

การผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

Blending agricultural residue as a source for biofuel production

ปัทมา ลือโสภา^{1, 2} และ วิจิตรา สิงห์หิรัญนุสรณ์²
Pannatat Luesopa^{1, 2} and Wichitra Singhirunnusorn²

Received: 7 September 2021 ; Revised: 24 November 2022 ; Accepted: 14 December 2022

บทคัดย่อ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นแหล่งชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพและความสำคัญ อย่างไรก็ตามการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เพื่อการผลิตพลังงานจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุ เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีคุณสมบัติ ลักษณะ และความพร้อมใช้งานที่แตกต่างกันตามฤดูกาล การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติและลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว ฟางข้าว ใบอ้อย ใบมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังศึกษาศักยภาพความพร้อมใช้งานของวัสดุชีวมวล โดยแบ่งเป็นกลุ่มที่มีศักยภาพการผลิตสูงหรือวัสดุประเภทหลัก ได้แก่ ตอซังข้าว ฟางข้าว และใบอ้อย และกลุ่มที่มีศักยภาพการผลิตต่ำหรือวัสดุประเภทเสริม ได้แก่ ใบมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลัง ผลการศึกษาพบว่า ใบมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง และใบอ้อย เป็นกลุ่มวัสดุที่มีปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว ลิกนิน และเซลลูโลสในสัดส่วนที่สูง และปริมาณเถ้าต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อค่าความร้อนที่สูงของวัสดุ โดยใบมันสำปะหลัง มีค่าความร้อนสูงที่สุด 19.29 MJ/kg รองลงมา ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง 17.49 MJ/kg และใบอ้อย 16.92 MJ/kg ตามลำดับ ในขณะที่ตอซังข้าว และฟางข้าว พบว่าเป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า (14.20 MJ/kg และ 14.31 MJ/kg) ผลจากการผสมผสานวัสดุหลักแบบ 2 ประเภท พบว่า อัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดคือ ใบอ้อย:ฟางข้าว (80:20) 16.08 MJ/kg การผสมผสานชีวมวลวัสดุหลักแบบ 3 ประเภท พบว่า ใบอ้อย:ตอซังข้าว:ฟางข้าว (60:20:20) ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด 15.68 MJ/kg การปรับปรุงคุณสมบัติด้านพลังงานด้วยวัสดุเสริม (ใบ และเหง้ามันสำปะหลัง) พบว่า ฟางข้าว:ใบมันสำปะหลัง (50:50) เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด คือ 16.18 MJ/kg จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนของวัสดุเสริมส่งผลทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้ปริมาณเถ้ามีแนวโน้มลดลง

คำสำคัญ: การผสมผสานชีวมวล วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เชื้อเพลิงชีวภาพ พลังงานทดแทน

Abstract

Agricultural residue becomes a renewable energy source with potential and importance. When using agricultural residue for energy production, it is essential to study the properties and characterizations. Each biomass has different properties, characteristics, and availability during various seasons. This study aimed to examine 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 scheme was also investigated depending on their seasonal availability to produce renewable energy fuels. RB, RW, and SL were categorized as the main materials in all seasons and the rest are supplement materials. The results showed that cassava leaves, sugarcane leaves, and cassava rhizomes were among the biomasses with highest HHV (19.29, 17.49, and 16.92 MJ/kg, respectively); high contents of volatiles, fixed carbon, and cellulose; and lower in ash. On the other hand, rice stubble and straw had low HHVs (14.20 MJ/kg and 14.31 MJ/kg, respectively). The two-type blending of main materials results showed that SL:RW

¹ สำนักงานพลังงานจังหวัดมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

² ศูนย์สหวิทยาการวิจัยเพื่อความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150,

¹ Mahasarakham Provincial Energy Office

² Multidisciplinary Research Center for Environmental Sustainability (MRCES), Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Mahasarakham 44150,

* Corresponding author; Pannatat Luesopa, MRCES, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Mahasarakham 44150, mpluesopa@gmail.com

at a ratio of 80:20 contained the highest heat value (16.08 MJ/kg). Three-type blending showed that SL:RW:RB at a ratio of 60:20:20 had the highest heat value (15.68 MJ/kg). The improvement of energy properties with supplement materials (CL and CR) showed that RW:CL (50:50) ratio had the highest heat value of 16.18 MJ/kg. The study shows that heat value increases with an increase of in the ratio of supplement materials (CL and CR), and the amount of ash tends to decrease.

Keywords: Biomass Blending, Agricultural Residue, Biofuel, Renewable Energy

บทนำ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นแหล่งชีวมวลที่มีความสำคัญและศักยภาพการใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนพลังงานจากฟอสซิล รวมทั้งการผลิตและการใช้พลังงานจากชีวมวลยังส่งผลดีต่อสมดุลคาร์บอนในบรรยากาศ ประเทศไทยถือว่ามีความพื้นที่ที่มีศักยภาพและความหลากหลายของชีวมวลประเภทวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสูง ในปี 2556 มีการประมาณการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากพืชเศรษฐกิจหลักที่เกิดขึ้นสูงถึง 134 ล้านตัน/ปี แต่มีการนำไปใช้ประโยชน์เพียง 72 ล้านตัน ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งตกค้างกว่า 62 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 46 หากนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาผลิตเป็นพลังงานสามารถคิดเป็นค่าพลังงาน ประมาณ 562,223.8 TJ หรือ 13,348 Ktoe (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) วัสดุที่ตกค้างในพื้นที่เหล่านี้หากมีการจัดการที่ไม่ถูกวิธีอาจทำให้คุณภาพดินเสื่อมโทรม ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

ประเทศไทยมีนโยบายส่งเสริมความมั่นคงทางด้านพลังงานตามแผนพัฒนาพลังงานกำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 (PDP, 2018) และแผนขับเคลื่อนเศรษฐกิจฐานรากของกระทรวงพลังงาน ที่ส่งเสริมให้เกิดโรงไฟฟ้าชุมชน โดยส่งเสริมการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนภายในท้องถิ่น เช่น ชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อสร้างความมั่นคงทางพลังงาน และสร้างรายได้ให้กับชุมชนในการจำหน่ายวัตถุดิบเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนจำเป็นที่จะต้องพิจารณาคุณสมบัติและคุณลักษณะของชีวมวล เนื่องจากพืชชีวมวลแต่ละชนิดมีองค์ประกอบและคุณสมบัติทางพลังงานที่แตกต่างกัน และที่สำคัญปริมาณของวัสดุมีความผันผวนตามฤดูกาล การพิจารณาเลือกใช้วัสดุประเภทเดียวในการผลิตเชื้อเพลิงจะส่งผลให้เกิดการขาดแคลนวัสดุ เพิ่มค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ อีกทั้งข้อต่อของวัสดุชีวมวลส่วนใหญ่มีความหนาแน่นทางพลังงานที่ต่ำ (Anukam *et al.*, 2016 ; Daioglou *et al.*, 2016) ดังนั้น แนวทางการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการ

เกษตรจึงเป็นแนวทางที่สามารถลดข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้ พร้อมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานให้กับวัสดุด้วยอีกทางหนึ่ง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานด้วยการผสมผสานชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรยังพบว่ามีน้อย ในขณะที่งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่เน้นการผสมผสานชีวมวลเพื่อลดปัญหาความเสถียรด้านการขาดแคลนวัสดุ เช่น การผสมวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กับถ่านหิน (Anukam *et al.*, 2016), แกลบ ชี้เลื่อย กับ ถ่านหิน (Sasongko *et al.*, 2017), ไม่สนกับเศษเหลือทิ้งจากต้นกาแฟ (Mendoza Martinez *et al.*, 2019), ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผสมผสานชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในการผลิตพลังงานทดแทนสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางพลังงานของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของชีวมวลด้วยการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วิธีการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากพืชเศรษฐกิจหลักในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม จำนวน 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว (Rice Stubble: RB) ฟางข้าว (Rice Straw: RW) ใบอ้อย (Sugar cane Leaves: SL) ใบมันสำปะหลัง (Cassava Leaves: CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (Cassava Rhizome: CR) โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้

1. การเตรียมวัสดุ

การเตรียมวัสดุเพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของชีวมวล เริ่มด้วยการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภทมาตากแห้ง โดยอาศัยแสงแดด (Sun-dried) หรืออบด้วยเตาอบลมร้อนจนวัสดุแห้งและมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นทำการบดย่อยวัสดุด้วยเครื่องบดย่อยจนได้วัสดุที่มีขนาด

ประมาณ 1 - 3 มิลลิเมตร ตัวอย่างดังกล่าวนี้ใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis), การวิเคราะห์เยื่อใย (Detergent Analysis) และการวิเคราะห์ค่าความร้อน (High heat value)

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คุณสมบัติทางกายภาพ 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 (ปีนมนัส วิโสรัมย์, 2563)

3. การวิเคราะห์เยื่อใย

การหาส่วนประกอบของเยื่อใยต่างๆ ในพืช ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และเถ้า (Ash) อาศัยวิธีการ Detergent Analysis (ปีนมนัส วิโสรัมย์, 2563)

4. การวิเคราะห์ค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (High Heat Value ; HHV) โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter รุ่น e2K ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5865-13 (ปีนมนัส วิโสรัมย์, 2563 ; Anukam *et al.*, 2016)

5. การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการผสมผสานวัสดุต่อคุณสมบัติของชีวมวล

การวิจัยต้องการศึกษากระบวนการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและเป็นทางเลือกการใช้งานให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในฤดูกาลต่างๆ ตลอดทั้งปี จากข้อมูลปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากการเพาะปลูกข้าวมีปริมาณมากที่สุดคือ 705 พันตันปี รองลงมาคือ อ้อย 465 พันตันปี และมันสำปะหลัง 88 พันตันปี (วิจิตร สิงห์หิรัญสุวรรณ และคณะ, 2560) การศึกษาแบ่งวัสดุออกเป็น 2 กลุ่ม โดยอาศัยปริมาณของวัสดุที่มีตลอดทั้งปีภายในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม เป็นข้อพิจารณา สามารถแบ่งกลุ่มประเภทวัสดุที่มีศักยภาพการผลิตสูง เรียกว่าเป็น “วัสดุหลัก” ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) และใบอ้อย (SL) และวัสดุที่มีศักยภาพการผลิตต่ำ เรียกว่า “วัสดุเสริม” ได้แก่ ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) การศึกษากระบวนการผสมผสาน แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ได้แก่

5.1 การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก

ทำการออกแบบส่วนผสมชีวมวลประเภทวัสดุหลัก ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) และใบอ้อย (SL) ด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสม mixture design แบบ simplex lattice ได้ชุดการทดลอง จำนวน 21 ชุดการทดลอง อัตราส่วนวัสดุแต่ละประเภทแปรผันตามอัตราส่วน คือ 0, 20, 40, 60, 80, 100 wt% โดยการศึกษาได้แบ่งการผสมผสานวัสดุหลักออกเป็นแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด ตัวอย่างที่ทำการผสม 21 ชุดการทดลอง นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) และหาค่าความร้อน (HHV) ซึ่งมีการทำซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

5.2 การผสมผสานวัสดุหลักและการเพิ่มวัสดุเสริม

ด้วยคุณสมบัติทางพลังงานของใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) ซึ่งเป็นวัสดุเสริม และมีค่าความร้อนสูงกว่าวัสดุประเภทอื่น การวิจัยจึงต้องการศึกษาผลของการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของชีวมวลประเภทวัสดุหลักด้วยการผสมร่วมกับวัสดุเสริม โดยการวิจัยได้นำชุดการทดลองจากข้อ 5.1 ที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์ มาทดสอบโดยการเพิ่มอัตราส่วนวัสดุเสริมที่ละ 10 wt% ทั้งนี้ โดยมีเงื่อนไขในการเพิ่มวัสดุเสริม คือ วัสดุเสริมต้องมีอัตราส่วนที่น้อยกว่าหรือเท่ากับวัสดุหลัก จึงกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุหลักต่อวัสดุเสริม คือ 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 wt% ด้วยการศึกษาวัสดุเสริม 2 ชนิด ดังนั้นจึงทำการศึกษาการเพิ่มวัสดุเสริม 1 ชนิด (ทีละชนิด) และ 2 ชนิด พร้อมกัน โดยสามารถออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 30 ชุดการทดลอง และนำวัสดุที่ผสมผสานนี้ไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) และหาค่าความร้อน (HHV) โดยทำการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

ผลการวิจัย

1. คุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

การศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ชนิด พบว่า ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ของวัสดุมีปริมาณอยู่ระหว่าง 6.97±0.11 – 8.57±0.13% โดยตอซังข้าว (RB) มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด 8.57±0.13% ในขณะที่ใบอ้อย (SL) มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด 6.97±0.11% ถึงแม้ว่าปริมาณความชื้นจะไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม หากวัสดุที่เป็นเชื้อเพลิงมีปริมาณความชื้นที่สูงจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการเผาไหม้ ความชื้นของวัสดุที่แนะนำควรอยู่ระหว่าง 5 - 10% (Mendoza Martinez *et al.*, 2019) ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุทั้ง 5 ประเภทมีค่าความชื้น

อยู่ในเกณฑ์ที่แนะนำในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงพลังงาน (Table 1)

คุณสมบัติด้านเคมีของวัสดุแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้ ได้แก่ สารระเหย (Volatile Matter) และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ คือ เถ้า (Ash Content) โดยปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อค่าความร้อนของวัสดุ หากวัสดุมีปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวสูง จะส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงตามไปด้วย โดยทั่วไปปริมาณสารระเหยที่มีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไปควรมีค่าอยู่ระหว่าง 65 - 85% โดยน้ำหนัก (Mendoza Martinez *et al.*, 2019) ผลการศึกษาพบว่าไบอ้อย (SL) เป็น

วัสดุที่มีปริมาณสารระเหยสูงที่สุด $75.69 \pm 1.05\%$ และวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง (CR) $15.27 \pm 0.14\%$ ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับค่าความร้อนของวัสดุดังกล่าวซึ่งจะได้นำเสนอต่อไป (Table 1)

ในส่วนปริมาณเถ้า พบว่าตอซังข้าว (RB) เป็นวัสดุที่มีปริมาณเถ้าสูงที่สุด 12.70% โดยวัสดุที่มีปริมาณเถ้าต่ำที่สุดคือ เหง้ามันสำปะหลัง (CR) พบเพียง 3.77% ด้วยเถ้าคือส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ของวัสดุ ดังนั้นหากวัสดุมีปริมาณเถ้าสูง จะส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ทำให้ค่าความร้อนโดยรวมจากการเผาไหม้ของวัสดุมีค่าต่ำ (Konrad and Piotr, 2019)

Table 1 Results of proximate analysis, detergent analysis and calorimetry of agricultural residues

Properties	Agricultural Residues (dry basis)				
	RB	RW	SL	CL	CR
Proximate Analysis (%)					
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
Detergent Analysis (%)					
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
Calorimetry (MJ/kg)					
High Heating 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; RW: Rice Straw; SL: Sugar cane Leaves; CL: Cassava Leaves; CR: Cassava Rhizome.

การศึกษาคุณสมบัติทางด้านชีวเคมี ได้แก่ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน คุณสมบัติด้านชีวเคมีเป็นปัจจัยในการพิจารณาเลือกชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงาน คุณสมบัติที่ต้องการแตกต่างกันไปตามรูปแบบการผลิตพลังงาน ในการผลิตเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาไหม้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะพิจารณาปริมาณเซลลูโลส (Cellulose) และลิกนิน (Lignin) เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากเซลลูโลส (Cellulose) เป็นแหล่งคาร์บอนจำนวนมากในชีวมวล และลิกนิน (Lignin) มีคุณสมบัติเป็นกาวธรรมชาติช่วยในการยึดเกาะของก้อนเชื้อเพลิงมีผลต่อความแข็งแรงของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัสดุชีวมวล (Tumuluru *et al.*, 2011) นอกจากนี้ลิกนินยังเป็นองค์ประกอบที่ส่งผลทำให้ชีวมวลมีค่าความร้อน

สูงด้วย (Domingos *et al.*, 2020 ; Maksimuk *et al.*, 2021) จากการศึกษาพบว่า ไบมันสำปะหลัง (CL) มีปริมาณลิกนินสูงที่สุด คือ $39.01 \pm 0.55\%$ ส่วนเหง้ามันสำปะหลัง (CR) เป็นวัสดุที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงที่สุด คือ $45.06 \pm 0.14\%$ และมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสต่ำที่สุด คือ $11.92 \pm 0.13\%$

คุณสมบัติด้านพลังงาน จากการศึกษาค่าความร้อนสูงของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรพบว่า ไบมันสำปะหลัง (CL) มีค่าความร้อนสูงที่สุด 19.29 ± 0.37 MJ/kg รองลงมา ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง (CR) 17.49 ± 0.17 MJ/kg และไบอ้อย (SL) 16.92 ± 0.16 MJ/kg ตามลำดับ สำหรับส่วนตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าความร้อนสูงที่ใกล้เคียงกัน เท่ากับ 14.20 ± 0.32 MJ/kg และ 14.31 ± 0.37 MJ/kg ตามลำดับ

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ชนิด จะเห็นได้ว่า ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) เถ้า (Ash Content) และลิกนิน มีผลต่อค่าความร้อนของวัสดุ กล่าวคือหากวัสดุมีปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และลิกนิน ในปริมาณที่สูง จะส่งผลให้ค่าความร้อนของวัสดุมีแนวโน้มที่สูงตามไปด้วย แต่หากวัสดุมีปริมาณเถ้าที่สูงจะส่งผลให้แนวโน้มของวัสดุมีค่าความร้อนที่ต่ำลง (Ray *et al.*, 2017) (Table 1)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านพลังงานของวัสดุทั้ง 5 ประเภท เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทอื่นที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลในปัจจุบัน ได้แก่ ชันไม้ (17.7 MJ/kg), แกลบ (14.6 MJ/kg) และส่วนผสมระหว่าง ชันไม้: แกลบ (50:50) (15.8 MJ/kg) พบว่า วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภทมีค่าความร้อนที่สูงกว่าและใกล้เคียงกับตัวอย่างวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้เป็นวัตถุดิบในโรงไฟฟ้า ชีวมวลในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าความร้อนของวัสดุทั้ง 5 ประเภทมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งของ

ประเทศไทย ประเภทที่ไม่ได้ทำจากไม้ ซึ่งกำหนดให้เชื้อเพลิงต้องมีค่าความร้อน ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg. (มอก.2772-2560) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) จะพบว่า ไบโอมัสสำหรับหลัง (CL) เหม่งสำหรับหลัง (CR) และไบอ้อย (SL) มีค่าความร้อนที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ในขณะที่ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

2. การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก

การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การผสมผสานวัสดุแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด โดยในรูปแบบของการผสมผสานแบบ 2 ชนิด พบว่าชุดการทดลองที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด คือ ส่วนผสมระหว่าง ไบอ้อย (SL) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 80:20 โดยให้ค่าความร้อน 16.08 ± 0.25 MJ/kg ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนผสมระหว่างไบอ้อย (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 (Table 2, Figure 1)

Table 2 Results of proximate analysis and calorimetry of blended samples of main material agricultural residue.

Blended samples ratio (wt%)			Proximate analysis (%)				Calorimetry
RB	RW	SL	MC	VM	Ash	FC	HHV (MJ/Kg)
100	-	-	8.57±0.13	66.99±0.98	12.70±0.45	11.74±0.89	14.20±0.32
-	100	-	7.70±0.09	67.14±0.44	11.32±0.07	13.85±0.51	14.31±0.37
-	-	100	6.97±0.11	75.69±1.05	4.31±0.05	13.03±0.99	16.92±0.16
80	20	-	10.58±0.18	64.05±0.25	12.06±0.36	13.32±0.09	14.52±0.11
20	80	-	9.48±0.18	65.58±0.39	11.79±0.20	13.15±0.25	14.90±0.21
80	-	20	9.85±0.51	66.46±0.48	10.38±0.36	13.31±0.26	14.63±0.11
20	-	80	7.52±0.06	73.21±0.91	5.70±0.27	13.57±0.77	16.06±0.20
-	80	20	8.87±0.21	67.52±0.60	10.30±0.05	13.32±0.35	15.01±0.38
-	20	80	6.58±0.09	74.12±0.16	5.60±0.11	13.70±0.17	16.08±0.25
60	40	-	10.26±0.20	64.97±0.48	11.82±0.11	12.95±0.41	14.58±0.10
40	60	-	10.15±0.23	65.55±0.76	11.85±0.25	12.45±1.15	14.77±0.22
60	-	40	9.65±0.04	68.70±0.57	8.63±0.41	13.01±0.19	15.05±0.19
40	-	60	9.28±0.11	69.25±0.79	7.28±0.19	14.40±1.06	15.43±0.19
-	60	40	8.71±0.19	68.36±0.37	8.54±0.09	14.39±0.51	15.20±0.23
-	40	60	8.68±0.08	69.40±0.30	6.98±0.04	14.94±0.33	15.55±0.26
40	40	20	10.67±0.17	64.69±0.63	10.62±0.21	14.02±0.64	14.72±0.24
40	20	40	10.43±0.32	66.42±0.46	8.90±0.35	14.26±0.48	15.23±0.08
20	40	40	8.94±0.76	66.72±0.67	8.81±0.17	15.53±0.55	15.28±0.32

Table 2 Results of proximate analysis and calorimetry of blended samples of main material agricultural residue (cont.)

Blended samples ratio (wt%)			Proximate analysis (%)				Calorimetry
RB	RW	SL	MC	VM	Ash	FC	HHV (MJ/Kg)
60	20	20	11.39±0.40	64.19±0.09	10.42±0.09	14.00±0.22	14.56±0.36
20	60	20	10.92±0.18	64.12±0.63	10.33±0.23	14.63±0.33	15.24±0.16
20	20	60	10.20±0.16	67.13±0.40	7.53±0.39	15.13±0.26	15.68±0.30

Note. MC: Moisture Content; VM: Volatile Matter; Ash: Ash content; FC: Fixed Carbon; HHV: High Heating Value.

จากผลข้างต้น จะเห็นได้ว่าการเพิ่มสัดส่วนของไบอ้อยจะส่งผลต่อค่าความร้อนของวัสดุ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเฉพาะวัสดุที่มีค่าความร้อนต่ำอย่างตอซังข้าว (RB) (14.20±0.32) และ ฟางข้าว (RW) (14.31±0.37) ในขณะที่ผสมผสานโดยการแทนที่ระหว่างปริมาณตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เพราะวัสดุทั้งสองประเภทมีองค์ประกอบที่คล้ายกัน (Table 2, Figure 1)

รูปแบบการผสมผสานแบบ 3 ชนิด พบว่าชุดการทดลองที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด คือ ไบอ้อย (SL) : ตอซังข้าว

(RB) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 60:20:20 โดยให้ค่าความร้อน 15.68±0.30 MJ/kg สำหรับชุดการทดลองที่ให้ค่าความร้อนต่ำที่สุดคือ ตอซังข้าว (RB) : ฟางข้าว (RW) : ไบอ้อย (SL) ในอัตราส่วน 60:20:20 ซึ่งให้ค่าความร้อน 14.56±0.36 MJ/kg ผลจากการผสมผสานแบบ 3 ชนิด ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับการผสมผสานแบบ 2 ชนิด คือเมื่อเพิ่มสัดส่วนของไบอ้อย (SL) จะส่งผลให้วัสดุมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ผลที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากไบอ้อย (SL) เป็นวัสดุที่มีค่าความร้อนและปริมาณสารระเหยสูงที่สุดเมื่อเทียบในวัสดุประเภทหลักด้วยกัน (Figure 2)

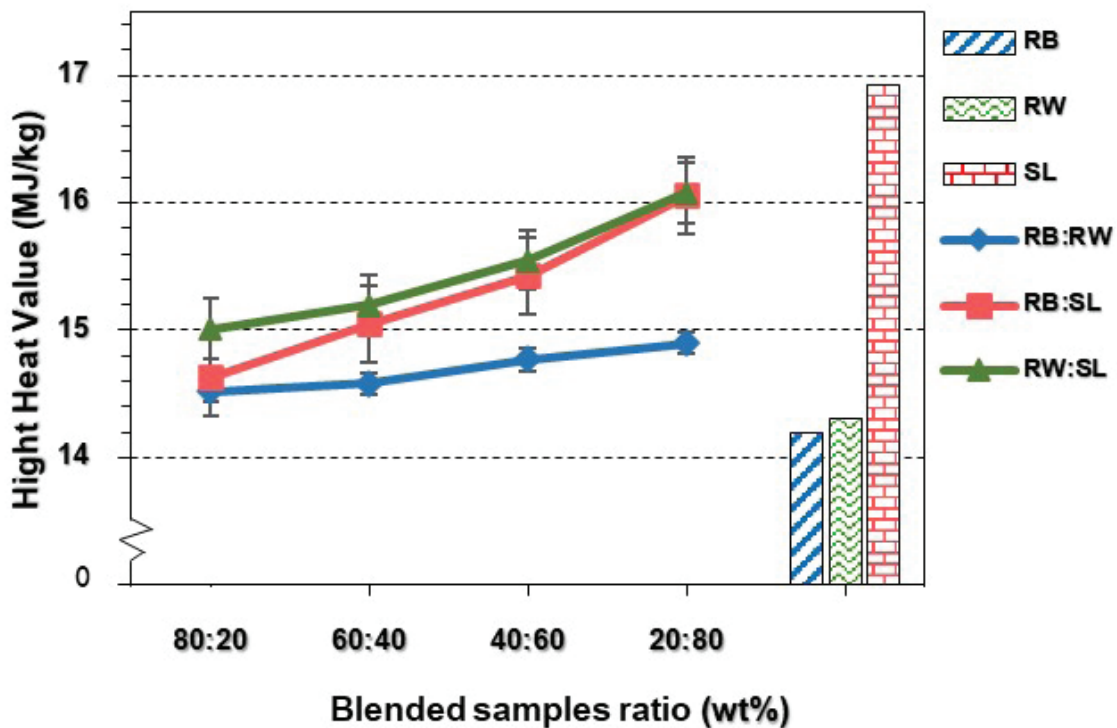


Figure 1 Heat values of samples from two-type blending scheme

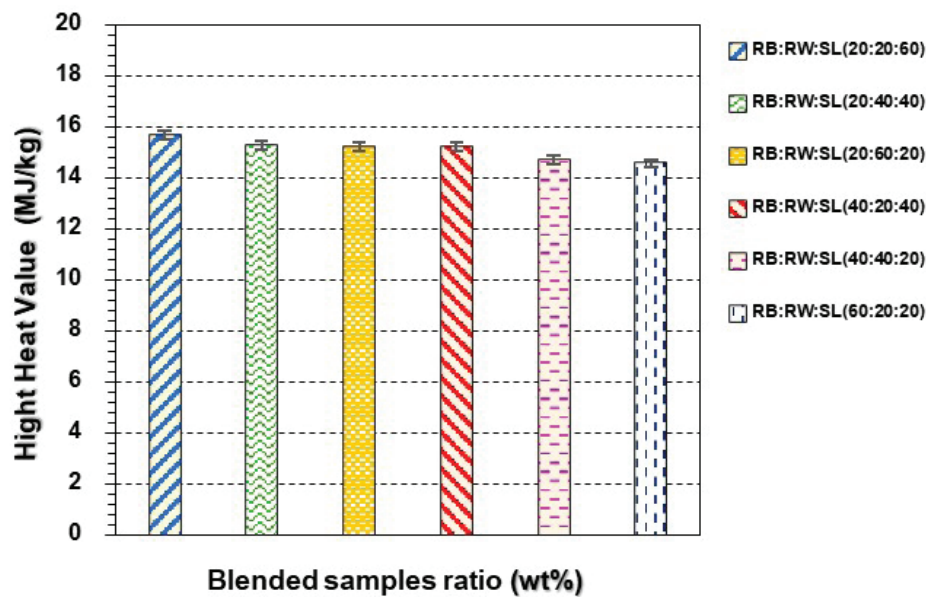


Figure 2 Heat values of samples from three-type blending scheme

นอกจากการเพิ่มสัดส่วนของไบโอดีเซลจะส่งผลต่อค่าความร้อนของวัสดุแล้ว ยังพบว่าส่งผลต่อสัดส่วนเถ้าของวัสดุที่ลดลงด้วย โดยรูปแบบการผสมผสานวัสดุแบบ 2 ชนิด พบว่าชุดการทดลองที่มีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด คือ ไบโอดีเซล (SL) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 80:20 มีปริมาณเถ้า $5.60 \pm 0.11\%$ ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนผสม ไบโอดีเซล (SL) : ตอซังข้าว (RB) อัตราส่วน 80:20 ซึ่งมีปริมาณเถ้า $5.70 \pm 0.27\%$ ในขณะที่การผสมผสานวัสดุแบบ 3 ชนิด พบว่าชุดการทดลองระหว่างไบโอดีเซล (SL) : ตอซังข้าว (RB) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 60:20:20 มีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด ($7.53 \pm 0.39\%$)

การศึกษาได้เปรียบเทียบค่าความร้อนจากวัสดุที่มีการผสมผสาน กับมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งของประเทศไทย ตาม มอก.2772-2560 ซึ่งเชื้อเพลิงควรมีค่าความร้อนสูงไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) ผลการศึกษาพบว่า มีชุดการทดลองซึ่งค่าความร้อนสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จำนวน 19 ชุดการทดลอง และมีจำนวน 2 ชุดการทดลองที่ยังมีค่าความร้อนสูงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) ดังนั้น การวิจัยจึงต้องการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของวัสดุทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว โดยการผสมผสานกับชีวมวลประเภทวัสดุเสริมที่มีค่าความร้อนสูงกว่า ได้แก่ ไบโอดีเซล (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) ดังผลการศึกษาต่อไปนี้

3. การปรับปรุงคุณสมบัติชีวมวลด้วยวัสดุเสริม

การปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านพลังงานของวัสดุหลัก 2 ชนิด ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) ด้วยผสมผสานกับวัสดุเสริม ได้แก่ ไบโอดีเซล (CL) และเหง้า

มันสำปะหลัง (CR) การวิจัยได้ศึกษาในรูปแบบการผสมผสาน 2 แบบ ได้แก่ การใช้วัสดุเสริม 1 ชนิด และ 2 ชนิด

การผสมผสานวัสดุเสริมทีละชนิด พบว่า การผสมผสานสัดส่วนของไบโอดีเซลกับเหง้ามันสำปะหลังในอัตราส่วนต่างๆ กับตอซังข้าว ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้น 4.65% - 13.45% มีค่าความร้อนสูงอยู่ระหว่าง 14.86 ± 0.14 - 16.11 ± 0.22 MJ/kg โดยอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด คือ ตอซังข้าว (RB) : ไบโอดีเซล (CL) อัตราส่วน 50:50 ในขณะที่การผสมผสานไบโอดีเซลกับฟางข้าว ส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับตอซัง โดยค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น 4.96% - 13.56% จากการเพิ่มอัตราส่วนของไบโอดีเซล (Table 3, Figure 3,4)

สำหรับการปรับปรุงคุณภาพวัสดุหลัก โดยการผสมผสานกับเหง้ามันสำปะหลัง พบว่าสามารถเพิ่มค่าความร้อนสูงของตอซังและฟางข้าวได้ 3.66% - 11.97% และ 3.28% - 12.79% ตามลำดับ โดยการเพิ่มอัตราส่วนของเหง้าถึงร้อยละ 50 ทำให้วัสดุผสมผสานมีค่าความร้อนสูงที่สุด คือ 15.90 ± 0.19 MJ/kg สำหรับตอซัง และ 16.14 ± 0.19 MJ/kg

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมผสานวัสดุเสริมทั้งสองชนิดส่งผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานในรูปของค่าความร้อนสูงของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Table 3, Figure 3,4)

การศึกษาได้พิจารณารูปแบบการผสมผสานวัสดุเสริมพร้อมกันทั้งสองชนิด (CL+CR) โดยผลการศึกษาแสดงอิทธิพลของการเพิ่มวัสดุเสริมทั้งสองรูปแบบที่มีแนวโน้ม

เช่นเดียวกัน แต่พบว่าค่าความร้อนสูงของทั้งส่วนผสมตอซัง (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าสูงกว่าการเพิ่มไบโอมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว โดยการใช่วัสดุเสริมทั้งสองชนิด (CL+CR) ผสมผสานกับทั้งตอซังและฟางข้าว

ในอัตราส่วน 50:50 สามารถเพิ่มค่าความร้อนสูงของวัสดุได้ถึง 13.94% และ 13.49% ตามลำดับ และมีค่าความร้อนสูงสุด 16.18 ± 0.25 MJ/kg และ 16.24 ± 0.25 MJ/kg ตามลำดับ (Table 3, Figure 3, 4)

Table 3 Results of proximate analysis and calorimetry of blended samples of supplement material.

Blended samples ratio (wt%)				Proximate analysis (%)				Calorimetry
RB	RW	CL	CR	MC	VM	Ash	FC	HHV (MJ/Kg)
90	-	10	-	10.02±0.46	65.05±0.27	11.25±0.48	13.69±0.63	14.86±0.14
80	-	20	-	9.89±0.25	65.17±0.50	11.15±0.29	13.79±0.81	15.10±0.11
70	-	30	-	9.73±0.38	65.24±0.17	10.99±0.17	14.04±0.55	15.38±0.05
60	-	40	-	9.58±0.34	65.52±0.27	10.60±0.65	14.30±0.70	15.94±0.21
50	-	50	-	9.47±0.18	65.70±0.17	10.02±0.26	14.81±0.09	16.11±0.22
90	-	-	10	9.79±0.14	64.00±0.48	12.04±0.50	14.17±0.12	14.72±0.16
80	-	-	20	9.74±0.02	66.96±0.60	10.49±0.25	12.80±0.38	14.96±0.16
70	-	-	30	9.71±0.07	67.18±0.68	9.15±0.11	13.96±0.57	15.12±0.22
60	-	-	40	9.69±0.13	68.15±0.42	8.71±0.17	13.45±0.59	15.49±0.37
50	-	-	50	9.68±0.07	68.71±0.29	7.69±0.19	13.93±0.27	15.90±0.19
-	90	10	-	8.90±0.16	65.04±0.37	10.98±0.28	15.08±0.25	15.02±0.19
-	80	20	-	8.88±0.10	65.26±0.77	10.36±0.16	15.50±0.78	15.27±0.23
-	70	30	-	8.75±0.09	65.61±0.40	9.61±0.22	16.02±0.36	15.70±0.25
-	60	40	-	8.63±0.23	66.48±0.45	8.99±0.52	15.90±0.38	15.90±0.23
-	50	50	-	8.51±0.08	67.72±0.23	8.47±0.24	15.30±0.09	16.25±0.20
-	90	-	10	10.13±0.20	64.19±0.31	10.28±0.15	15.39±0.29	14.78±0.15
-	80	-	20	9.92±0.21	65.45±0.50	9.40±0.11	15.23±0.30	15.15±0.18
-	70	-	30	9.86±0.04	65.75±0.31	9.08±0.07	15.31±0.38	15.28±0.25
-	60	-	40	9.74±0.36	66.67±0.53	8.78±0.93	14.81±0.62	15.63±0.34
-	50	-	50	9.45±0.38	67.63±0.22	7.52±0.13	15.40±0.46	16.14±0.19
90	-	10		10.34±0.39	62.53±0.46	12.53±0.51	14.60±0.16	15.02±0.23
80	-	20		10.23±0.33	63.96±0.40	11.44±0.61	14.37±0.16	15.12±0.17
70	-	30		10.20±0.11	64.12±0.37	10.55±0.39	15.14±0.08	15.40±0.31
60	-	40		10.12±0.02	64.63±0.19	9.82±0.15	15.43±0.32	15.65±0.17
50	-	50		9.81±0.12	65.92±0.29	9.28±0.49	15.00±0.58	16.18±0.25
-	90	10		9.40±0.17	64.52±0.82	11.12±0.27	14.97±0.69	15.13±0.22
-	80	20		9.17±0.09	65.23±0.39	10.24±0.34	15.37±0.14	15.22±0.31
-	70	30		9.14±0.04	66.02±0.33	9.39±0.15	15.46±0.33	15.49±0.20
-	60	40		9.12±0.09	66.21±0.33	9.23±0.18	15.44±0.37	15.77±0.31
-	50	50		9.08±0.04	67.55±0.64	8.61±0.32	14.76±0.44	16.24±0.25

Note. MC: Moisture Content; VM: Volatile Matter; Ash: Ash content; FC: Fixed Carbon; HHV: High Heating Value.

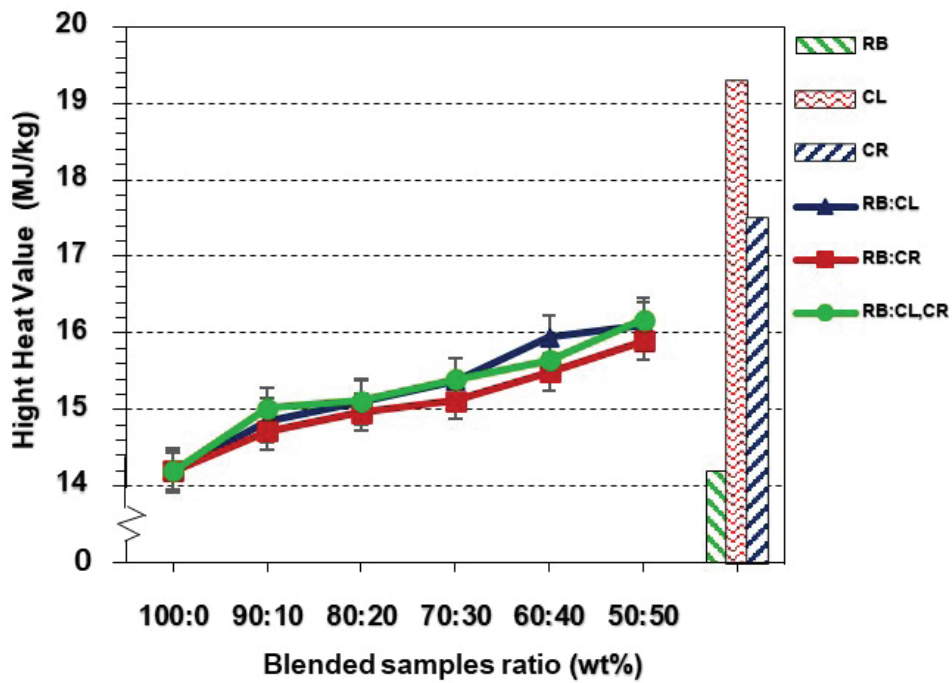


Figure 3 Heat values of rice stubble (RB) blended with supplement materials

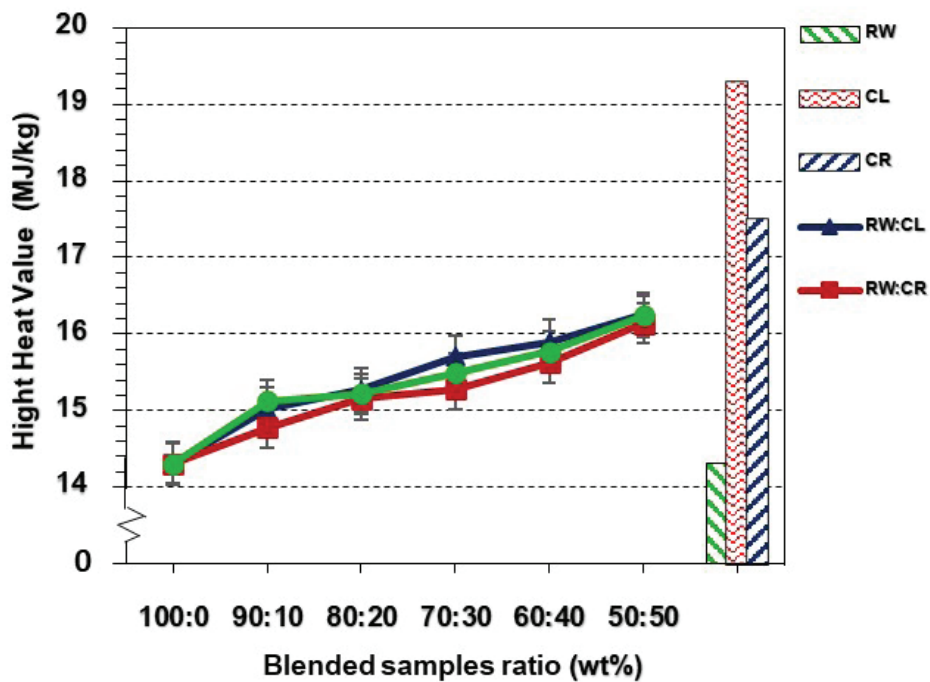


Figure 4 Heat values of rice straw (RW) blended with supplement materials

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภท ไบโอมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง และใบอ้อย เป็นกลุ่มวัสดุที่มีองค์ประกอบส่งผลให้ค่าความร้อนที่สูง ในขณะที่ตอซังข้าว และฟางข้าว เป็นวัสดุที่มีศักยภาพทางด้าน ปริมาณตลอดทั้งปีแต่มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

อย่างไรก็ตามการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีค่า ความร้อนสูงกว่ามาผสมผสานสามารถปรับปรุงคุณสมบัติ ทางด้านพลังงานของวัสดุได้ ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็น ว่าการเพิ่มสัดส่วนของ ไบโอมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง และใบอ้อย ส่งผลทำให้ค่าความร้อนของวัสดุมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้น ทำให้ทุกชุดการทดลองจากการผสมผสานวัสดุ

เหลือทิ้งทางการเกษตรให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ผลลัพธ์สุดท้ายคือการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติทางด้านพลังงานสูงสามารถนำไปผสมผสานกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติทางด้านพลังงานต่ำแต่มีศักยภาพด้านปริมาณที่สูง แนวทางนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านพลังงานให้กับวัสดุ ลดปัญหาการขาดแคลนจากการใช้งานวัสดุประเภทเดียวกัน ลดค่าใช้จ่ายในการจัดการเก็บ และสามารถเป็นประโยชน์กับชุมชนในการประยุกต์รูปแบบการผสมผสานและอัตราส่วนต่างๆ ไปใช้เพื่อเป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงพลังงานทดแทน

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีความหนาแน่นทางพลังงานต่ำจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติให้พร้อมใช้งาน โดยการเพิ่มความหนาแน่นทางพลังงาน ผลจากการศึกษานี้จะนำไปสู่การวิจัยในขั้นต่อไปกับการผลิตเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนจากการผสมผสานชีวมวลโดยใช้กระบวนการอัดแข็งเชื้อเพลิงชีวมวล (Densification) เพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล และการประเมินความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ในการนำเชื้อเพลิงมาใช้ในเชิงพาณิชย์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และทุนสนับสนุนการดำเนินการวิจัยจากศูนย์สหวิทยาการการวิจัยเพื่อความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2564). ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย ประจำปีเพาะปลูก พ.ศ.2556. สืบค้นจาก URL: <http://webkc.dede.go.th/testmax/nod e/2450>. 1 กุมภาพันธ์.

กระทรวงอุตสาหกรรม. (2565). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560)*. สืบค้นจาก URL: https://www.tisi.go.th/website/standardlist/tis_5. 15 มกราคม.

ปีนมนัส วิโสรัมย์. (2563). *การปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

วิจิตรา สิงห์หิรัญนุสรณ์, ปีนมนัส วิโสรัมย์ และเพชรรัตน์ บุญร่วม. (2560). การกระจายเชิงพื้นที่ของเชื้อเพลิงชีวมวลรุ่นที่สองและศักยภาพในการใช้ผลิตพลังงานทดแทน: กรณีศึกษาชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรภายในจังหวัดมหาสารคาม. *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 14*, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม: 266-277

Anukam, A. I., Mamphweli, S. N., Mabizela, P. S., and Meyer, E. L. (2016). Blending Influence on the Conversion Efficiency of the Cogasification Process of Corn Stover and Coal. *Journal of Chemistry*, 2016, 1-8.

Daiglou, V., Stehfest, E., Wicke, B., Faaij, A., and van Vuuren, D. P. (2016). Projections of the availability and cost of residues from agriculture and forestry. *GCB Bioenergy*, 8(2), 456-470.

Domingos, I., Ayata, U., Ferreira, J., Cruz-Lopes, L., Sen, A., Sahin, S. and Esteves, B. (2020). Calorific Power Improvement of Wood by Heat Treatment and Its Relation to Chemical Composition. *Energies* 13(20).

Konrad Kaczynski, K. K., and Piotr, P. (2019). Characteristics of agro and wood biomass combustion in the stream of inert material. E3S Web of Conferences, 137, 01031. *local firing systems in Brazil. Biomass and Bioenergy*, 123, 70-77.

Maksimuk, Y., Antonava, Z., Krouk, V., Korsakova A. and Kursevich, V. (2021). Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for biomass. *Fuel* 299.

Mendoza Martinez, C. L., Sermyagina, E., de Cassia Oliveira Carneiro, A., Vakkilainen, E., and Cardoso, M. (2019). Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 123, 70-77

Ray, A. E., Li, C., Thompson, V. S., Daubaras, D. L., Nagle, N., and Hartley, D. S. (2017). *Biomass Blending and Densification: Impacts on Feedstock Supply and Biochemical Conversion Performance*. The INL is a U.S. Department of Energy National Laboratory.

Sasongko, D., Wulandari, W., Rubani, I. S., and Rusydiansyah, R. (2017). *Effects of biomass type, blend composition, and co-pyrolysis temperature on hybrid coal quality*. 1805: 040009.

Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., and Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683-707.