

การเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของขุยมะพร้าวและเส้นใยขุยมะพร้าวต่อการเป็นเชื้อเพลิงแข็งในโรงไฟฟ้าชีวมวล

Physicochemical properties comparison of sugarcane bagasse pith and fiber as solid fuel for biomass power plants

จารุณี เข้มพิล่า และภูมินทร์ คงโต^{2*}

Jarunee Khempila¹ and Pumin Kongto^{2*}

Received: 25 March 2025 ; Revised: 18 July 2025 ; Accepted: 20 August 2025

บทคัดย่อ

ขุยมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงหลักในโรงไฟฟ้าชีวมวล แต่ขุยมะพร้าวมีองค์ประกอบเป็นขุยมะพร้าวถึง 1 ใน 3 ส่วนและมีโครงสร้างที่แตกต่างจากเส้นใยขุยมะพร้าวซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านเชื้อเพลิงโดยรวมของขุยมะพร้าว ดังนั้นวัตถุประสงค์การวิจัยคือเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของขุยมะพร้าวกับเส้นใยขุยมะพร้าวสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวล การศึกษาเริ่มต้นจากแยกขุยมะพร้าวออกจากเส้นใยขุยมะพร้าวด้วยวิธีทางกล แล้ววิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและละเอียด ค่าความร้อน การสลายตัวทางความร้อน การหลอมของเถ้า องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและเถ้า พบว่า เส้นใยขุยมะพร้าวมีปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย คาร์บอน ไฮโดรเจนสูงกว่าขุยมะพร้าว (ร้อยละ 14.4 84.7 48.4 และ 5.8 ตามลำดับ) ส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงกว่าขุยมะพร้าว (19.53 และ 14.28 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) อีกทั้งมีปริมาณเถ้าน้อยกว่าขุยมะพร้าวถึงร้อยละ 22.8 ขุยมะพร้าวมีสารอนินทรีย์สูงกว่าเส้นใยขุยมะพร้าวอย่างมีนัยสำคัญในเกือบทุกองค์ประกอบ โดยเฉพาะซิลิกอนที่มีปริมาณร้อยละ 21.15 ซึ่งมากกว่าเส้นใยขุยมะพร้าวถึง 19 เท่า ถ้าจากขุยมะพร้าวไม่เกิดการหลอมแม้ที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีองค์ประกอบ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 89.89 ขณะที่ถ้าจากเส้นใยขุยมะพร้าวเริ่มหลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่า (1,100 องศาเซลเซียส) ผลวิจัยสรุปว่า เส้นใยขุยมะพร้าวมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงดีกว่าขุยมะพร้าว การศึกษานี้บ่งชี้ว่าควรพิจารณาแยกขุยมะพร้าวออกก่อนนำส่วนที่เหลือไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า เพื่อลดปัญหาการจัดการเถ้าและช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความร้อนของการใช้ขุยมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง ส่วนขุยมะพร้าวควรพิจารณานำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมกระดาษและบรรจุภัณฑ์ เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุก่อสร้างหรือใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินในภาคการเกษตร

คำสำคัญ: ขุยมะพร้าว, องค์ประกอบเถ้า, โรงไฟฟ้าชีวมวล, เส้นใยขุยมะพร้าว, สมบัติด้านเชื้อเพลิง

Abstract

Sugarcane bagasse is the primary fuel used in biomass power plants. However, bagasse contains pith, which is one-third of its composition and has a structure that differs from fiber, which impacts the overall fuel properties of bagasse. Therefore, this research aimed to compare the physicochemical properties of bagasse pith and fiber for use as fuel in biomass power plants. The study began by mechanically separating the bagasse pith from the fiber, followed by analyzing both proximate and ultimate compositions, heating values, thermal decomposition, ash melting behavior, and the chemical composition of the biomass and ash. The results indicated that bagasse fiber contains higher percentages of fixed carbon, volatile matter, carbon, and hydrogen than pith (14.4, 84.7, 48.4, and 5.8%, respectively). This led to higher heating values for bagasse fiber than pith (19.53 and 14.28 MJ/kg, respectively). Additionally,

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

² ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน, หลักสูตรเทคโนโลยีพลังงาน, ภาควิชาวิศวกรรมสหวิทยาการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹ Physics Program, Faculty of Science and Technology, Rajabhat MahaSarakhm University

² Research Center for Energy and Environmental Sustainability (RCEES), Energy Technology Program, Department of Interdisciplinary Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

* Corresponding author: PuminKongto, Email: pumin.k@hotmail.com

bagasse fiber had 22.8% less ash content than pith. Bagasse pith contained significantly higher inorganic content than sugarcane fiber in almost all components, especially silicon, which comprised 21.15%, approximately 19 times higher than fiber. Ash from bagasse pith did not melt even at 1,500 °C due to its high SiO₂ content of 89.89%, whereas ash from bagasse fiber began to melt at a lower temperature (1,100 °C). The research concludes that bagasse fiber has better fuel properties than pith. This study suggests that consideration should be given to separating the bagasse pith before using the remaining portion as fuel in power plants to reduce ash management issues and improve the thermal properties of bagasse as a fuel. Bagasse pith should be considered for utilization in the paper and packaging industries, as raw material for construction material production, or as soil amendment material in the agricultural sector.

Keywords: Sugarcane pith, ash composition, biomass power plants, sugarcane fiber, fuel property

บทนำ

ตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 (PDP2018) และนโยบายของรัฐบาลที่แถลงต่อรัฐสภา เมื่อวันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2566 มุ่งเน้นการจัดหาพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการและการเติบโตทางเศรษฐกิจ โดยมีนโยบายสำคัญ 3 ประการ คือ การส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การพัฒนาสาธารณูปโภคพื้นฐานด้านพลังงาน และการยกระดับโครงข่ายระบบไฟฟ้าให้มีความมั่นคง ทั้งนี้การส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นนโยบายสำคัญที่ต้องขับเคลื่อนจากปัจจุบันจนกระทั่งสิ้นสุดแผนพัฒนาในปี พ.ศ. 2580 โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) เป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจที่รับผิดชอบส่วนผู้ผลิตภาคเอกชนแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ผู้ผลิตจากต่างประเทศ ผู้ผลิตเอกชนรายใหญ่ (Independent Power Producer, IPP) และผู้ผลิตเอกชนรายเล็ก (Small Power Producer, SPP) ซึ่งมีกำลังการผลิตไฟฟ้าคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 19.15 52.27 และ 28.58 ตามลำดับ (กองบริหารสื่อองค์กร, 2566) โดยพลังน้ำและถ่านหินลิกไนต์คือแหล่งพลังงานหลักที่นำมาใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าในกลุ่มจากต่างประเทศ ได้แก่ สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวและโครงการสายส่งเชื่อมโยง ไทย-มาเลเซีย (HVDC) ผู้ผลิตเอกชนรายใหญ่ใช้แหล่งพลังงานจากก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดีเซล และถ่านหินบิทูมินัส ส่วนผู้ผลิตเอกชนรายเล็กใช้พลังงานจาก 2 รูปแบบ คือ (1) ระบบ cogeneration ใช้ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ และ (2) พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังน้ำ กากอ้อย ขยะ แกลบ เศษไม้ยางพารา น้ำมันยางดำ ก๊าซเหลือทิ้ง ทะลายปาล์ม ก๊าซธรรมชาติจากการผลิตน้ำมันดิบ และชีวมวลอื่นๆ โดยกากอ้อยเป็นชีวมวลที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดในภาคเอกชน (กองบริหารสื่อองค์กร, 2566)

จากข้อมูลการผลิตไฟฟ้าและปริมาณการจำหน่ายไฟฟ้าตามสัญญาขายไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนประจำ

เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566 พบว่ามีกำลังผลิตจากชีวมวล 6 ชนิด รวม 939.64 เมกะวัตต์ โดยกำลังผลิตไฟฟ้าจากกากอ้อยมีปริมาณ 576.09 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 18.99 ของการใช้พลังงานหมุนเวียนทั้งหมด หรือร้อยละ 61.31 จากการใช้ชีวมวลทั้งหมด ขณะที่แกลบ เศษไม้ยางพารา และทะลายปาล์มถูกนำมาใช้เพียงร้อยละ 3.45 2.04 และ 0.29 ตามลำดับ ชีวมวลเป็นชีวมวลที่สร้างทดแทนได้ทุกปี ในปีเพาะปลูก 2565/66 มีอ้อยเข้าหีบ 93.89 ล้านตัน เกิดเศษเหลือเป็นกากน้ำตาล 3.36 ล้านตัน และชานอ้อย 27.22 ล้านตัน (พิจารณาบนฐานของค่า residue-to-product ratio (RPR) ของชานอ้อยเท่ากับ 0.302) (Suttibak, 2017) โดยชานอ้อยที่ออกจากลูกหีบชุดสุดท้ายส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้และเป็นวัตถุดิบผลิตกระดาษ

ชานอ้อยประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญคือ ขุยมอ้อย เนื้ออ้อย และเปลือกอ้อย โดยเนื้ออ้อยประกอบด้วยมัดเส้นใยร้อยละ 50 ของน้ำหนักตันอ้อยอบแห้ง มัดเส้นใยมีลักษณะที่มีค่าความร้อน 23.26–25.58 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (Demirbas, 2001) ใกล้เคียงกับค่าความร้อนของถ่านหิน (29.27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) (Cheng *et al.*, 2020) ทำให้ชานอ้อยที่มีเนื้ออ้อยในปริมาณมากนั้นเหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่เมื่อพิจารณาส่วนของขุยมอ้อยซึ่งมีปริมาณคิดเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักตันอ้อยอบแห้ง พบว่าขุยมอ้อยไม่มีลักษณะของเส้นใยจึงมีองค์ประกอบของลิกนินอยู่ในขุยมอ้อยเพียงเล็กน้อยขณะที่มีเถ้าเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง (Chambon *et al.*, 2018) ส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนที่ลดลง อีกทั้งขุยมอ้อยมีสมบัติดูดซับความชื้นได้สูงกว่าเส้นใย (Lois-Correa, 2012) ดังนั้นเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงส่งผลให้ค่าความร้อนลดลงเช่นกัน (Demirbas, 2002)

ชานอ้อยใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยเผาไหม้ในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เพื่อถ่ายโอนความร้อนให้น้ำในหม้อไอน้ำกลายเป็นไอน้ำแรงดันสูงไปหมุนกังหันไอน้ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนที่เผาไหม้ไม่

ได้ภายหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เรียกว่าเถ้า ซึ่งหากมีปริมาณมากจะทำให้ค่าความร้อนขณะเผาไหม้มีค่าต่ำลง (Demirbas, 2002) เถ้าที่เกิดขึ้นมีทั้งเถ้าหนักและเถ้าลอย จำเป็นต้องกำจัดให้ถูกต้องตามกฎหมาย เช่น ฟังกลบตามหลักสุขาภิบาล ฟังกลบอย่างปลอดภัยเมื่อทำการปรับเสถียรเพื่อทำลายฤทธิ์และให้อยู่ในรูปที่คงตัว ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ หรือนำกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น ทำอิฐบล็อกประสาน หรือสารปรับสภาพดิน (Nayak *et al.*, 2022) วิธีการกำจัดเถ้ามีต้นทุนที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ นอกจากนี้เถ้าที่ออกไซด์ที่มีฤทธิ์เป็นเบส (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O) เมื่อหลอมตัวจะเกาะเป็นคราบเหนียวตามผนังห้องเผาไหม้ หากมีฝุ่นมาจับจะเกิดเป็นตะกรันหนาขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง (Zhang *et al.*, 2016) การลดปริมาณเถ้าก่อนนำมาเป็นเชื้อเพลิงจึงช่วยลดมลพิษ ฝุ่นควัน ลดการซ่อมบำรุงเตาเผา และลดต้นทุนการกำจัดเถ้าที่กระบวนการตั้งต้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเถ้าลอยจากการเผาพืชชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ กากอ้อย แกลบ และ เส้นใยปาล์ม พบว่ากากอ้อยก่อให้เกิดเถ้าลอยมากที่สุด (53.8 มิลลิกรัม/อนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิง) เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์หรือแร่ธาตุในกากอ้อย โดยเถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1.1 ไมครอน (8.84 มิลลิกรัม/อนุภาค/กรัมเชื้อเพลิง) และอนุภาคขนาด 0.07–0.43 ไมครอน (14.28 มิลลิกรัม/อนุภาค/กรัมเชื้อเพลิง) ซึ่งสูงกว่าแกลบและเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยที่มีขนาดเล็กและละเอียดมากนี้จะปลิวไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควัน ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ (Rozhina *et al.*, 2021)

จากผลการศึกษา Palma *et al.* (2021) พบว่า เถ้าของชานอ้อยมีปริมาณออกไซด์ของธาตุสูงที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และการมีซิลิกอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงมักส่งผลให้เถ้ามีอุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น นอกจากนี้ Yunaidi *et al.* (2020) ยังพบว่า SiO_2 ของชานอ้อยมีค่าสูงถึงร้อยละ 74.99 และส่วนประกอบอัลคาไลน์ (Alkali content) อันได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) มีค่ารวมร้อยละ 17.33 ซึ่งองค์ประกอบของเถ้าเหล่านี้ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดตะกรัน แต่ด้วยเถ้าที่มีปริมาณมากจึงมีโอกาสในการเกิดปัญหาเหล่านี้ได้ Garcia-Maraver *et al.* (2017) ศึกษาค่าดัชนีชี้วัดการเกิดตะกรันในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ (slagging) และตะกรันที่เกิดในผิวท่อของหม้อไอน้ำ (fouling) ของชานอ้อย จากดัชนีต่างๆได้แก่ ปริมาณ SiO_2 (ร้อยละ 46.79) บ่งชี้ว่ามีโอกาสเกิดตะกรันในระดับสูง เมื่อพิจารณา

ดัชนี basic to acidic oxides (B/A), ash fusibility index (AFI), fouling index (Fu), slag viscosity index (Sr), initial decomposition temperature (IDT) ซึ่งมีค่า 0.52 1285.20 4.46 69.44 และ 1256 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่ามีโอกาสเกิดตะกรันในระดับกลาง และเมื่อพิจารณาดัชนีตามปริมาณ chlorine content (Cl) และค่า Babcock index (Rs) ซึ่งมีค่าเท่ากันพบว่า มีโอกาสเกิดตะกรันในระดับต่ำ

ผู้วิจัยเห็นปัญหาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังลดลงและจะหมดไปในอนาคตจึงให้ความสำคัญกับพลังงานทดแทนอีกทั้งชานอ้อยเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพสูงของประเทศไทย จากข้อมูลพยากรณ์ปริมาณชานอ้อยและการผลิตไฟฟ้าตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 ชี้ให้เห็นว่าชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือกที่มีศักยภาพทั้งในปัจจุบันและอนาคต อย่างไรก็ตาม ชานอ้อยมีองค์ประกอบหลักเป็นขุยมะพร้าวประมาณ 1 ใน 3 ส่วน อาจส่งผลกระทบต่อตรงต่อสมบัติด้านเชื้อเพลิงของชานอ้อยเนื่องจากความแตกต่างทางโครงสร้างของชีวมวลทั้งสองส่วน ส่งผลต่อค่าความร้อน องค์ประกอบธาตุองค์ประกอบและปริมาณสารอินทรีย์ (เถ้า) ผู้วิจัยจึงมุ่งศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ตลอดจนอุณหภูมิการหลอมของเถ้า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าที่อาจส่งผลต่อการเกิดตะกรันของการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงผลิตความร้อนในโรงไฟฟ้าชีวมวล และเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวล สอดคล้องกับนโยบายภาครัฐที่ส่งเสริมโรงไฟฟ้าชีวมวลพระราชบัญญัติ และโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชน 600 เมกะวัตต์ ตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย

การทดลอง

1. กระบวนการเตรียมชีวมวลตัวอย่าง

นำตัวอย่างชานอ้อยที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทน้ำตาลวังขนาย จำกัด (มหาสารคาม) มาทำการแยกขุยมะพร้าวและเส้นใยอ้อย โดยใช้วิธีการแยกแบบแห้ง (Dry depithing) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

นำชานอ้อยที่ได้รับจากโรงงานไปผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ จนกระทั่งมีความชื้นประมาณหรือต่ำกว่าร้อยละ 10

ซึ่งมวลชานอ้อย 2,000 กรัมของมวลอ้อยอบแห้งแล้วร่อนแยกขุยมะพร้าวและเส้นใยอ้อย โดยผ่านตะแกรง 40 mesh (ช่องเปิดขนาด 0.4 มิลลิเมตร) จะสามารถแยกตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จะเป็นมัดเส้นใยรวมเปลือกอ้อยค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนที่ 2 จะเป็นขุยมะพร้าวละเอียดที่ลอดผ่าน

ช่องตะแกรง โดยในการศึกษานี้จะเรียกชีวมวลซึ่งผ่านการแยกชัຍออกแล้ว (Depithed bagasse) ในส่วนที่ 1 ว่า “เส้นใยอ้อย” และชีวมวลในส่วนที่ 2 เรียกว่า “ชัຍอ้อย” แสดงดัง Figure 1 นำตัวอย่างชีวมวลทั้ง 2 ส่วนเข้าตู้อบลมร้อนโดยให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องภายในโถดูดความชื้น เก็บบรรจุใส่ถุงกันความชื้น (Ziplock) เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่างๆ ต่อไป



Figure 1 (a) Bagasse fiber (b) bagasse pith.

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของตัวอย่างชีวมวล

2.1 องค์ประกอบแบบประมาณ

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ประกอบด้วย ความชื้น (Moisture content, MC) สารระเหยได้ (Volatile matter, VM) คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC) และ เถ้า (Ash) ด้วยเครื่อง Macro thermogravimetric analyzer รุ่น TGA 701 (LECO, USA) ตามมาตรฐาน ASTM E1756-08, E1755-01 และ E872-82 โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง กระบวนการทดสอบเริ่มจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 6 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนจนถึง 107 องศาเซลเซียส และคงที่นาน 15 นาที เพื่อวิเคราะห์ความชื้น จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิถึง 950 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 50 องศาเซลเซียสต่อนาที คงที่ไว้นาน 7 นาที เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย แล้วปล่อยให้เย็นลงถึง 600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ก่อนเพิ่มอุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ไว้นาน 15 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่ 650 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวได้จากการคำนวณดังสมการที่ 1 และรายงานผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%, dry basis)

$$FC = 100 - (\%MC + \%VM + \%Ash) \quad (1)$$

เมื่อ %MC คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น
 %VM คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย
 %Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

2.2 องค์ประกอบแบบละเอียด

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียด (Ultimate analysis) ในตัวอย่างชีวมวล ได้แก่ คาร์บอน (Carbon, C) ไฮโดรเจน (Hydrogen, H) ไนโตรเจน (Nitrogen, N) และ กำมะถัน (Sulfur, S) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ CHNS/O รุ่น Flash 2000 ผลิตในประเทศอิตาลี ดำเนินการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4239 กระบวนการวิเคราะห์เริ่มจากการเผาสารตัวอย่างในบรรยากาศออกซิเจน ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และไอน้ำ โดยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะถูกรีดิวส์ให้เป็นแก๊สไนโตรเจน และตรวจวัดโดยใช้หัววัดชนิดอินฟราเรดเซลล์ (Infrared cells) และนำค่าไปคำนวณเป็นปริมาณไนโตรเจน ส่วนปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจนคำนวณจากปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ และในส่วนของปริมาณออกซิเจนได้จากการคำนวณ ผลการทดสอบแสดงในรูปร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%, dry basis) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่างทดสอบ โดยดำเนินการที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2.3 ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ

ค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV) ของตัวอย่างชีวมวล ได้จากการคำนวณโดยอาศัยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียด อ้างอิงตามสมการของ Ozyuguran *et al.* (2018) ดังสมการที่ 2 และ 3

$$HHV = -4.9140 + 0.2611N + 0.4114C + 0.6114H + 0.3888S + 0.02097O \quad (2)$$

$$LHV = -5.5232 + 0.2373N + 0.4334C + 0.2360H + 0.3732S + 0.000838O \quad (3)$$

เมื่อ C คือ ร้อยละของปริมาณคาร์บอน
 H คือ ร้อยละของปริมาณไฮโดรเจน
 S คือ ร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์
 N คือ ร้อยละของปริมาณไนโตรเจน
 O คือ ร้อยละของปริมาณออกซิเจน

2.4 การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลชัຍอ้อยและเส้นใยอ้อยโดยวิธีวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน/พฤติกรรมทางความร้อนแบบนอนไอโซเทอร์มอลด้วยเครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิกความร้อน รุ่น TGA 701 ยี่ห้อ

LECO ประเทศสหรัฐอเมริกา ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 50–850 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วสร้างกราฟการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ (TGA) และกราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ (DTG)

2.5 อุณหภูมิการหลอมของเถ้าชีวมวล

โดยเตรียมตัวอย่างเถ้าจากการเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนสูงขึ้นถึง 815 องศาเซลเซียส คงที่ไว้ 5 ชั่วโมง (Horák *et al.*, 2019) จากนั้นวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า (Ash fusion temperature) จากชีวมวลด้วยเครื่องตรวจวัดการหลอมเหลวของเถ้า (AF700, Leco, USA) ซึ่งจะบันทึกอุณหภูมิการเปลี่ยนของเถ้ารูปกรวยเถ้าโดยอัตโนมัติ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1857-87 มีการบันทึกอุณหภูมิเปลี่ยนรูปเริ่มต้น Deformation temperature, IDT) และอุณหภูมิหลอมเหลว (Flow temperature, FT) อ้างอิงตามการศึกษาก่อนหน้านี้ (Fang & Jia, 2012)

2.6 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและเถ้าของชีวมวล

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและเถ้าจากชีวมวลด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF) รุ่น Zetium ยี่ห้อ PANalytical ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยเตรียมตัวอย่างเถ้าจากการเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนสูงขึ้นถึง 815 องศาเซลเซียส คงที่ไว้ 5 ชั่วโมง (Horák *et al.*, 2019) นำตัวอย่างเถ้าที่ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของชีวมวลได้แก่ ซิลิคอน (Si) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) เหล็ก (Fe) ฟอสฟอรัส (P) อลูมิเนียม (Al) คลอรีน (Cl) และแมงกานีส (Mn) และนำไปคำนวณความเสี่ยงของการเกาะตัวของเถ้าหรือตะกอน โดยพิจารณาจากดัชนี Alkali index (AI) ซึ่งค่าที่ต่ำกว่า 0.17 หมายถึงมีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะเกิดการเกาะตัวของเถ้าหรือตะกอน ขณะที่หากมีค่าที่สูงกว่า 0.34 หมายถึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่จะเกิดการเกาะตัวของเถ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4 (Elbersen *et al.*, 2017)

$$\text{AI} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{HHV}) \quad (4)$$

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบละเอียด

จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดของตัวอย่างชีวมวลจากช่อดอกและเส้นใยอ้อย (Figure 2) พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในองค์ประกอบทางเคมีซึ่งจะส่งผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้คือ ตัวอย่างเส้นใยอ้อยมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 48.40 ซึ่งสูงกว่าช่อดอกที่มีปริมาณคาร์บอนเพียงร้อยละ 38.50 ปริมาณคาร์บอนที่สูงกว่าบ่งชี้ว่า เส้นใยอ้อยจะให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าช่อดอกเนื่องจากคาร์บอนเป็นธาตุหลักที่ให้พลังงานในการเผาไหม้ ค่าความร้อนมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินศักยภาพของชีวมวลสำหรับการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแปรรูปพลังงาน โดยค่าความร้อนสูง (HHV) จะแสดงถึงพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ โดยค่าความร้อนสูงของเส้นใยอ้อย (19.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) มีค่าสูงกว่าช่อดอก (14.28 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ขณะที่ค่าความร้อนต่ำ (LHV) จะสะท้อนถึงพลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งค่าความร้อนต่ำของเส้นใยอ้อย (16.90 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) มีค่าสูงกว่าช่อดอก (12.23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) เช่นกันดัง Figure 3 ซึ่งความแตกต่างของค่าความร้อนของชีวมวลทั้งสองส่วนนี้มีความสำคัญต่อการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ในส่วนห้องเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าชีวมวล

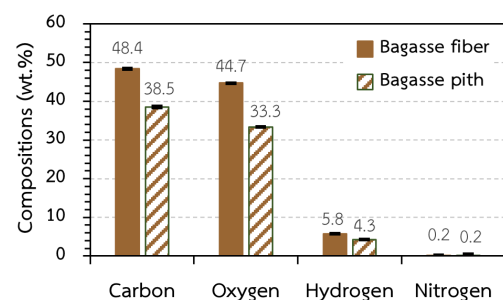


Figure 2 Ultimate analysis (%wt. of dry matter) of the bagasse fiber and pith.

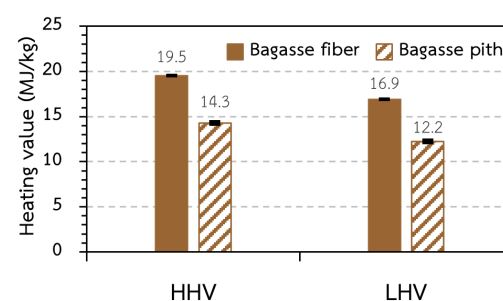


Figure 3 Higher and lower heating value of the bagasse fiber and pith.

อีกทั้งเส้นใยอ้อยมีปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 5.80 ซึ่งสูงกว่าในชุ่ยอ้อย (ร้อยละ 4.30) ปริมาณไฮโดรเจนที่สูงกว่าจะช่วยเพิ่มค่าความร้อนและช่วยในการติดไฟได้ดี เนื่องจากไฮโดรเจนให้ความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูง ส่งผลให้เส้นใยอ้อยมีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งคาร์บอนและไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็น CO_2 และ H_2O พร้อมปลดปล่อยพลังงานความร้อน ยิ่งมีองค์ประกอบเหล่านี้มากยิ่งปลดปล่อยพลังงานต่อหน่วยมวลมากขึ้น เช่นเดียวกันกับออกซิเจนในเส้นใยอ้อยมีปริมาณร้อยละ 44.70 ซึ่งสูงกว่าชุ่ยอ้อย (ร้อยละ 33.33) ออกซิเจนที่มีอยู่ในชีวมวลช่วยให้เผาไหม้ได้ดี ซึ่งอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ แต่ปริมาณที่สูงเกินไปอาจลดค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ขณะที่ปริมาณไนโตรเจนของทั้งเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยมีปริมาณต่ำคือร้อยละ 0.15 และ 0.23 ตามลำดับ ซึ่งช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศจาก NO_x ในกระบวนการเผาไหม้ ขณะที่ตรวจไม่พบกำมะถันจากทั้งสองตัวอย่าง ทำให้ไม่เกิดมลพิษจาก SO_x

นอกจากนี้ยังพบข้อสังเกตคือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจน (C/O) ของเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยมีค่าแตกต่างกัน โดยเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยมีอัตราส่วน C/O เท่ากับ 1.07 และ 1.18 ตามลำดับ อัตราส่วน C/O บ่งบอกถึงความสำเร็จของการเผาไหม้ซึ่งมีความสำคัญในการควบคุมกระบวนการเผาไหม้เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง อัตราส่วน C/O ที่เหมาะสมจะช่วยให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ค่า C/O ต่ำ บ่งชี้ว่าออกซิเจนมีปริมาณมากช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์และหากค่า C/O สูงหมายถึงปริมาณออกซิเจนน้อยส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดเขม่ามากขึ้น รวมทั้งสารมลพิษอื่นๆ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Takehara *et al.*, 2005) ดังนั้นอัตราส่วน C/O ที่สูงกว่าในตัวอย่างชุ่ยอ้อยจึงอาจสื่อได้ถึงปริมาณแก๊สที่แตกต่างกันของตัวอย่างทั้งสอง นอกจากนี้ปริมาณสารอินทรีย์โดยรวม (C+H+O) ที่สูงกว่าในตัวอย่างเส้นใยอ้อย บ่งชี้ว่าอาจมีปริมาณแก๊สต่ำกว่าตัวอย่างชุ่ยอ้อย เนื่องจากสารอินทรีย์เป็นส่วนที่เผาไหม้ได้ในชีวมวล เมื่อวัสดุมีสัดส่วนของสารอินทรีย์สูงจะมีสัดส่วนของสารอนินทรีย์ต่ำ ดังนั้นเส้นใยอ้อยจึงมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณแก๊สต่ำกว่าชุ่ยอ้อย

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน C/H ของเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยพบว่า มีค่า 8.34 และ 8.95 ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วน C/H บ่งบอกถึงโครงสร้างโมเลกุลของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่มีค่า C/H สูง (เช่น ถ่านหิน) มักมีจำนวนคาร์บอนมากกว่าไฮโดรเจน ส่วนเชื้อเพลิงที่มีค่า C/H ต่ำ (เช่น ก๊าซธรรมชาติ) มักมีสัดส่วนไฮโดรเจนสูง ซึ่งค่า C/H ต่ำ บ่งชี้ว่าเกิดการเผาไหม้ที่สะอาดกว่า (Winterbone & Turan, 2015) ขณะที่เมื่อเชื้อเพลิงมีค่า

C/H สูง นั่นคือปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และเขม่ามากกว่าเชื้อเพลิงที่มีค่า C/H ต่ำ ส่งผลต่อค่าความร้อนมักให้พลังงานต่อหน่วยมวลสูง ซึ่งเส้นใยมีอัตราส่วน C/H ต่ำกว่าชุ่ยอ้อย นั่นคือ การเผาไหม้เส้นใยอ้อยเกิดการเผาไหม้ที่สะอาดและให้พลังงานต่อหน่วยมวลสูงกว่าชุ่ยอ้อย อีกทั้งปริมาณไนโตรเจนที่ต่ำและไม่พบกำมะถันในตัวอย่างเส้นใยอ้อย บ่งชี้ว่าจะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่าและเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม

2. ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ ของตัวอย่างชุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อยแสดงดัง Figure 4 พบว่าชุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อยมีค่าความชื้นร้อยละ 3.56 และ 5.68 ลำดับเส้นใยอ้อยมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 14.40 ซึ่งสูงกว่าชุ่ยอ้อยเล็กน้อย (ร้อยละ 11.30) ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงมีค่ามากกว่า อีกทั้งเส้นใยอ้อยมีปริมาณสารระเหย ร้อยละ 84.70 ซึ่งสูงกว่าชุ่ยอ้อยซึ่งมีปริมาณเพียงร้อยละ 64.90 บ่งชี้ว่าเส้นใยอ้อยจะมีการลุกติดไฟและการเผาไหม้ที่รวดเร็วกว่าชุ่ยอ้อย เนื่องจากสารระเหยเป็นส่วนที่เผาไหม้ได้ง่ายในเชื้อเพลิงแข็ง การมีสารระเหยสูงจะช่วยให้อุณหภูมิจุดติดไฟ (Ignition temperature) ต่ำ จึงเกิดการจุดติดและเผาไหม้ได้ง่ายขึ้น (Sha *et al.*, 2021) อย่างไรก็ตามก็อาจต้องการการควบคุมอากาศเข้าที่ดีเพื่อป้องกันการเผาไหม้ที่รวดเร็วเกินไปและความร้อนที่สูงเฉพาะจุด สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Camargo *et al.* (2021) ที่พบว่า คาร์บอนคงตัวของชานอ้อยอยู่ในช่วงร้อยละ 6.9–18 และสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 73–89 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านี้ อาจเกี่ยวข้องกับพันธุ์อ้อย ตลอดจนการมีอยู่ของสิ่งเจือปน ตัวอย่างเส้นใยอ้อยมีปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวในปริมาณที่สูงกว่าชุ่ยอ้อยจึงส่งผลให้มีพลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลที่สูงกว่า สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดก่อนหน้านี้คือปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในเส้นใยอ้อยมีค่าสูงกว่าชุ่ยอ้อย

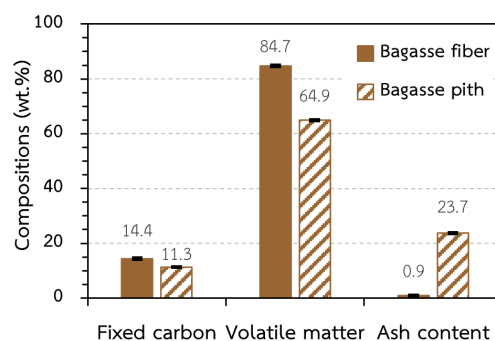


Figure 4 Proximate analysis (%wt. of dry matter) of the bagasse fiber and pith.

ความแตกต่างที่ชัดเจนคือ เส้นใยอ้อยมีปริมาณเถ้าเพียงร้อยละ 0.91 ซึ่งต่ำกว่าขุยมะพร้าวที่มีปริมาณเถ้าสูงอย่างมีนัยสำคัญถึงร้อยละ 23.70 ดังนั้นการมีปริมาณเถ้าที่สูงมากในขุยมะพร้าวจึงส่งผลให้การใช้ขุยมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดปัญหา slagging และ fouling บนผนังเตาเผาและ fouling ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอย (Fly ash) จะเกาะติดบนพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน (Kamara *et al.*, 2022) เถ้าปริมาณสูงจะลดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงโดยรวมเนื่องจากเป็นส่วนที่ไม่ให้พลังงาน ในทางกลับกันอาจก่อปัญหาในการจัดการเถ้าจำนวนมากในระบบเผาไหม้ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานในโรงไฟฟ้าชีวมวล คือเส้นใยอ้อยเหมาะสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยตรง หากแต่ต้องการการควบคุมอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเนื่องจากมีสารระเหยสูง ขณะที่ปริมาณเถ้าต่ำมาก ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการจัดการเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนขุยมะพร้าวมีข้อจำกัดด้านปริมาณเถ้าที่สูง ซึ่งต้องการมาตรการพิเศษในการจัดการปัญหาเถ้า การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีเถ้ามากเช่น ขุยมะพร้าว เหมาะกับระบบการเผาไหม้แบบตะกรับเคลื่อน (Traveling grate stoker) ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบน (กระทรวงพลังงาน, 2559)

3. ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของชีวมวลตัวอย่าง (Thermogravimetric analysis, TGA) โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน และอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา (Derivative thermogravimetric, DTG) ของตัวอย่างขุยมะพร้าว

และเส้นใยอ้อยแสดงดัง Figure 5 พบว่าทั้งสองตัวอย่างมีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนที่คล้ายคลึงกัน โดยเริ่มต้นที่มวลประมาณร้อยละ 95 และมีการสูญเสียมวลเล็กน้อยในช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 50–250 องศาเซลเซียส (ประมาณร้อยละ 5) ซึ่งเกิดจากการระเหยของความชื้นและสารระเหยเบา จากนั้นในช่วงที่ 2 จึงเกิดการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลหลักในช่วงอุณหภูมิ 250–400 องศาเซลเซียส โดยมีการสูญเสียมวลอย่างรวดเร็วประมาณร้อยละ 60–70 ซึ่งสังเกตได้จากพีคหลักในกราฟ DTG ที่ประมาณ 350 องศาเซลเซียส โดยเส้นใยอ้อยมีอัตราการสลายตัวและเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าขุยมะพร้าวเล็กน้อย (เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า) แสดงถึงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส หลังจากนั้นในช่วงที่ 3 อุณหภูมิ 400–850 องศาเซลเซียส ซึ่งในช่วงนี้จะเกิดการสลายตัวของลิกนิน การสลายตัวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เถ้าที่เหลือที่ 850 องศาเซลเซียส มีปริมาณใกล้เคียงกันจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ที่ประมาณร้อยละ 15 โดยตัวอย่างขุยมะพร้าวมีอัตราการสลายตัวที่ช้ากว่าและมีปริมาณเถ้าที่สูงกว่าเล็กน้อย ในทั้งสองตัวอย่างพบพีครองในกราฟ DTG ช่วง 300–400 องศาเซลเซียส บ่งชี้ถึงลักษณะการสลายตัวแบบหลายขั้นตอน ซึ่งเกิดจากวัสดุองค์ประกอบที่ซับซ้อนเนื่องจากขุยมะพร้าวเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มี 3 องค์ประกอบหลัก คือเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ส่วนใหญ่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 220–315, 315–400 และ 160–900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Yang *et al.*, 2007)

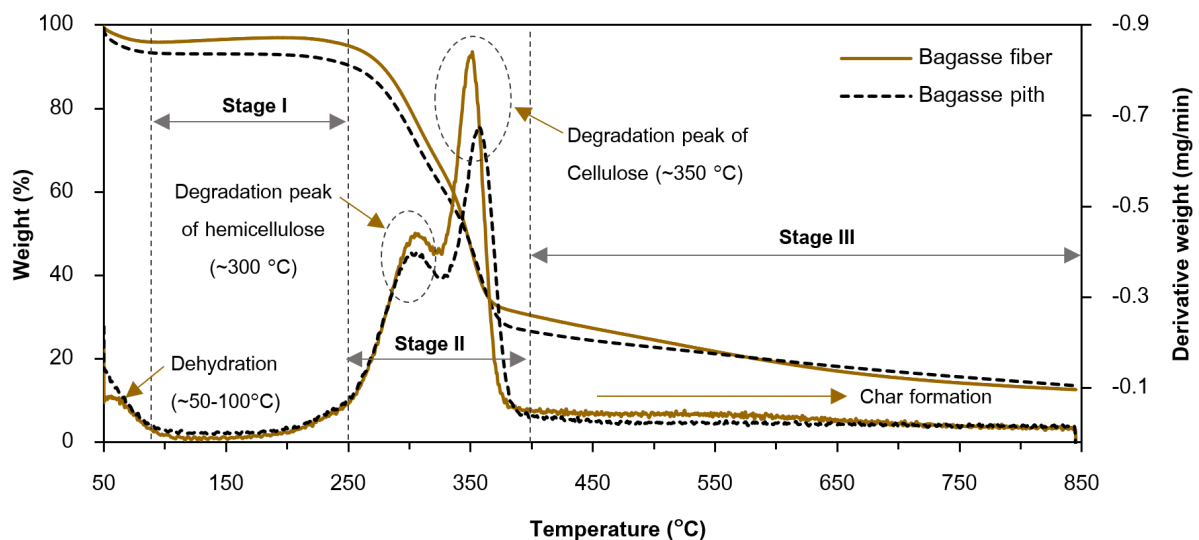


Figure 5 TGA and DTG curves for sugarcane bagasse pith and fiber.

4. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

ผลการทดสอบองค์ประกอบธาตุ ได้แก่ ซิลิคอน (Si) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) เหล็ก (Fe) ฟอสฟอรัส (P) อลูมิเนียม (Al) คลอรีน (Cl) และแมงกานีส (Mn) ของตัวอย่างชุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อย แสดงดัง Figure 6 พบว่าตัวอย่างชุ่ยอ้อยมีสารอนินทรีย์สูงกว่าตัวอย่างเส้นใยอ้อยอย่างมีนัยสำคัญในเกือบทุกองค์ประกอบ โดยเฉพาะซิลิคอนที่มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 21.15 ซึ่งมากกว่าเส้นใยอ้อยถึง 19 เท่า มีปริมาณเหล็ก (ร้อยละ 1.63) สูงกว่าในเส้นใยอ้อยถึง 15 เท่า มีปริมาณอลูมิเนียม (ร้อยละ 0.48) สูงกว่าในเส้นใยอ้อยประมาณ 12 เท่า รวมทั้งมีปริมาณโพแทสเซียมและแคลเซียม (ร้อยละ 0.52 และ 0.42 ตามลำดับ) ที่สูงกว่าเส้นใยอ้อยซึ่งมีปริมาณเพียงร้อยละ 0.32 และ 0.16 ตามลำดับ นอกจากนี้ ธาตุอื่นๆ เช่น แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส คลอรีน และแมงกานีส ต่างมีแนวโน้มที่มีปริมาณสูงกว่าในเส้นใยอ้อยเช่นกัน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Megawati *et al.* (2018) ที่พบว่าองค์ประกอบธาตุหลักของชานอ้อยคือ Si Fe Ca และ K โดยมีสัดส่วนร้อยละ 40.2 24.8 15.7 และ 9.4 ตามลำดับ ธาตุเหล่านี้พบได้ในชีวมวลประเภทต่างๆ เช่น ฟางข้าว ไม้ หญ้า และเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยมีความสำคัญในด้านผลกระทบต่อกระบวนการเผาไหม้ มีผลต่อการเกิดตะกรันและการสะสมของเถ้าในเตาเผา มีผลต่อค่าความร้อนและสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล และระหว่างการเผาไหม้อาจกลายเป็นสารประกอบที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เมื่อนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือในกระบวนการแปรรูปอื่นๆ การควบคุมปริมาณโลหะอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ทจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์

เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อการใช้ slagging ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การหลอมของเถ้าและเกาะติดบนพื้นผิวในบริเวณเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงพบว่า ค่าดัชนี AI ของเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยมีค่าเป็น 0.46 และ 0.15 ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์ (0.17) หมายถึง มีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะเกิดการเกาะตัวของเถ้าหรือการเกิดตะกรัน ขณะที่หากมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ (0.34) หมายถึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่จะเกิดการเกาะตัวของเถ้า ดังนั้นหากพิจารณาตามค่าดัชนี AI จะพบว่าเส้นใยอ้อยมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหา slagging สูงกว่าชุ่ยอ้อย แต่เมื่อพิจารณาปริมาณสารอนินทรีย์สำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดตะกรันหลายชนิดพบว่า ชุ่ยอ้อยมีปริมาณปัจจัยเหล่านั้นในปริมาณที่สูงกว่าเส้นใยอ้อย โดยเฉพาะโพแทสเซียม (ร้อยละ 0.52) ซึ่งเป็นธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและสามารถทำหน้าที่

เป็นฟลักซ์ (Flux) ที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวของเถ้าที่อุณหภูมิต่ำลง (Hrbek *et al.*, 2021) นอกจากนี้ชุ่ยอ้อยยังมีปริมาณเหล็ก (ร้อยละ 1.63) สูงกว่าเส้นใยอ้อยถึง 15 เท่า ซึ่งสามารถก่อตัวเป็นออกไซด์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและส่งผลต่อการเกิดเฟสที่หลอมเหลวได้ง่ายของเถ้า (Wang *et al.*, 2021) รวมทั้งชุ่ยอ้อยมีปริมาณอลูมิเนียมที่สูงกว่าเส้นใยอ้อยถึง 12 เท่า (ร้อยละ 0.48 เทียบกับร้อยละ 0.04) ซึ่งอลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนเกิดเป็นอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) และมีจุดหลอมเหลวต่ำ (Tian *et al.*, 2017) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของซิลิคอนต่อผลรวมของโพแทสเซียมและแคลเซียมพบว่า ชุ่ยอ้อยยังคงมีปริมาณโพแทสเซียมและแคลเซียมสูงเพียงพอที่จะก่อให้เกิดสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและนำไปสู่การเกิด slagging ได้ อย่างไรก็ตาม มีปัจจัยหนึ่งที่อาจช่วยลดความรุนแรงของปัญหาได้บางส่วนคือ ชุ่ยอ้อยมีปริมาณซิลิคอนที่สูงมากถึงร้อยละ 21.15 ซึ่งส่งผลให้เถ้าเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้น (Suryana *et al.*, 2018) เนื่องจากซิลิคอนไดออกไซด์มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1,600 องศาเซลเซียส ขึ้นไป (Norsuraya *et al.*, 2017)

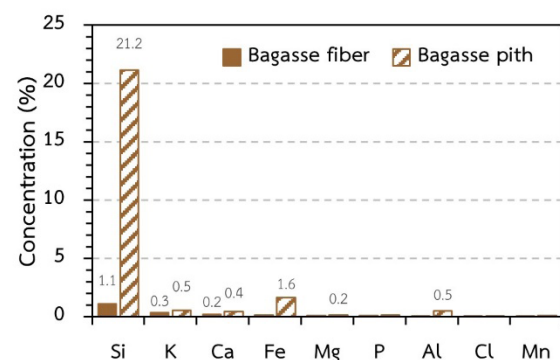


Figure 6 The amount of Si, K, Ca, Fe, Mg, P, Al, Cl and Mn in bagasse fiber and pith.

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อการใช้ fouling ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของอนุภาคเถ้าบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า พบว่า หากใช้ชุ่ยอ้อยเป็นเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหา fouling สูงกว่าเส้นใยอ้อยอย่างมีนัยสำคัญด้วยปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะปริมาณโลหะอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ทสูง (เช่น K, Na, Ca, Mg) เนื่องจากธาตุเหล่านี้ส่งผลต่อการหลอมเหลวของเถ้าที่อุณหภูมิต่ำ ปริมาณโพแทสเซียมในชุ่ยอ้อย (ร้อยละ 0.52) มีค่าสูงกว่าในเส้นใยอ้อย (ร้อยละ 0.32) ซึ่งโพแทสเซียมสามารถหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิ 870–1,150 องศาเซลเซียส (Xiao *et al.*, 2024) และความหนาแน่นบนพื้นผิวที่เย็นกว่า ก่อให้เกิดการสะสม

ของเกลือที่นำไปสู่การเกิด fouling นอกจากนี้ แม้ว่าชีวมวลทั้งสองส่วนจะมีปริมาณคลอรีนที่ต่ำมาก แต่ขุยมั้ยังคงมีปริมาณคลอรีนที่สูงกว่าเส้นใย้อยเล็กน้อย (ร้อยละ 0.029 เทียบกับร้อยละ 0.021) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมเกิดเป็นโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและระเหยง่าย เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิด fouling อีกทั้งขุยมั้ยังมีปริมาณฟอสฟอรัสที่สูงกว่าเส้นใย้อย (ร้อยละ 0.12 เทียบกับร้อยละ 0.06) จึงสามารถก่อตัวเป็นฟอสเฟตที่มีจุดหลอมเหลวต่ำร่วมกับโพแทสเซียมและแคลเซียม

5. ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้า

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากตัวอย่างขุยมั้ยและเส้นใย้อยแสดงดัง Figure 7 พบว่า เถ้าจากขุยมั้ยมีปริมาณซิลิกา (SiO_2) สูงถึงร้อยละ 89.89 ซึ่งมากกว่าเถ้าจากเส้นใย้อยที่มีเพียงร้อยละ 71.07 อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาโลหะอัลคาไล (Alkali) ในชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline earth) ที่ประกอบด้วย แมกนีเซียม (Mg) และ แคลเซียม (Ca) พบว่า เถ้าจากเส้นใย้อยมีองค์ประกอบของโลหะอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ทในปริมาณสูง โดยเฉพาะโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) มีปริมาณร้อยละ 8.54 ซึ่งสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเถ้าจากขุยมั้ยที่มีเพียงร้อยละ 2.05 นอกจากนี้เถ้าจากเส้นใย้อยยังมีปริมาณ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) สูงกว่าเถ้าจากขุยมั้ยเช่นกัน โดยเถ้าจากเส้นใย้อยมีปริมาณ CaO และ MgO ร้อยละ 5.047 และ 3.39 ขณะที่เถ้าจากขุยมั้ยมีปริมาณ CaO และ MgO ร้อยละ 1.48 และ 0.88 ตามลำดับ

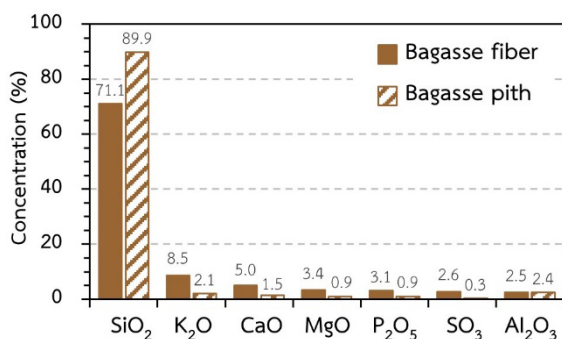


Figure 7 The main oxide content in ash of the bagasse fiber and pith.

นอกจากนี้ เส้นใย้อยยังมีปริมาณซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_3) สูงกว่าถึง 12.5 เท่า (ร้อยละ 2.59 เทียบกับร้อยละ 0.27) และมีปริมาณฟอสฟอรัสออกไซด์ (P_2O_5) สูงกว่าประมาณ 3.4

เท่า (ร้อยละ 3.13 เทียบกับร้อยละ 0.91) โดยมีเพียงปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เท่านั้น ที่มีค่าใกล้เคียงกันในตัวอย่างชีวมวลทั้งสองชนิด (ประมาณร้อยละ 2.42–2.47) ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้มีนัยสำคัญอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมการเกิด slagging และ fouling เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเนื่องจากสารประกอบของแร่ธาตุอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในเถ้าและสะสมเป็นตะกอนที่ผนังเตาของหม้อไอน้ำได้แก่ SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , Mn_3O_4 , SO_3 , Fe_2O_3 (Kamara *et al.*, 2022)

เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อการเกิด slagging ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การก่อตัวของตะกอนหลอมเหลวบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนในบริเวณเตาเผา พบว่าเส้นใย้อยมีโอกาสนในการเกิดปัญหานี้สูงกว่าขุยมั้ยอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเส้นใย้อยมีองค์ประกอบของโลหะอัลคาไลโดยเฉพาะ K_2O ในปริมาณสูงซึ่งมากเป็นอันดับสองรองจาก SiO_2 อีกทั้ง K_2O มีคุณสมบัติในการลดอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า ดังจะเห็นจากลำดับความสำคัญของออกไซด์ของธาตุที่ส่งผลให้จุดหลอมเหลวของเถ้ามีค่าสูงขึ้นคือ $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{CaO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ (Du *et al.*, 2014) ซึ่ง K_2O อยู่ลำดับท้ายบ่งบอกถึงความสำคัญน้อยที่สุดในการเพิ่มจุดหลอมเหลวของเถ้าเมื่อเทียบกับออกไซด์อื่นๆ ประกอบกับเส้นใย้อยมีปริมาณ P_2O_5 สูงกว่าขุยมั้ย ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการหลอมเหลวของเถ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า (Horák *et al.*, 2019) ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างขุยมั้ยมีโอกาสนในการเกิด slagging ต่ำกว่าเส้นใย้อยอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากมีปริมาณ SiO_2 สูงกว่าเส้นใย้อย ซึ่ง SiO_2 มีอุณหภูมิอ่อนตัวในช่วง 1,675–1,800 องศาเซลเซียส อีกทั้งอุณหภูมิการหลอมเหลวในช่วง 1,790–1,900 องศาเซลเซียส (Ringdalen & Tangstad, 2016) ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้

6. ผลการศึกษาพฤติกรรมการหลอมของเถ้า

ผลการทดสอบการหลอมเหลวของเถ้า (Ash melting) จากตัวอย่างขุยมั้ยและเส้นใย้อยแสดงดัง Figure 8 พบว่า เถ้าจากเส้นใย้อยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่อุณหภูมิ (Initial deformation temperature, IDT) 1,140 องศาเซลเซียส และเกิดการหลอมตัวจนแผ่ราบที่อุณหภูมิหลอมเหลว (Fluid Temperature, FT) 1,508 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมินี้ เถ้าจากเส้นใย้อยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างเห็นได้ชัดแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงจากรูปทรงแหลมสูงเป็นแบนราบ นั่นคือ เกิดการหลอมเหลวของเถ้า ขณะที่เถ้าจากขุยมั้ยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่อุณหภูมิ IDT 1,113 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าเถ้าจากเส้นใย้อยเล็กน้อย และเมื่อ

ถึงอุณหภูมิ FT คือ 1,498 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างได้จากเส้นใยอ้อยพบว่า ถ้าจากชุ่ยอ้อยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว สอดคล้องกับองค์ประกอบในชุ่ยอ้อยซึ่งออกไซด์ที่มีสัดส่วนสูงที่สุดคือ SiO_2 (ร้อยละ 89.89) ซึ่ง SiO_2 มีอุณหภูมิอ่อนตัวในช่วง 1,675–1,800 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิการหลอมเหลวในช่วง 1,790–1,900 องศาเซลเซียส (Ringdalen & Tangstad, 2016) ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการหลอมของถั่ว คือ 1,500 องศาเซลเซียสดังนั้นชุ่ยอ้อยจึงไม่เกิดการอ่อนตัวหรือหลอมเหลวในช่วงของการทดสอบ สรุปได้ว่าถั่วจากเส้นใยอ้อยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อได้รับความร้อนสูงถึงอุณหภูมิหลอมเหลว (1,508 องศาเซลเซียส) แสดงถึงการมีองค์ประกอบที่หลอมเหลวได้ ส่วนถั่วจากชุ่ยอ้อยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแม้ที่อุณหภูมิหลอมเหลว (1498 องศาเซลเซียส) บ่งชี้ถึงความทนทานต่อความร้อนสูงและมีแนวโน้มที่จะไม่เกิดปัญหาการเกาะติดหรือการสร้างตะกรันในระบบเผาไหม้

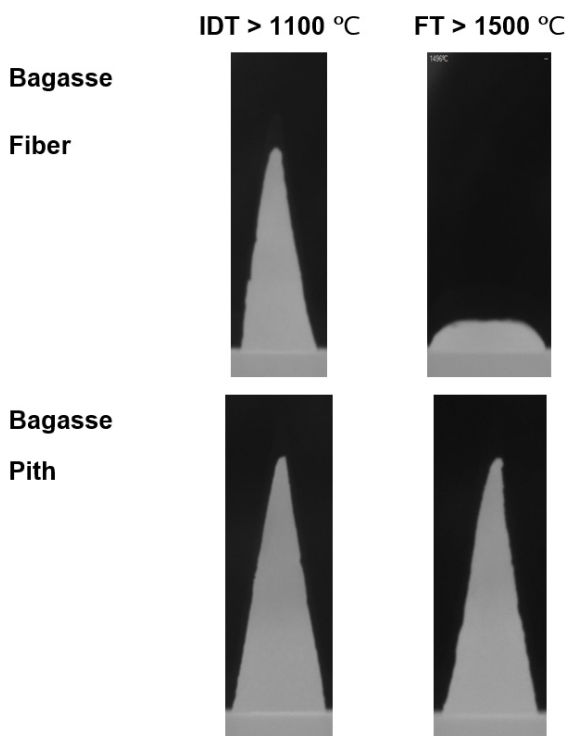


Figure 8 Photos taken during ash fusion test for bagasse fiber and pith ash.

ผลกระทบและข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์ใช้โรงไฟฟ้าชีวมวล

จากการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยพบว่า เส้นใยอ้อยมีความเหมาะสมใน

การใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในโรงไฟฟ้าชีวมวลมากกว่าชุ่ยอ้อยอย่างชัดเจน โดยเส้นใยอ้อยให้ค่าความร้อนสูงกว่าชุ่ยอ้อยถึงร้อยละ 37 (19.5 เทียบกับ 14.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงาน ได้มากขึ้นจากปริมาณเชื้อเพลิงเท่าเดิม นอกจากนี้เส้นใยอ้อยยังมีปริมาณเถ้าต่ำมาก (ร้อยละ 1 ของเส้นใยอ้อยเทียบกับ ร้อยละ 23 ของชุ่ยอ้อย) ซึ่งลดปัญหาการสะสมเถ้าในระบบเผาไหม้และลดความถี่ในการทำความสะอาดและบำรุงรักษาอุปกรณ์ ขณะที่ปริมาณสารระเหยของเส้นใยอ้อยมีค่าสูง (ร้อยละ 84 ของเส้นใยอ้อยเทียบกับ ร้อยละ 65 ของชุ่ยอ้อย) ทำให้การติดไฟและการเผาไหม้เกิดขึ้นได้ง่ายและสมบูรณ์มากขึ้น

ในส่วนของชุ่ยอ้อยแนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นมากกว่าการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวล เนื่องจากชุ่ยอ้อยให้ค่าความร้อนเพียง 14.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าเส้นใยอ้อยถึงร้อยละ 28 และมีปริมาณเถ้าสูง ทางเลือกที่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับชุ่ยอ้อย คือการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษและบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีเส้นใยสั้นที่เหมาะสมสำหรับผลิตกระดาษคุณภาพดี และปริมาณซิลิกาสูงช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น แผ่นอัดหรือบอร์ดเส้นใย หรือใช้ในภาคเกษตรเป็นวัสดุปรับปรุงดินและวัสดุคลุมดิน

การแยกใช้ประโยชน์ตามความเหมาะสมโดยใช้เส้นใยอ้อยเป็นเชื้อเพลิงหลักในโรงไฟฟ้าและขายชุ่ยอ้อยให้อุตสาหกรรมกระดาษหรืออุตสาหกรรมอื่นจะให้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์สูงขึ้น เนื่องจากโรงงานจะได้รับรายได้เพิ่มขึ้นจากการขายชุ่ยอ้อยที่มีมูลค่าเพิ่มสูงกว่าการใช้เป็นเชื้อเพลิง ขณะเดียวกันยังช่วยลดต้นทุนการบำรุงรักษาโรงไฟฟ้า เนื่องจากไม่ต้องจัดการกับปัญหาเถ้าจากชุ่ยอ้อย แนวทางนี้ยังสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้ทุกส่วนอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และช่วยสร้างความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อมผ่านการลดของเสียและเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบที่มีอยู่ในท้องถิ่น อย่างไรก็ตามยังต้องศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากขั้นตอนการแยกชุ่ยอ้อย

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวลชุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อย ตลอดจนอุณหภูมิการหลอมของถั่ว และองค์ประกอบทางเคมีของถั่วพบว่า เส้นใยอ้อยมีองค์ประกอบและสมบัติด้านเชื้อเพลิงดีกว่าชุ่ยอ้อยในแง่ของ ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย คาร์บอน

ไฮโดรเจน และค่าความร้อน ขณะที่เส้นใยอ้อยมีปริมาณเถ้าเพียงร้อยละ 0.91 ซึ่งต่ำกว่าขุยมะพร้าวอย่างมีนัยสำคัญ โดยขุยมะพร้าวมีปริมาณเถ้าสูงถึงร้อยละ 23.70 เถ้าของขุยมะพร้าวมีองค์ประกอบมากที่สุดคือ SiO_2 (ร้อยละ 89.89) และสูงกว่าในเส้นใยอ้อย ทำให้เถ้าจากขุยมะพร้าวไม่เกิดการหลอมที่อุณหภูมิทดสอบ 1,500 องศาเซลเซียส ขณะที่เส้นใยอ้อยเกิดเถ้าหลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่าขุยมะพร้าว (เถ้าเริ่มอ่อนตัวตั้งแต่ 1,100 องศาเซลเซียส) แต่ไม่ได้ส่งผลต่อการเกิด Slagging และ fouling การวิจัยในอนาคตควรศึกษาการแยกขุยมะพร้าวจากขานอ้อยเพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาปริมาณเถ้าที่สูงมากจากส่วนที่เป็นขุยมะพร้าวเมื่อนำขานอ้อยไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) จัดสรรงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2568 มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม [เลขที่สัญญา: FF-RMU_043/2025] และบริษัท น้ำตาล วังขนาย จำกัด (มหาสารคาม) ที่สนับสนุนวัตถุดิบในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กองบริหารสื่อองค์กร. (2566). *กำลังผลิตตามสัญญาของระบบ. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.*

Camargo, J. M. de O., Ríos, J. M. G., Antonio, G. C., & Leite, J. T. C. (2021). Physicochemical properties of sugarcane industry residues aiming at their use in energy processes. In *Sugarcane—Biotechnology for biofuels*. IntechOpen.

Chambon, C. L., Mkhize, T. Y., Reddy, P., Brandt-Talbot, A., Deenadayalu, N., Fennell, P. S., & Hallett, J. P. (2018). Pretreatment of South African sugarcane bagasse using a low-cost protic ionic liquid: A comparison of whole, depithed, fibrous and pith bagasse fractions. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 1–16.

Cheng, B.-H., Huang, B.-C., Zhang, R., Chen, Y.-L., Jiang, S.-F., Lu, Y., Zhang, X.-S., Jiang, H., & Yu, H.-Q. (2020). Bio-coal: A renewable and massively producible fuel from lignocellulosic biomass. *Science Advances*, 6(1), 1–8.

Demirbas, A. (2001). Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy Conversion and Management*, 42(2), 183–188.

Demirbas, A. (2002). Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy Exploration & Exploitation*, 20(1), 105–111.

Du, S., Yang, H., Qian, K., Wang, X., & Chen, H. (2014). Fusion and transformation properties of the inorganic components in biomass ash. *Fuel*, 117, 1281–1287.

Elbersen, W., Lammens, T. M., Alakangas, E. A., Annevelink, B., Harmsen, P., & Elbersen, B. (2017). Lignocellulosic biomass quality: Matching characteristics with biomass conversion requirements. In C. Panoutsou (Ed.), *Modeling and optimization of biomass supply chains* (pp. 55–78). Academic Press.

Fang, X., & Jia, L. (2012). Experimental study on ash fusion characteristics of biomass. *Bioresource Technology*, 104, 769–774.

Garcia-Maraver, A., Mata-Sanchez, J., Carpio, M., & Perez-Jimenez, J. A. (2017). Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency. *Journal of the Energy Institute*, 90(2), 214–228.

Horák, J., Kuboňová, L., Dej, M., Laciok, V., Tomšejová, Š., Hopan, F., Krpec, K., & Koloničný, J. (2019). Effects of the type of biomass and ashing temperature on the properties of solid fuel ashes. *Polish Journal of Chemical Technology*, 21(2), 43–51.

Hrbek, J., Oberndorfer, C., Zanzinger, P., & Pfeifer, C. (2021). Influence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on ash melting behaviour of woody biomass. *Carbon Resources Conversion*, 4, 84–88.

Kamara, B., Kallon, D. V. V., & Mashinini, P. M. (2022). Fouling and slagging investigation on ash derived from Sasol coal using ICP and XRF analytical techniques. *Applied Sciences*, 12(22), 1–11.

Lois-Correa, J. A. (2012). Depithers for efficient preparation of sugar cane bagasse fibers in pulp and paper industry. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 13(4), 417–424.

- Megawati, Fardhyanti, D. S., Putri, R. D. A., Fianti, O., Simalango, A. F., & Akhir, A. E. (2018). Synthesis of silica powder from sugar cane bagasse ash and its application as adsorbent in adsorptive-distillation of ethanol-water solution. *MATEC Web of Conferences*, 237, 1–6.
- Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*, 6, 1–35.
- Norsuraya, S., Norhasyimi, R., & Fazlena, H. (2017). Characterization of sodium silicate derived from sugarcane bagasse ash. *Malaysian Journal of Analytical Science*, 21(2), 512–517.
- Ozyuguran, A., Akturk, A., & Yaman, S. (2018). Optimal use of condensed parameters of ultimate analysis to predict the calorific value of biomass. *Fuel*, 214, 640–646.
- Palma, K. R. de, Tomaz, E., Soria-Verdugo, A., & Silva, M. A. (2021). The influence of the elemental and structural chemical composition on the ash fusibility of sugarcane bagasse and sugarcane straw. *Fuel*, 304, 1–14.
- Ringdalen, E., & Tangstad, M. (2016). Softening and melting of SiO₂, an important parameter for reactions with quartz in Si production. In R. G. Reddy, P. Chaubal, P. C. Pistorius, & U. Pal (Eds.), *Advances in molten slags, fluxes, and salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016* (pp. 43–51). Springer.
- Rozhina, E., Ishmukhametov, I., Nigamatzyanova, L., Akhatova, F., Batasheva, S., Taskaev, S., Montes, C., Lvov, Y., & Fakhrullin, R. (2021). Comparative toxicity of fly ash: An in vitro study. *Molecules*, 26(7), 1926.
- Sha, D., Li, Y., Zhou, X., Zhang, J., Zhang, H., & Yu, J. (2021). Influence of volatile content on the explosion characteristics of coal dust. *ACS Omega*, 6(41), 27150–27157.
- Suryana, R., Iriani, Y., Nurosyid, F., & Fasquelle, D. (2018). Characteristics of silica rice husk ash from Mojogedang Karanganyar Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 367(1), 012008.
- Suttibak, S. (2017). Influence of reaction temperature on yields of bio-oil from fast pyrolysis of sugarcane residues. *Engineering and Applied Science Research*, 44(3), 142–147.
- Takehara, H., Fujiwara, M., Arikawa, M., Diener, M. D., & Alford, J. M. (2005). Experimental study of industrial scale fullerene production by combustion synthesis. *Carbon*, 43(2), 311–319.
- Tian, S., Kang, Z., Chen, L., Fang, Y., Zhuo, Y., & Xu, H. (2017). Characterization of aluminosilicates in fly ashes with different melting points using 27Al magic-angle spinning nuclear magnetic resonance. *Energy & Fuels*, 31(9), 10068–10074.
- Wang, H., Cheng, L., Pu, J., & Zhao, J. (2021). Melting characteristics of coal ash and properties of fly ash to understand the slag formation in the shell gasifier. *ACS Omega*, 6(24), 16066–16075.
- Winterbone, D. E., & Turan, A. (2015). Effect of dissociation on combustion parameters. In D. E. Winterbone & A. Turan (Eds.), *Advanced thermodynamics for engineers* (2nd ed., pp. 295–305). Butterworth-Heinemann.
- Xiao, H., Shi, H., Li, X., Jiang, Y., & Li, J. (2024). Effect of potassium-containing sulfates on high-temperature mineral transformation and coal ash fusibility. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 12496–12511.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12), 1781–1788.
- Yunaidi, Surahmanto, F., & Harnowo, S. (2020). The risk analysis of rice husk of co-firing fuel for boilers in sugar mills. *Journal of Physics: Conference Series*, 1446(1), 1–8.
- Zhang, Y., Li, Q., & Zhou, H. (2016). Effects of ash deposition and slagging on heat transfer. In Y. Zhang, Q. Li, & H. Zhou (Eds.), *Theory and calculation of heat transfer in furnaces* (pp. 173–191). Academic Press.