

สมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านจากเศษมะพร้าว น้ำหอมเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทางการเกษตร

นริส ประทินทอง¹ สร้อยดาว วินิจนันท์รัตน์^{2*} นารีรัตน์ สุขชี² พิสิฐพงษ์ อินทรพงษ์³ และ
อัจฉรีย์ มานะกิจ⁴

¹คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²กลุ่มวิจัยการจัดการสิ่งแวดล้อมและพลังงานเพื่อชุมชนและเศรษฐกิจหมุนเวียน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

⁴กรมการพัฒนาชุมชน กระทรวงมหาดไทย

^{1,2}126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

³209 หมู่ 1 ตำบลรางบัว อำเภอบางแพ จังหวัดราชบุรี 70150

⁴120 หมู่ 3 ศูนย์ราชการเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210

รับบทความ 6 สิงหาคม 2567 แก้ไขบทความ 17 มกราคม 2568 ตอรับบทความ 11 มีนาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเศษมะพร้าว น้ำหอมเหลือทิ้ง 4 กลุ่ม ได้แก่ กะลา เปลือก เปลือกติดกะลา และ
ทะลายเปล่า จากอุตสาหกรรมทางการเกษตรในจังหวัดราชบุรีและสมุทรสงครามมาวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิง และ
ถ่านที่ได้มากระบวนกาเผาทั้งจากเตาหลุมและเตาถังขนาด 200 ลิตร วิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณได้แก่
ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน D3172-13(2021)e1
วิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยบอมบ์ แคลอรีมิเตอร์ และวิเคราะห์โดยละเอียดได้แก่ ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน
ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ รวมทั้งการนำไปอัดเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล และถ่านอัดแท่งโดยใช้แบริ่งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน
ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างเพียงเล็กน้อยในค่าความร้อนสูงของวัสดุที่นำมาทดสอบ
ซึ่งแตกต่างกันไปตามกลุ่มและแหล่งที่มา ค่าความร้อนของเศษมะพร้าวเหลือทิ้งอยู่ในช่วง 17.38 ถึง 20.48 เมกะจูล/
กิโลกรัม ขณะที่ถ่านจากเศษวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้อยู่ในช่วง 24.14 ถึง 31.84 เมกะจูล/กิโลกรัม พบว่าค่าความร้อนเชื้อเพลิง
ที่ได้จากทั้งสองเตามีค่าใกล้เคียงกัน โดยกะลาแสดงค่าความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือ เปลือกติดกะลา
การนำค่าความร้อนของถ่านด้วยสมการที่นำเสนอโดย Demirbas บนการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณให้ผล
ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งสะดวกต่อการใช้งานในทางปฏิบัติ เชื้อเพลิงอัดแท่งจาก
เศษมะพร้าว น้ำหอมที่เหมาะสมได้แก่ชีวมวลจากเปลือกมะพร้าวและถ่านจากกะลามะพร้าวเนื่องจากให้ค่าความร้อน
มากกว่า 20 เมกะจูล/กิโลกรัม

คำสำคัญ : เชื้อเพลิงชีวมวล; ถ่าน; มะพร้าวอ่อน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1443 6054, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: soydoa.vin@mail.kmutt.ac.th

Biofuel and Charcoal Properties of Discarded Aromatic Coconut Residues from Agro-industry

Naris Pratinthong¹ Soydoa Vinitnantharat^{2*} Nareerat Sukkhee²
Pisitpong Intarapong³ and Atcharee Manakij⁴

¹School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

²Environmental and Energy Management for Community and Circular Economy Research Group,
King Mongkut's University of Technology Thonburi

³Ratchaburi Educational Service Center, King Mongkut's University of Technology Thonburi

⁴Department of Community Development, Ministry of Interior

^{1,2}126 Pracha-uthit road, Thung Kru, Bangmod, Bangkok, 10140

³209 Moo 1 Rang Bua, Chom Bueng District, Ratchaburi, 70150

⁴120 Moo 3 The Government Complex Ratthaprasasanabhakti, Laksi District, Bangkok, 10210

Received 6 August 2024; Revised 17 January 2025; Accepted 11 March 2025

Abstract

This research aims to utilize four types of discarded aromatic coconut waste, namely coconut shells, husks, husk with attached shells, and empty fruit bunches obtained from the agriculture industries in Ratchaburi and Samut Songkhram provinces, to analyze their fuel properties and charcoal produced from both a pit kiln and 200-liter drum kiln. The proximate analysis included moisture content, ash, volatile matter, and fixed carbon according to the ASTM D3172-13(2021)e1 standard. The study also evaluated the calorific value using a bomb calorimeter and conducted an ultimate analysis of carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, and sulfur contents. Additionally, the study investigated the potential for briquetting biomass fuel and charcoal using cassava starch as a binder. The results showed minor differences in the high heating value (HHV) of the materials, which varied according to their group and origin. The HHV of the coconut wastes ranged from 17.38 to 20.48 MJ/kg, while the charcoal produced from these materials ranged from 24.14 to 31.84 MJ/kg. The HHV from both kiln types were similar, with coconut shells yielding the HHV, followed by husks with attached shells. The predicted HHV of the charcoal, based on the equation proposed by Demirbas from the proximate analysis data, showed an average deviation of less than 5%, which is practical for applications. The most suitable biomass fuel for briquetting was found to be coconut husk biomass and coconut shell charcoal, as both provided HHVs exceeding 20 MJ/kg.

Keywords : Biofuel; Charcoal; Young coconut

** Corresponding Author. Tel.: +668 1443 6054, E-mail Address: soydoa.vin@mail.kmutt.ac.th*

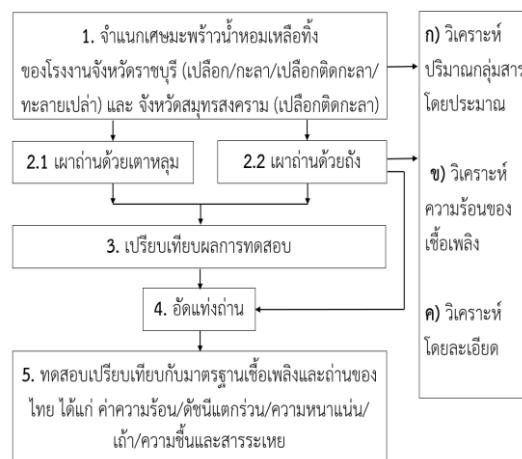
1. บทนำ

พลังงานทดแทนมีบทบาทสำคัญในทศวรรษที่ผ่านมา เมื่อราคาน้ำมันและแก๊สธรรมชาติปรับตัวสูงขึ้นและความผันผวนไม่แน่นอนจากสถานการณ์โลกที่มีแนวโน้มรุนแรงขึ้น ดังนั้นการพึ่งพาตนเองโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาแปลงเป็นพลังงานจึงเป็นทางออกหนึ่งที่สร้างความยั่งยืนให้กับประเทศได้ พืชเศรษฐกิจหนึ่งของไทยที่มีการขยายตัวสูงคือมะพร้าว น้ำหอม โดยในปี พ.ศ. 2565 มีพื้นที่เพาะปลูก 88,510 ไร่ และมีมูลค่าการผลิตสูงถึง 6,075 ล้านบาท [1] การผลิตน้ำมะพร้าวบรรจุขวด หรือมะพร้าวลูกพร้อมดื่ม จะมีเศษมะพร้าวเหลือทิ้งอยู่เป็นปริมาณมาก โดยทะลายมะพร้าวมีผลเฉลี่ย 9-10 ผล น้ำหนักสดเฉลี่ย 20 กิโลกรัม มีส่วนที่บริโภคได้เพียงร้อยละ 25 โดยเป็นเปลือกติดกะลาร้อยละ 65 และทะลายร้อยละ 10 ของน้ำหนักทั้งทะลาย [2] มะพร้าวน้ำหอม 1 ผลจากทะลายที่มีผล 10 ผลมีน้ำหนักเฉลี่ย 1.73 กิโลกรัม [3] ดังนั้นหากอุตสาหกรรมแปรรูปมะพร้าวน้ำหอมมีการใช้มะพร้าวน้ำหอมสด 1 ตันต่อวัน จะมีเศษมะพร้าว น้ำหอมเหลือทิ้งถึง 0.75 ตันต่อวัน ดังนั้นอุตสาหกรรมแปรรูปมะพร้าวน้ำหอมจึงนำเศษมะพร้าว น้ำหอมเหลือทิ้งไปถมที่ดิน ทำปุ๋ย ผังกลบ และเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับเกษตรกรพบว่า ร้อยละ 53.4 มีการจัดการเศษมะพร้าว น้ำหอม น้อย มักจะกองทิ้งไว้ในสวนหรือเผาทิ้งเป็นส่วนใหญ่ [4] ทำให้เกิดมลภาวะในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยในการนำเศษมะพร้าวเหลือทิ้งไปใช้ในรูปแบบของพลังงาน โดยพบว่าถ่านจากเปลือกมะพร้าว น้ำหอมผลิตด้วยเตาเผาถ่านไร้ควันได้คุณภาพของถ่านเช่นเดียวกับถ่านไม้ไผ่ [5] การทำถ่านอัดแท่งจากเปลือกมะพร้าวแก่ ที่อัตราส่วนเปลือกมะพร้าวต่อแป้งมันสำปะหลังที่ 55 ต่อ 50 กรัมเป็นสัดส่วนที่ดีที่สุดเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน [6] และสามารถใช้ขุยมะพร้าวผสมกับมูลสัตว์และซีลี้อยเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ [7] การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง เป็นวิธี

ที่ทำได้ง่าย สะดวกในการจัดเก็บและขนส่ง และงานวิจัยที่ใช้เศษมะพร้าว น้ำหอมเหลือทิ้งเพื่อเป็นเชื้อเพลิงมีอยู่น้อย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของเศษมะพร้าวเหลือทิ้ง (เปลือก กะลา เปลือกติดกะลา และทะลายเปล่า) และถ่านที่ผลิตได้ โดยมีสมมติฐานว่าแหล่งการปลูกมะพร้าว และวิธีการปลูกมะพร้าว น้ำหอมที่ต่างกัน ของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปลูกแบบอินทรีย์ในจังหวัดราชบุรี และการปลูกมะพร้าว น้ำหอมแบบดั้งเดิมโดยชุมชนในจังหวัดสมุทรสงคราม รวมถึงกรรมวิธีการผลิตถ่าน (เตาหลุม และเตาถัง) อาจส่งผลต่อคุณภาพของชีวมวล และถ่านที่ผลิตได้ เพื่อพิจารณาศักยภาพความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน เพิ่มมูลค่าให้กับเศษมะพร้าว น้ำหอมเหลือทิ้งให้เป็นแหล่งพลังงานสำรองทางเลือกและเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปใช้ประโยชน์ ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การดำเนินงานวิจัยโดยรวม สรุปได้ดังรูปที่ 1



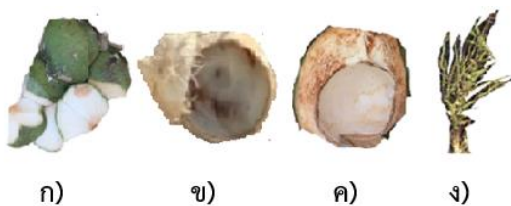
รูปที่ 1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ประกอบด้วย เศษมะพร้าว น้ำหอมเหลือทิ้ง และเตาเผาถ่าน

2.1.1 เศษมะพร้าวน้ำหอมเหลือทิ้ง

เศษมะพร้าวน้ำหอมเหลือทิ้งในการศึกษานี้เป็นมะพร้าวน้ำหอมพันธุ์กันจิบ นำมาจากชุมชนในพื้นที่จังหวัดสมุทรสงคราม และจากอุตสาหกรรมผู้ผลิตมะพร้าวอินทรีย์ จังหวัดราชบุรี เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตและมีเศษมะพร้าวน้ำหอมเหลือทิ้งมาก จำแนกชิ้นส่วนออกได้เป็น 4 กลุ่มได้แก่ เปลือก กะลา เปลือกติดกะลา และทะลายเปล่า ดังรูปที่ 2 นำไปตากแดดให้แห้งเพื่อลดความชื้นก่อนนำไปเผาให้เป็นถ่าน



รูปที่ 2 เศษมะพร้าวน้ำหอมเหลือทิ้ง ก) เปลือก

ข) กะลา ค) เปลือกติดกะลา ง) ทะลายเปล่า

2.1.2 เตาเผาถ่าน

เตาเผาถ่านที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เตาเผาถ่านชาวบ้านแบบหลุม และเตาสมัยใหม่แบบเตาถัง

เตาเผาแบบหลุมมีความลึก 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ดังรูปที่ 3



ก) ข)

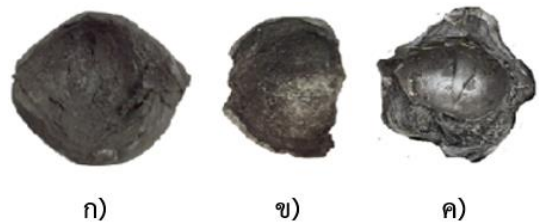
1 ปล่องควัน 2 หลุมใส่เชื้อเพลิง 3 บริเวณใส่เชื้อเพลิง

รูปที่ 3 เตาเผาถ่านแบบเตาหลุม ก) เตาหลุมหลังใส่เชื้อ

เพลิง ข) เตาหลุมระหว่างเผา

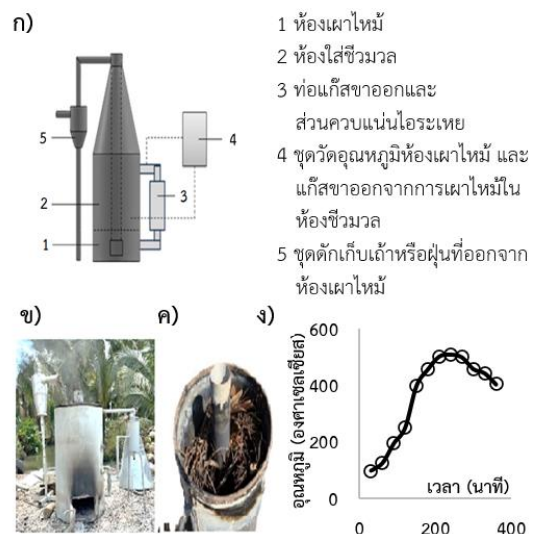
เตาหลุมมีการวางไม้เป็นฐานก่อนแล้วนำเปลือกติดกะลา จากจังหวัดสมุทรสงคราม น้ำหนักประมาณ 58 กิโลกรัม ใส่ในหลุมจนเต็มพื้นที่ ใช้สั้งกะสี

วางคลุมทับก่อนกลบด้วยดินอีกหนึ่งชั้น เหลือพื้นที่สำหรับจุดไฟเข้าไปในเตาเผา นำสั้งกะสีมาฉนวนทำเป็นปล่องควันด้านบน หลังจุดไฟเข้าเตาเผาแล้ว ปิดเตาด้วยดินให้สนิทเหลือเพียงปล่องควัน ใช้เวลาในการเผา 3 วัน หรือสังเกตควันไฟจากปล่องควันว่าหมดแล้ว จึงเปิดเตาเผา แล้วใช้น้ำดับความร้อนที่ระอุที่ตัวถ่านเพื่อไม่ให้ถ่านติดไฟจนกลายเป็นเถ้า นำถ่านไปตากแดดประมาณ 3-5 วัน จนแห้ง ได้ปริมาณถ่านคิดเป็นร้อยละ 12 เมื่อผลิตเป็นถ่านแล้ว สามารถแยกกะลาออกจากเปลือกได้ (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 ถ่านเปลือกมะพร้าวติดกะลาจากเตาหลุม

ก) เปลือก ข) กะลา ค) เปลือกติดกะลา



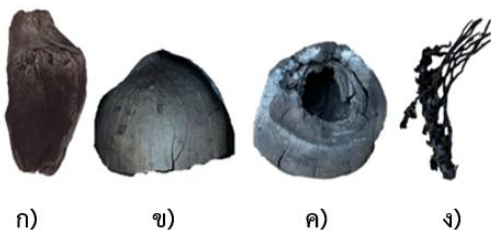
รูปที่ 5 เตาเผาถ่านแบบถัง ก) ภาพร่างชุดเตาเผา

ข) เตาเผาพร้อมอุปกรณ์ดักเก็บเถ้า ค) ห้องใส่เชื้อเพลิง

ง) อุณหภูมิห้องเผาถ่านที่วัดได้

เตาเผาแบบถัง 200 ลิตร ประกอบด้วย 1) ห้องเผาไหม้ 2) ห้องใส่ชีวมวล 3) ท่อแก๊สขาออกและส่วนควบแน่นไอรระเหย 4) ชุดวัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้และแก๊สขาออกจากการเผาในห้องใส่ชีวมวลและ 5) ชุดดักเก็บเถ้าหรือฝุ่นที่ออกจากห้องเผาไหม้ ดังรูปที่ 5

การผลิตถ่านเริ่มจากนำเศษมะพร้าว น้ำหอมเหลืทิ้ง ได้แก่ เปลือกติดกะลา กะลา และทะเลาะเปล้าจากจังหวัดราชบุรี ใส่ลงในห้องใส่ชีวมวลมีน้ำหนักเฉลี่ย 25 กิโลกรัมต่อครั้ง (เผาแยกกับเปลือกติดกะลาจากจังหวัดสมุทรสงคราม) ปิดฝาด้านบนให้สนิท จุดไฟในห้องเผาไหม้ผ่านช่องเปิดด้านล่าง และเติมเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง ไอน้ำและสารระเหยจากชีวมวล ถูกควบแน่นผ่านท่อที่ต่อกับห้องใส่ชีวมวล ใช้เวลาในการเผา 4-6 ชั่วโมง จนกระทั่งไม่มีควันขาวหรือซินแก๊ส (Syngas) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนปล่อยเตาเผาให้อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส จึงนำถ่านออกจากถัง ถ่านจากการผลิตด้วยเตาถัง (รูปที่ 6) ได้ผลผลิตของถ่านจากเปลือก กะลา และเปลือกติดกะลา โดยเฉลี่ยร้อยละ 24 และถ่านจากทะเลาะร้อยละ 18



รูปที่ 6 ถ่านจากเตาเผาแบบถัง 200 ลิตร

ก) เปลือกมะพร้าว ข) กะลามะพร้าว
ค) ทะเลาะเปล้า ง) เปลือกติดกะลา

2.2 การวิเคราะห์ค่าความร้อน ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณ และสมบัติทางเคมีโดยละเอียด

การวิจัยนี้ได้นำเศษมะพร้าว น้ำหอมเหลืทิ้ง และถ่านที่ผลิตได้มาวิเคราะห์หาปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณ (Proximate Analysis) ได้แก่ ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว ตามวิธีในมาตรฐาน

ของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน ASTM D 3172-13 (2021)e1 [8] ที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) และปริมาณคาร์บอนคงตัว คำนวณดังสมการที่ (1)

$$FC = 100 - (M + A + V) \quad (1)$$

โดยที่ FC , M , A และ V ได้แก่ ร้อยละคาร์บอนคงตัว ความชื้น เถ้า และสารระเหย ตามลำดับ วิเคราะห์ค่าความร้อน ด้วยเครื่อง บอมบ์ แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-350 ประเทศสหรัฐอเมริกา สมบัติทางเคมีโดยละเอียด (Ultimate Analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง Elemental Analysis ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN628 ประเทศสหรัฐอเมริกา และ ซัลเฟอร์ ด้วยเครื่อง Sulfur Analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น 628S ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มจธ. โดยการวิเคราะห์ทำซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับปริมาณออกซิเจน คำนวณดังสมการที่ (2)

$$O = 100 - (C + H + N + S) \quad (2)$$

โดยที่ O , C , H , N , S ได้แก่ ร้อยละของออกซิเจน คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ

การคำนวณหาสูตรโมเลกุลในรูป $CH_xO_yN_z$ ทำโดยการหาสัดส่วนโดยมวลของ ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และ ไนโตรเจนต่อคาร์บอน (N/C) ด้วยการหารค่าร้อยละน้ำหนักของแต่ละธาตุด้วยเลขมวลของธาตุเพื่อหาค่า a , b และ c

2.3 การทำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง และถ่านอัดแท่ง

การทำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง ใช้เฉพาะเปลือกตากแห้งแล้วจากจังหวัดสมุทรสงคราม คัดความยาวอยู่ในช่วง 5-7 เซนติเมตร ส่วนถ่านอัดแท่งใช้เฉพาะ

ถ่านกะลา จากจังหวัดสมุทรสงคราม และจังหวัดราชบุรี นำมาผสมกับตัวประสานที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังที่เคี้ยวจนเป็นกาวใสแล้ว (แป้ง 10 กรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตร) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเปลือกหรือถ่านต่อตัวประสาน 100 ต่อ 10 [9] นวดให้เข้ากัน แล้วนำไปใส่ในกระบอกสุบอัดแท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ดังรูปที่ 7 ปรับกระบอกสุบให้มีความยาวสำหรับการอัดเปลือก และถ่านเท่ากับ 8 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ อัดด้วยแรงคนที่แรงเท่า ๆ กัน จากนั้นนำเชื้อเพลิงอัดแท่งออก เพื่อนำไปตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 3-5 วัน ได้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลจากเปลือกมะพร้าว และถ่านอัดแท่งเท่ากับ 29.2 ± 0.1 และ 53.6 ± 4.4 ตามลำดับ ก่อนนำไปวิเคราะห์หาค่าความร้อน ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณ ความหนาแน่น และดัชนีแตกกร่อน



รูปที่ 7 อุปกรณ์สำหรับอัดแท่ง PVC

การหาค่าดัชนีแตกกร่อนทำโดยนำเชื้อเพลิงอัดแท่งใส่ถุงพลาสติก แล้วปล่อยจากที่สูง 2 เมตร ลงสู่พื้นคอนกรีต จากนั้นนำก้อนเชื้อเพลิงอัดแท่งส่วนที่เหลือดังกล่าวไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาค่าดัชนีแตกกร่อนดังสมการที่ (3) [10]

$$R = \frac{W_i}{W_f} \quad (3)$$

โดยที่ R คือดัชนีแตกกร่อน W_i และ W_f คือน้ำหนักก้อนอัดแท่งก่อนและหลังทดสอบ ตามลำดับ (กรัม)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดย

ประมาณ

ผลวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณ แสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าความชื้นของเศษมะพร้าว น้ำหอมแห้งก่อนเผาอยู่ในช่วงร้อยละ 1.17-7.13 และถ่านอยู่ในช่วงร้อยละ 0.09-6.12 ความชื้นนี้มีผลต่อค่าความร้อนโดยตรง เพราะความชื้นสูงทำให้สูญเสียความร้อนไปกับการระเหยของน้ำในระหว่างการเผาไหม้ ปริมาณเถ้าของเศษมะพร้าว น้ำหอมแห้งก่อนเผา มีปริมาณน้อยมาก (ร้อยละ 1.64-7.16) เมื่อผลิตเป็นถ่าน พบว่าปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น (5.08-20.24) การมีปริมาณเถ้าสูง ทำให้ยุ่งยากในการกำจัด และเกิดตะกรันได้ ซึ่งปริมาณเถ้าไม่ควรเกินร้อยละ 20 [11] ค่าความร้อนของเศษมะพร้าว น้ำหอมแห้งก่อนเผาอยู่ในช่วง 17.38-20.48 เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน [11] โดยการผลิตถ่านด้วยเตาถัง และเตาหลุมให้ค่าความร้อนไม่แตกต่างกัน แต่ถ่านจากสมุทรสงครามมีค่าความร้อนและคาร์บอนคงตัวสูงกว่าจากราชบุรี ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับแหล่งที่มาของมะพร้าวที่แตกต่างกัน เนื่องจากดินที่ปลูกอาจมีผลต่อสมบัติทางเคมีของเศษมะพร้าว โดยเศษมะพร้าว น้ำหอมจากจังหวัดราชบุรี มาจากสวนมะพร้าวอินทรีย์ ส่วนแหล่งมะพร้าวจากสมุทรสงครามมาจากมะพร้าวที่ชุมชน แบบดั้งเดิม

ปริมาณคาร์บอนคงตัวของทะเลายเปล่า และกะลาจากราชบุรี มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ เนื่องจากมะพร้าวอ่อนมีกะลาที่บางและมีเนื้อมะพร้าวติดอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับมะพร้าวแก่ แต่กะลามะพร้าวอ่อนมีปริมาณสารระเหยสูงกว่าเปลือก จึงทำให้มีค่าความร้อนสูง และพบว่าค่าคาร์บอนคงตัวของเปลือกมีค่าสูงกว่ากะลา สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [12] ที่พบว่าคาร์บอนคงตัวของเปลือกและกะลาเท่ากับร้อยละ 24.9

และ 22.1 สารระเหยเท่ากับร้อยละ 46.4 และ 77.2 ตามลำดับ ปริมาณสารระเหยของเศษมะพร้าว น้ำหอมแห้งก่อนเผา มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 74.22-85.04 ซึ่งปริมาณสารระเหยสูงมีแนวโน้มที่ค่าความร้อนสูงด้วย เศษมะพร้าว น้ำหอมเมื่อทำให้เป็นถ่านแล้วทำให้มีค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนสูงขึ้น ส่วนปริมาณสารระเหยลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยผลิตถ่านจากเปลือกมะพร้าว น้ำหอม จังหวัดราชบุรี พบว่าค่าคาร์บอนคงตัวของเปลือกและถ่านที่ผลิตได้เท่ากับร้อยละ 22.48 และ 73.48 และความร้อนเท่ากับ 17.06 และ 28.71 เมกะจูล/กิโลกรัม ตามลำดับ [5] ผลการศึกษาพบว่าถ่านที่ผลิตได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง และมีเพียงถ่านจากกะลาที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านไม้หุงต้ม [13]

3.2 ผลการวิเคราะห์โดยละเอียด

การวิเคราะห์โดยละเอียดเป็นการหาร้อยละของ C, H, N, O, S เพื่อใช้หาค่าความร้อนจากการเผาไหม้ และสูตรโมเลกุล ดังแสดงในตารางที่ 2

อัตราส่วน O/C แสดงถึงควมมีเสถียรภาพ (Stability) เศษมะพร้าว น้ำหอมแห้งมีค่า O/C อยู่ในช่วง 0.65-0.74 เมื่อนำมาทำให้เป็นถ่าน ค่า O/C ลดลงเหลืออยู่ในช่วง 0.01-0.42 อัตราส่วน H/C บ่งบอกถึงความเป็นแอโรแมติก (Aromaticity) โดยเศษมะพร้าว น้ำหอมมีค่าในช่วง 1.52-1.67 และ มีค่าลดลงเมื่อเป็นถ่าน โดยอยู่ในช่วง 0.43-0.86 European Biochar Certificate (EBC) กำหนดให้อัตราส่วน O/C และ H/C ของถ่านชีวภาพ (Biochar) ควรมีค่าน้อยกว่า 0.4 และ 0.7 ตามลำดับ [14] ซึ่งถ่านที่ผลิตจากเศษมะพร้าว น้ำหอมเหลือทิ้งมีค่าผ่านเกณฑ์ EBC ยกเว้นทะเลาเปลามีค่า O/C สูงเกินเกณฑ์ และ เศษเหลือทิ้งจากมะพร้าวของจังหวัดราชบุรี ได้แก่เปลือก และเปลือกติดกะลา มีค่า H/C เกินเกณฑ์ การลดลงของอัตราส่วน O/C และ

H/C ดังกล่าว เกิดจากการสลายตัวของโมเลกุลในระหว่างการให้ความร้อนเกิดเป็นแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแก๊สอื่น ๆ ในระหว่างการผลิตถ่าน ทั้งนี้ การผลิตถ่านเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) อุณหภูมิในการเผาไหม้โดยทั่วไปประมาณ 400 องศาเซลเซียส [15] และการผลิตถ่านจากเปลือกมะพร้าว และกะลามะพร้าวด้วยเตาเผา 200 ลิตร มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 378 องศาเซลเซียส และ 704 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [16] ซึ่งสามารถทำให้เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ถูกย่อยสลายได้ด้วยความร้อน โดยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ถูกย่อยสลายได้เร็วที่อุณหภูมิ 315-400 องศาเซลเซียส และ 220-315 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนลิกนินย่อยสลายได้ยากกว่า โดยเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (160-900 องศาเซลเซียส) แก๊สส่วนใหญ่ที่เกิดจากการย่อยสลายเซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส ได้แก่คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ตามลำดับ ส่วนการย่อยสลายลิกนิน เกิดแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และมีเทน (CH₄) [17] ค่าความร้อนของลิกนินอยู่ในช่วง 23.26-25.58 เมกะจูล/กิโลกรัม สูงกว่าพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่มีค่าความร้อน 18.6 เมกะจูล/กิโลกรัม และสารสกัด (Extractives) ให้ค่าความร้อนสูงกว่า 30 เมกะจูล/กิโลกรัม [18] โดย Wang และ Sarkar [19] รายงานว่าเปลือกและกะลามะพร้าวมีปริมาณเซลลูโลส (ร้อยละ 54-65) มากกว่าปริมาณลิกนิน (ร้อยละ 30-42) โดยกะลามะพร้าวมีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเปลือก ขณะที่ Lomeli-Ramirez et al. [20] รายงานว่าเส้นใยมะพร้าวอ่อนมีปริมาณเซลลูโลส น้อยกว่าลิกนิน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 29.96 และ 35.46 ตามลำดับ สูตรโมเลกุลของเศษมะพร้าว น้ำหอมแห้งและถ่านช่วยบอกประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีปริมาณไฮโดรเจนต่ำ เมื่อเผาไหม้จะเกิดโมเลกุลของน้ำต่ำ และให้ค่าความร้อนสูงกว่าได้

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์กลุ่มสารโดยประมาณของเศษวัสดุเหลือทิ้งและถ่านที่ผลิตได้

ชนิดของวัสดุ	การวิเคราะห์โดยประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				ค่าความร้อน (เมกะจูล/ กิโลกรัม)	หมายเหตุ
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว		
1.เศษมะพร้าวน้ำหอมแห้ง						
1.1 เปลือกมะพร้าว						
ราชบุรี	3.51±0.57	6.05±0.27	75.37±1.56	15.07±2.34	17.52±0.26	
สมุทรสงคราม	4.73±1.18	4.90±0.14	74.22±0.19	16.15±1.04	18.39±0.13	-
1.2 กะลามะพร้าว						
ราชบุรี	7.13±0.20	1.64±0.27	85.04±1.33	6.19±1.44	19.70±1.33	
สมุทรสงคราม	6.44±0.13	2.01±0.24	81.81±4.27	9.74±1.21	20.48±0.16	-
1.3 ทะลายเปล่า						
ราชบุรี	2.43±0.87	6.76±0.46	80.17±2.48	10.64±2.91	17.38±0.14	
สมุทรสงคราม	1.17±0.31	7.16±0.16	78.60±0.63	13.07±0.74	17.44±0.68	-
มาตรฐานเชื้อเพลิง ¹	< 8-10	< 20		> 15	12.56	
2. ถ่าน						
2.1 เปลือกมะพร้าว						
ราชบุรี	1.56±1.22	10.18±1.06	25.94±1.65	56.27±2.49	24.53±0.38	ถ่านเตาถัง
สมุทรสงคราม	2.55±0.26	12.67±0.41	8.90±0.13	75.88±0.30	28.43±0.14	ถ่านเตาถัง
	4.17±0.61	14.93±0.13	17.62±0.97	63.28±0.19	27.07±0.03	ถ่านเตาหลุม
2.2 กะลามะพร้าว						
ราชบุรี	0.09±0.04	5.08±0.63	24.07±2.78	70.76±4.71	31.84±0.47	ถ่านเตาถัง
สมุทรสงคราม	1.24±0.31	7.45±0.47	9.88±0.92	81.43±0.74	31.40±0.09	ถ่านเตาถัง
	3.5±0.75	6.67±1.28	15.51±0.87	74.32±2.24	31.25±0.14	ถ่านเตาหลุม
2.3 ทะลายเปล่า						
ราชบุรี	2.35±0.40	20.24±0.29	19.84±0.43	57.57±0.53	24.14±0.25	ถ่านเตาถัง
2.4 เปลือกติดกะลา						
ราชบุรี	6.12±1.29	10.08±1.31	26.43±1.38	57.37±1.14	23.31±0.84	ถ่านเตาถัง
สมุทรสงคราม	1.97±0.22	11.48±0.46	7.89±0.90	78.66±1.33	28.76±0.55	ถ่านเตาถัง
	3.31±0.08	13.04±2.28	14.73±0.88	68.92±1.56	28.54±0.99	ถ่านเตาหลุม
มาตรฐานถ่านอัดแท่ง ²	< 8				20.92	
มาตรฐานถ่านไม้หุงต้ม ³	< 10	<8	25		25.1	
มาตรฐานถ่านปิ้งย่าง ⁴	< 8	<3	<8		29.29	

หมายเหตุ ¹กรมโรงงานอุตสาหกรรม [11] ²มผช.238/2547 [13] ³มผช 657/2547 [13] ⁴มผช 658/2547 [13]

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์โดยละเอียดของเศษวัสดุเหลือทิ้งและถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งมะพร้าว น้ำหอม

ชนิดของวัสดุ	การวิเคราะห์โดยละเอียด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					สัดส่วนโมล		สูตรโมเลกุล
	C	H	N	O	S	O/C	H/C	
1.เศษมะพร้าว น้ำหอมแห้ง								
1.1 เปลือกมะพร้าว								
ราชบุรี	45.58±0.73	6.13±0.27	0.34±0.04	41.83±0.97	0.07±0.01	0.69	1.61	CH _{1.61} O _{0.69} N _{0.006}
สมุทรสงคราม	45.93±0.09	5.89±0.04	0.36±0.02	42.88±0.07	0.04±0.01	0.7	1.54	CH _{1.54} O _{0.69} N _{0.006}
1.2 กะลามะพร้าว								
ราชบุรี	48.13±0.13	6.27±0.08	0.17±0.01	43.74±0.20	0.05±0.01	0.68	1.56	CH _{1.56} O _{0.68} N _{0.003}
สมุทรสงคราม	48.91±0.15	6.19±0.04	0.26±0.01	42.59±0.18	0.04±0.01	0.65	1.52	CH _{1.52} O _{0.67} N _{0.004}
1.3 ทะลายเปล่า								
ราชบุรี	43.46±0.13	6.05±0.08	0.52±0.02	43.13±0.15	0.08±0.02	0.74	1.67	CH _{1.67} O _{0.74} N _{0.01}
สมุทรสงคราม	44.32±0.09	5.98±0.06	0.66±0.02	41.82±0.13	0.06±0.01	0.71	1.62	CH _{1.62} O _{0.71} N _{0.01}
2. ถ่าน								
2.1 เปลือกมะพร้าว								
ราชบุรี	65.60±4.60	4.71±0.27	0.14±0.04	19.28±0.97	0.09±0.01	0.22	0.86	CH _{0.86} O _{0.22} N _{0.001}
สมุทรสงคราม	76.68±0.15	2.73±0.18	0.32±0.11	7.55±0.12	0.05±0.01	0.07	0.43	CH _{0.43} O _{0.07} N _{0.003}
	72.74±1.30	3.53±0.04	0.45±0.02	8.13±0.01	0.22±0.01	0.08	0.58	CH _{0.58} O _{0.08} N _{0.005}
2.2 กะลามะพร้าว								
ราชบุรี	78.03±0.13	4.55±0.05	0.54±0.02	11.65±0.15	0.15±0.02	0.11	0.70	CH _{0.70} O _{0.11} N _{0.006}
สมุทรสงคราม	78.17±0.25	3.20±0.60	0.23±0.13	10.90±6.11	0.05±0.01	0.1	0.49	CH _{0.49} O _{0.10} N _{0.002}
	83.97±0.15	3.48±0.04	0.35±0.01	5.93±0.18	0.10±0.01	0.05	0.50	CH _{0.50} O _{0.05} N _{0.003}
2.3 ทะลายเปล่า								
ราชบุรี	69.25±1.38	3.45±0.29	0.18±0.08	6.78±1.24	0.10±0.01	0.42	0.60	CH _{0.60} O _{0.42} N _{0.002}
2.4 เปลือกติด								
กะลา								
ราชบุรี	76.99±5.05	4.95±0.45	0.30±0.16	7.59±5.48	0.09±0.01	0.07	0.77	CH _{0.77} O _{0.07} N _{0.003}
สมุทรสงคราม	84.32±0.85	3.35±0.12	0.57±0.01	0.22±0.90	0.05±0.03	0.01	0.48	CH _{0.48} O _{0.01} N _{0.006}
	72.19±0.25	3.31±0.08	0.56±0.07	10.76±0.32	0.14±0.00	0.11	0.55	CH _{0.55} O _{0.11} N _{0.006}

3.3 การประมาณค่าความร้อนสูงจากข้อมูลที่วัดได้

Kalivodovany et al. [21] ได้สรุปการใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์โดยละเอียดมาใช้นำมาหาค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) ของชีวมวลโดยใช้สมการต่าง ๆ รวม 28 สมการ พบว่าสมการของ Strache-Lant ปี 1924 (สมการที่ 4) ซึ่งพัฒนาต่อจาก Dulong และสมการของ Grummel & Devis ปี 1933 (สมการที่ 5) ว่าให้ค่าความแม่นยำสูงที่สุด ขณะที่ นงนุช ศรีเล็กและคณะ [22] ได้ทดสอบการใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารโดยประมาณและโดยละเอียดมาคำนวณหาความร้อนสูงโดยใช้ 31 สมการ พบว่าสมการของ Demirbas (1997) เป็นสมการที่ดีที่สุดโดยใช้เพียงค่าคาร์บอนคงตัวมาคำนวณดังสมการที่ (6) และทั้ง 3 สมการ ให้ค่าจากการคำนวณแตกต่างจากค่าจริงไม่เกินร้อยละ 5

HHV

$$= 34.06C + 143.2H - 1.532 + 10.46S \quad (4)$$

$$= (1.552H + 98.75) \left(\frac{C}{3} + H - \left(\frac{O - S}{8} \right) \right) \quad (5)$$

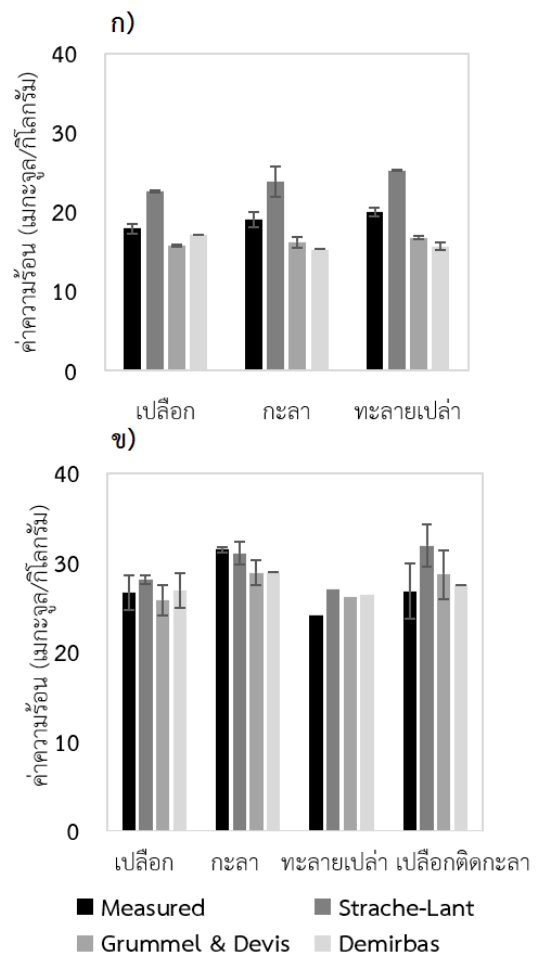
$$= 19.6FC + 14.119 \quad (6)$$

โดยที่ *HHV* คือค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม) และ *C, H, O, S* ได้แก่ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ตามลำดับ

จากการนำข้อมูลเศษมะพร้าว น้ำหอมและถ่านที่ผลิตได้มาคำนวณหาความร้อนสูงโดยใช้สมการที่ (4)-(6) ได้ผลดังรูปที่ 8

ผลการศึกษาพบว่าผลการคำนวณค่าความร้อนของเศษมะพร้าวด้วยสมการของ Demirbas ให้ค่าความแตกต่างจากค่าที่วัดจริงน้อยที่สุด (ร้อยละ 12.0) รองลงมาคือ Grummel & Devis (ร้อยละ 16.0) และ

Strache-Lant (ร้อยละ 22.3) ตามลำดับ สำหรับถ่านจากเศษมะพร้าวเหลือทิ้งที่ผลิตได้ ค่าร้อยละของความแตกต่างเรียงตามลำดับเช่นเดียวกันกับเชื้อเพลิงเศษมะพร้าว มีค่าเท่ากับร้อยละ 4.8, 8.1 และ 8.1 จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสมการ Demirbas มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ประมาณค่าความร้อนหาปริมาณความร้อนของชีวมวลและถ่านจากเศษมะพร้าวเหลือทิ้งได้ แต่การนำมาใช้จะเหมาะสมกับเชื้อเพลิงถ่านมากกว่าเนื่องจากมีปริมาณความชื้น และสารระเหยต่ำ ทั้งนี้สามารถใช้วิธีวิเคราะห์กลุ่มสารโดยประมาณทำให้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาลงได้อย่างมาก

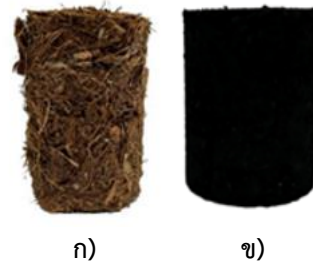


รูปที่ 8 ค่าความร้อนของเศษมะพร้าวเหลือทิ้งและถ่านที่ผลิตได้จากค่าที่วัดจริงและจากสมการต่าง ๆ
ก) เศษมะพร้าวแห้ง ข) ถ่าน

3.4 ผลวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง และ ถ่านชีวภาพอัดแท่ง

การอัดแท่งเปลือกมะพร้าวเพื่อเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล และถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวภายหลังการตากแดดให้แห้งแล้ว

พบว่าสามารถคงรูปได้ดี ดังรูปที่ 9 มีความหนาแน่นต่ำกว่า 1.0 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จึงมีน้ำหนักเบา มีปริมาณความชื้น แฉ่ำ และค่าความร้อนอยู่ในเกณฑ์ของเชื้อเพลิง (ตารางที่ 3)



รูปที่ 9 เชื้อเพลิงอัดแท่ง ก) เชื้อเพลิงจากเปลือกมะพร้าว ข) ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว

ตารางที่ 3 สมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านชีวภาพอัดแท่ง

	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ. ซม.)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	คาร์บอนคงตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	ดัชนี แตกร่วน
เชื้อเพลิงชีวมวล							
เปลือกมะพร้าว	0.39±0.01	8.53±0.18	5.07±0.46	76.26±1.10	18.67±1.59	20.04±0.59	
มาตรฐานเชื้อเพลิง*	-	8-10	20	-	15	12.56	
ถ่านอัดแท่ง							
กะลามะพร้าว ราชนบุรี	0.86±0.03	2.61±0.29	5.11±0.65	32.41±0.86	59.65±1.10	27.93±0.38	1.02±0.01
กะลามะพร้าวสมุทรสงคราม	0.81±0.04	3.35±0.49	7.31±0.45	18.15±0.66	70.24±7.76	28.92±1.57	1.02±0.01
มาตรฐานถ่านอัดแท่ง**		8				20.93	

*มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม [11] **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช.238/2547) [13]

4. สรุป

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษมะพร้าวน้ำหอมเหลือทิ้งพบว่าเปลือกมะพร้าวน้ำหอมแห้งผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิง ส่วนถ่านจากกะลามะพร้าวน้ำหอมผ่านเกณฑ์มาตรฐานถ่านอัดแท่งและถ่านไม้หุงต้ม การผลิตถ่านด้วยเตาหลุมและเตาเผา ให้ค่าความร้อนไม่แตกต่างกัน โดยแหล่งที่มาจากจังหวัดสมุทรสงคราม มีค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนสูงกว่าจังหวัดราชบุรีเล็กน้อย

การประมาณค่าความร้อนสูงโดยใช้สมการของ Dermibas ให้ค่าความแตกต่างจากค่าจริงน้อยที่สุด และคำนวณได้จากค่าคาร์บอนคงตัวจึงสะดวกในการนำมาใช้เมื่อเทียบกับสมการอื่น การทำเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยใช้แ่งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ทั้งการนำเปลือกมะพร้าวน้ำหอมมาทำเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งโดยตรง และถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่และสร้างมูลค่าจากของเหลือทิ้งได้

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ภายใต้รหัสโครงการ FRB660073/0164 (แผนงานวิจัยเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนและครอบคลุมทั่วถึงบนฐานการพัฒนาเชิงพื้นที่และสร้างผลกระทบต่อชุมชน)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ratchaburi Provincial Hall, "Ratchaburi Provincial Development Plan 2023-2027 (Revised version, Budget of year 2025)," [Online]. Available: <https://rbpho.moph.go.th/upload-file/doc/files/25122023-093716-6010.pdf>. [Accessed: Jul. 10, 2024].
- [2] P. Saradhulhat, M. Choorueng, S. Abdullakasim, and L. Phavaphutanon, "Macro-nutrient content in aromatic coconut produce," *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 42, suppl.3, pp. 192-197, 2014.
- [3] A. Sukdaeng, N. Jaroonchon, K. Krisanapook, and W. Imsabai, "Study on maturation stages of aromatic coconut fruit within the same bunch," *Journal of Agriculture Science and Management*, vol. 3, pp. 53-62, Sep.-Dec. 2020.
- [4] N. Ardong, B. Uprasert, and B. Keowan, "Extension needs of aromatic coconut waste management by farmers in Damnoen Saduak Districe, Ratchaburi Province," in *Proceeding of the 9th National and the 7th International Conference on Research and Innovation Development for the Next Normal Society: Transition from the New Normal*, Northeastern University, 2022, pp. 1174-1185.
- [5] J. Chotiratanasak, T. Vitidsant, N. Chuenban, C. Chertchuwongtanakorn, P. Yoosabai, and J. Natakaranakul, "A Study on the carbonization of young coconut husks waste using a smokeless charcoal kiln," *Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology*, vol. 12, pp. 63-80, May-Aug. 2024.
- [6] W. Nunkong and K. Mekkaew, "Charcoal briquettes from coconut coir," *Academic Journal of Science and Technology Dhonburi Rajabhat University*, vol. 1, pp. 1-11, Jan.-Jun 2023.
- [7] N. Wichianphong, T. Juepanit, and P. Miangkae, "Production of fuel pellets from coconut coir dust mixed with biomass wastes," *Pibulsongkram Rajabhat University Journal of Science and Technology*, vol. 5, pp. 112-126, Sep.-Dec. 2020.
- [8] ASTM, "Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke," [Online]. Available: <https://store.astm.org/d3172-13r21e01.html>. [Accessed: Dec. 20, 2024].
- [9] S. R. Anggita, R. F. Devarasalya, I. Istikomah, and A. Bawono, "Utilization of LDPE plastic waste, coconut shell and coconut husk as basic material for briquettes with tapioca starch

- adhesive,” *Jurnal Ilmu Fiska*, vol. 15, no. 2, pp. 81–90. 2023.
- [10] C. Kumpapai, N. Boonthanom, T. Rodjananon, and J. Wongthanate, “The Efficiency comparison of fuel briquettes from agricultural wastes,” *The Journal of Industrial Technology*, vol. 16, pp. 28-38, Sep.-Dec. 2020.
- [11] Department of Industrial Works, “Guidelines and criteria for waste properties for fuel briquette processing and interlocking blocks,” [Online]. Available: <http://webintra.diw.go.th/iwmb/>. [Accessed: Jul. 15, 2024]
- [12] V. S. Morales III, J. C. Elauria, and M. M. Elauria, “Carbonization of young coconut (Cocosnucifera) wastes,” *Journal of the Japan Institute of Energy*, vol. 94, pp.1120-1128, Oct. 2015.
- [13] Thai Industrial Standards Institute, “Thai Community Product Standards,” [Online]. Available: <https://tcps.tisi.go.th/public/StandardList.aspx>. [Accessed: Jul. 15, 2024].
- [14] EBC “European Biochar Certificate-Guidelines for a sustainable production of biochar, European Biochar Foundation (EBC): Arbaz, Switzerland,” [Online]. Available: https://www.carbon-standards.com/docs/e71c07d0d6cfe1767107d54e743c90e2_version_en_10_1.pdf. [Accessed: Jul. 30, 2024].
- [15] A. A. Rumaihi, M. Shahbaz, G. Mckay, H. Mackey, and T. A. Ansari, “A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, p.112715, Oct. 2022.
- [16] S. Khawkomol, R. Neamchan, T. Thongsamer, S. Vinitnantharat, B. Panpradit, P. Sohsalam, D. Werner, and W. Mrozik, “Potential of biochar derived from agricultural residues for sustainable management,” *Sustainability*, vol. 13, no. 15, p. 8147, 2021.
- [17] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee and C. Zheng, “Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis,” *Fuel*, vol. 86, no. 12–13, pp. 1781-1788, Aug. 2007.
- [18] B. Esteves, U. Sen, and H. Pereira, “Influence of chemical composition on heating value of biomass: A review and bibliometric analysis,” *Energies*, vol. 16, no. 10, p. 4226, May. 2023.
- [19] Q. Wang and J. Sarkar, “Pyrolysis behaviors of waste coconut shell and husk biomasses,” *International Journal of Energy Production and Management*, vol.3, no.1, pp.34-43, 2018.
- [20] M. G. Lomeli-Ramirez, R. R. Anda, K. Satyanarayana, G. I. Bolzon de Muniz and S. Iwakiri, S., “Comparative study of the characteristics of green and brown coconut fibers for the development of

- green compoesites,” *BioResources*, vol.13, no. 1, pp. 1637-1660, Feb. 2018.
- [21] M. Kalivodova, M. Balas, P. H. Milcak, M. Lisy, J. Lachman, P. Kracik, P. Krizan and K. Vejrazka, K., “The determination of higher heating value by calculation based on elemental analysis,” *Paliva*, vol. 13, pp. 8-20, Mar. 2022.
- [22] N. Srilek, P.Makarkard, W. Nunto, P. Putthawan and S. Leckpool, “Proximate analysis based higher heating value correlation of biomass and biochar from cacao husk and corncob,” *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 13-25, Jan.-Jun. 2022.