no.4, pp. 127-137, Aug. 2023.
- [8] K. Hanaki and J. P. Pereira, "The effect of biofuel production on greenhouse gas emission reductions," in *Biofuel and Sustainability*, Ed. Tokyo: Springer Japan, 2018 pp. 53–71.
- [9] D. Sasongko, W. Wulandari, I. S. Rubani, and R. Rusydiansyah, "Effects of biomass type, blend composition, and co-pyrolysis temperature on hybrid coal quality," in *AIP Conference Proceedings*, vol.1805, no.1, Jan. 2017.
- [10] C. L. M. Martinez, E. Sermyagina, A. de C. O. Carneiro, E. Vakkilainen, and M. Cardoso, "Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil," *Biomass & Bioenergy*, vol.123, pp. 70–77, April. 2019.
- [11] W. Singhirunnusorn, P. Wisoram, and P. Boonruam, "Spatial distribution and potentiality of second-generation biofuels (SGBs): a case study of agricultural residues In Maha Sarakham province." in *Maharakham University Research Journal: Special Issues, 14th MSU Research Conference*, pp. 266-277, 2018.
- [12] D. Aller, S. Bakshi, and D. A. Laird, "Modified method for proximate analysis of biochars," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol.124, pp. 335-342, Mar. 2017.
- [13] J. Shen, S. Zhu, X. Liu, H. Zhang, and J. Tan, "The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no.5, pp. 983-987. May 2010.
- [14] N. Kaliyan and R. V. Morey, "Factors affecting strength and durability of densified biomass products," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no.3, pp. 337-359, Mar. 2009.
- [15] Solid biofuel-biomass pellets, TIS standard 2772-2560, 2017.