

การประเมินการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพพลังงาน
จากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบสับประดศรีราชา
EVALUATION OF CO₂ EMISSIONS AND ENERGY EFFICIENCY FROM
FUEL BRIQUETTES PRODUCTION PROCESS USING SRI RACHA
PINEAPPLE LEAVES

ณรงค์ ชัยสงเคราะห์¹ ศรีกุลณัฐ นิลโนรี² และ ศศิธร สรรพอคำ^{3*}

^{1,3*}อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
เขตพื้นที่อุเทนถวาย, 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330,

¹narong_ch@rmutto.ac.th, ^{3*}sasithorn_su@rmutto.ac.th

²อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000, srikulnath.ni@g.sut.ac.th

Narong Chaisongkroh¹ Srikunath Nilnoree² and Sasithorn Sunphorka^{3*}

^{1,3*}Lecturer, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,
Uthenthawai Campus, 225 Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand,

¹narong_ch@rmutto.ac.th, ^{3*}sasithorn_su@rmutto.ac.th

²Lecturer, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Suranari, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand,

srikulnath.ni@g.sut.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และประสิทธิภาพพลังงานจากการใช้ใบสับประดศรีราชามาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ได้แก่ ชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และถ่านชีวภาพอัดแท่งที่ผลิตในระดับห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับระดับภาคสนาม จากผลการวิจัยพบว่าการผลิตชีวมวลอัดแท่งมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำและประสิทธิภาพพลังงานสูง โดยคิดเป็น 2.31 kgCO₂-eq และ 52.38% ตามลำดับ แต่เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนต่ำ หากใช้เป็นเชื้อเพลิงจำเป็นต้องใช้ชีวมวลอัดแท่งปริมาณมาก ในขณะที่การผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่งและถ่านชีวภาพอัดแท่ง ทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงกว่า แต่

การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากขึ้นและประสิทธิภาพพลังงานต่ำลง เนื่องจากการใช้พลังงานมากในการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล โดยเฉพาะการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งดำเนินการที่อุณหภูมิสูง เมื่อมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเป็นระดับภาคสนาม ด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่มีการระบายแก๊สชีวมวลซึ่งเป็นสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกจากกระบวนการไพโรไลซิส มาควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้ และหมุนเวียนแก๊สส่วนที่เหลือที่ไม่สามารถควบแน่นได้ มาเป็นแก๊สเชื้อเพลิงร่วม พบว่ามีประสิทธิภาพพลังงานของกระบวนการสูงกว่ากรณีการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง ที่ไม่มีการหมุนเวียนแก๊สชีวมวลมาใช้ แสดงให้เห็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่ากระบวนการอื่น เนื่องจากการกักเก็บคาร์บอนบางส่วนในรูปของผลิตภัณฑ์พลอยได้ คือ น้ำส้มควันไม้ และการลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อน รวมถึงยังสามารถใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุกักเก็บคาร์บอนโดยใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน โดยผลการศึกษาี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาแนวทางการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การผลิตและใช้งาน ในระดับห้องปฏิบัติการตลอดจนอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์, ประสิทธิภาพพลังงาน, วัสดุเศษเหลือทางการเกษตร, เชื้อเพลิงอัดแท่ง, ทอรัรีแฟคชัน

ABSTRACT

This research investigated the carbon dioxide (CO₂) emissions and energy efficiency of the production of briquetted fuels including briquetted biomass, torrefied briquetted biomass, and briquetted biochar, produced at both laboratory and pilot scales, using Sriracha pineapple leaves. The results showed that briquetted biomass production led to low CO₂ emissions and high energy efficiency of 2.31 kgCO₂-eq and 52.38%, respectively. However, this type of fuel had a low heating value, a large quantity was thus required for effective use. In contrast, the torrefied briquetted biomass and briquetted biochar had higher heating values but resulted in increased CO₂ emissions and lower energy efficiency. These were due to the high energy consumption required for biomass energy decomposition, especially in biochar production through pyrolysis which involves high temperatures. After that, the biochar production process was scaled up to the pilot scale using a 200-liter kiln equipped with a condensation system for condensing volatile gases into wood vinegar and recirculating the remaining non-condensable gases as co-fuel. The energy efficiency of the process was improved compared to laboratory-scale biochar production, which did not reuse the biomass

gases. This demonstrated a more efficient energy utility. Additionally, this process emitted less CO₂ than other methods due to partial carbon sequestration in the form of wood vinegar and reduced fuel consumption for heating during pyrolysis. Biochar could have the potential use of biochar as a carbon sink when applied as a soil amendment as well. The findings from this study provided preliminary information for selecting appropriate briquetted fuels production methods, according to production and utilization objectives for both laboratory and industrial scales.

KEYWORDS: CO₂ emission, Energy efficiency, Agricultural wastes, Fuel briquettes, Torrefaction

1. บทนำ

การเกษตรในประเทศไทยเป็นกิจกรรมหลักที่สร้างรายได้และผลิตภัณฑ์มากมาย อย่างไรก็ตาม กระบวนการเผาปลูกและเก็บเกี่ยวทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งจำเป็นต้องมีการกำจัดหรือแปรรูปอย่างเหมาะสม จากข้อมูลการสำรวจปริมาณสับปะรดและวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปสับปะรดในจังหวัดชลบุรีในปี พ.ศ. 2566 พบว่ามีการผลิตสับปะรดปัดตาเวียหรือสับปะรดศรีราชาถึง 105,667 ตันจากปริมาณทั้งหมด 1,249,408 ตันในประเทศ [1] โดยหลังจากแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แล้วเกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ใบ จุก ตัน ก้าน ผล และหน่อ เป็นต้น การกำจัดวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกทั้งสิ้น ตัวอย่างเช่น หากทิ้งวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไว้ในไร่จนเกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติจะปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คิดเป็นร้อยละ 58 ของกระบวนการในไร่ทั้งหมด ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด ลำดับรองลงมา คือ การใช้ปุ๋ย (ร้อยละ 26) และการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง (ร้อยละ 15) ตามลำดับ [2]

การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม เพื่อลดปริมาณการฝังกลบหรือลดค่าใช้จ่ายในการขนย้ายสำหรับการนำไปกำจัดนอกพื้นที่ รวมถึงอาจสร้างรายได้เพิ่มเติมนั้น สามารถทำได้หลายรูปแบบ หนึ่งในกระบวนการแปรรูปที่เป็นที่นิยม คือ การนำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ (biochar) และน้ำส้มควันไม้ (wood vinegar) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะจำกัดอากาศ โดยสามารถนำถ่านชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผสมดินปลูกได้ รวมถึงสามารถนำน้ำส้มควันไม้ไปใช้ในพื้นที่เพาะปลูกได้ Sunphorka and Yangsawang [3,4] ทำการพัฒนาและการทดสอบเตาเผาผลผลิตขนาดเล็ก 200 ลิตร ซึ่งออกแบบมาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับปะรด ผลการทดลองแปรรูปใบสับปะรดให้เป็นถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ

แสดงให้เห็นว่า ได้ร้อยละผลได้ของแข็ง (solid yield) เท่ากับร้อยละ 33.02 ที่อุณหภูมิ 400 °C และใช้เวลา 60 นาที ถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนสูงสุด 23.25 MJ/kg เมื่อทำการทดลองในระดับภาคสนาม โดยการใช้เตาเผาผลพิษต่ำขนาด 200 ลิตร ในการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ พบว่า ไบโสบัปเกรด 20 กิโลกรัม สามารถผลิตถ่านชีวภาพได้ประมาณ 2 กิโลกรัม และน้ำส้มควันไม้ประมาณ 10 ลิตร ถ่านชีวภาพที่ได้มีปริมาณองค์ประกอบคาร์บอน เท่ากับร้อยละ 70.49 และมีค่าความร้อนสูงสุด 25.97 MJ/kg และเมื่อนำถ่านชีวภาพจากไบโสบัปเกรดไปอัดแท่งและทดสอบค่าความร้อนพบว่าให้ค่าความร้อนสูงสุด 26.0 MJ/kg

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในด้านการผลิตหรือจำหน่ายเพื่อการผลิตเป็นเชื้อเพลิงหรือพลังงานเพียงอย่างเดียว พบว่านำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพอาจไม่ใช่ทางเลือกที่คุ้มค่าหรือเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับเกษตรกรมากที่สุด เนื่องจากทางด้านอุตสาหกรรมก็มีการรับซื้อวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากเกษตรกรเช่นกัน เพื่อลดปัญหาการเผาไหม้ซึ่งก่อให้เกิดปัญหา PM2.5 การขายวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้กับโรงงานอุตสาหกรรมเป็นทางเลือกที่สะดวกกว่าการที่เกษตรกรผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ในพื้นที่เอง รวมถึงทำให้เกิดการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรไปรวบรวมและแปรรูปด้วยกระบวนการที่มีการควบคุมตามมาตรฐานของอุตสาหกรรม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่รับซื้อไปนั้น มักถูกแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ การผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์ (torrefied biomass) ซึ่งเป็นการนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชัน (torrefaction) หรือกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะจำกัดอากาศคล้ายกระบวนการไพโรไลซิส แต่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า และการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผสมกับวัสดุผสมหรือไม่ผสมก็ได้ จากนั้นนำไปขึ้นรูปให้เป็นแท่งเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตความร้อนหรือผลิตไอน้ำร้อนใช้ในโรงงาน [5] ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงอัดแท่งพบว่ามีค่าเท่ากับ 32.3 และ 16 MJ/kg ตามลำดับ [6] ซึ่งจะเห็นว่าถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งประมาณสองเท่าและมีความชื้นต่ำกว่า แต่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าและการดำเนินการที่ซับซ้อนกว่า

จากประเด็นข้างต้น ทำให้มีคำถามงานวิจัยเกี่ยวกับการนำชีวมวลจากชุมชนไปผลิตน้ำส้มควันไม้ ถ่านชีวภาพ ถ่านอัดแท่งหรือการขายให้กับโรงงานทางใดจะมีความเหมาะสมกับชุมชนหรือต่อโรงงานมากกว่า ทั้งในเชิงของการใช้พลังงานและการลดแก๊สเรือนกระจก ดังนั้นการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการนำชีวมวลมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงรูปแบบต่าง ๆ จึงมีความน่าสนใจในการนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาความเหมาะสมในการนำชีวมวลไปใช้ทั้งในเชิงพลังงาน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงการชดเชยคาร์บอน รวมถึงความคุ้มค่าในการผลิตและจำหน่าย ซึ่งชุมชนสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการพิจารณาถึงการผลิตถ่านเพื่อ

ใช้เองหรือขายให้กับโรงงาน และโรงงานสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปพิจารณาถึงแนวทางหรือวิธีการนำชีวมวลไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งที่คุ้มค่าต่อการลงทุน

การวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงของการชดเชยคาร์บอน (Carbon offset) นั้น เกี่ยวข้องกับการคำนวณการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse Gas (GHG) emissions) ซึ่งเป็นการคำนวณหาผลรวมของการปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่อยู่ในรูปแบบของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ซึ่งจะเป็นแก๊ส 6 ชนิดหลัก [7] เพื่อให้เกิดความสะดวกในการคำนวณ มักจะเป็นการคำนวณการปล่อยแก๊สเรือนกระจกในรูปของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่า ต่อหน่วยการทำงานของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการคำนวณทำได้โดยใช้ผลรวมของปริมาณการปล่อย คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าทุกกิจกรรมที่เกี่ยวข้องการผลิต ปริมาณการปลดปล่อย คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแต่ละกิจกรรมสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (1) [8]

$$\text{GHG emissions} = \text{Activity data} \times \text{Emission factor} \quad (1)$$

โดยที่ ค่าการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก (GHG emissions) มีหน่วยเป็น $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ ข้อมูล กิจกรรม (Activity data) คือ ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณ เป็นค่าที่เกิดจากกิจกรรมที่ทำให้เกิด แก๊สเรือนกระจกประเภทต่าง ๆ ข้อมูลกิจกรรมอาจจะมีหน่วยที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประเภทของ การปล่อยหรือในภาคของการคำนวณ และค่าที่ได้จะต้องสัมพันธ์กับค่าอ้างอิงในการปล่อย แก๊สเรือนกระจก ค่าสัมประสิทธิ์ของการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Emission factor) หรือ EF คือ ค่าที่แสดงปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจกต่อหน่วย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการปล่อยจะขึ้นอยู่กับ กิจกรรมของการปล่อยในแต่ละประเทศ โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจกตาม เงื่อนไขเฉพาะของกิจกรรมนั้น ๆ เรียกว่า ค่าการปล่อยเฉพาะของประเทศ ซึ่งได้มาจากการตรวจวัดจริงหรือจากการศึกษา สำหรับในกรณีที่บางประเทศไม่มีค่าการปล่อยเฉพาะของ ประเทศสามารถเลือกใช้ค่าการปล่อยที่แนะนำ (default value) ตามคู่มือแนวทางของคณะกรรมการ ระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change) หรือ IPCC [9] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกแตกต่างกัน Ananpradit et al [10] ศึกษา การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการนำผักตบชวาเพื่อผลิตพลังงานทดแทน ทั้งหมด 5 กระบวนการ ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง การผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิส แบบเร็ว การผลิตแก๊สชีวภาพ การผลิตเอทานอล และการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวา โดย ผลการศึกษาพบว่า การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวา โดยการนำผักตบชวามาทำการอบแห้ง โดยโรงเรือนพลาสติก มีการปล่อยปริมาณคาร์บอนน้อยที่สุด คือ $0.38 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$

คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาความเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง 4 กระบวนการ ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง การผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง การผลิตถ่านชีวภาพอัดแท่ง ในระดับห้องปฏิบัติการ และการผลิตถ่านชีวภาพอัดแท่งในระดับภาคสนามด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร โดยพิจารณาความเหมาะสมทางด้านพลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกกระบวนการที่เหมาะสม โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ ใบสับประดศรียาชา มีการศึกษาผลของกระบวนการต่าง ๆ ต่อร้อยละผลได้ของแข็งและสมบัติบางประการของเชื้อเพลิงที่ได้ เช่น องค์ประกอบและค่าความร้อน เป็นต้น โดยคณะผู้วิจัยมุ่งหวังให้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปช่วยในการพิจารณานำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรไปใช้เป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานของทางชุมชนและในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ใบสับประดศรียาชาจากพื้นที่ตำบลเขาคันทรง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ลักษณะของใบสับประดแสดงดังรูปที่ 1 การเตรียมใบสับประดสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการทำได้โดยตัดใบสับประดให้มีความยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้แห้งและอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเก็บในตู้ดูดความชื้นเพื่อเตรียมสำหรับการทดลอง ส่วนการเตรียมใบสับประดสำหรับการทดลองระดับภาคสนาม ซึ่งดำเนินการในเตาเผาผลพิษต่ำขนาด 200 ลิตรนั้น จะนำใบสับประดที่ได้จากในพื้นที่เป้าหมายมาแยกออกเป็นใบ ลักษณะดังรูปที่ 1 และทิ้งไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ก่อนนำมาใช้

สำหรับเตาเผาที่ใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ คือ เครื่องเตาเผาแบบ muffle furnace รุ่น Nabertherm และเตาเผาที่ใช้ในระดับภาคสนามผลิตจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อที่ 2.3



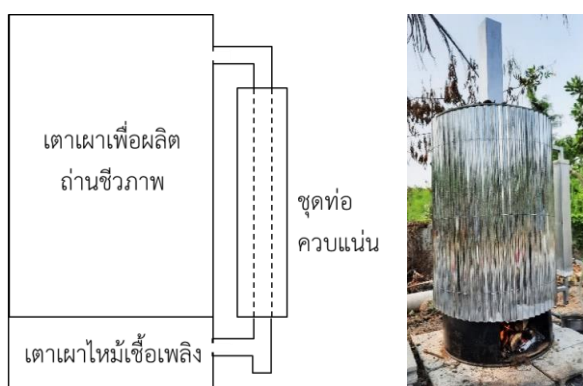
รูปที่ 1 ใบสับประดที่ใช้ในการทดลอง (ซ้าย) และเตาเผาแบบ muffle furnace (ขวา)

2.2 การเตรียมชีวมวลทอรรีฟายด์และถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

นำชีวมวลมาใส่ในถ้วยกระเบื้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ ปิดฝาถ้วยกระเบื้องและนำไปเข้าเตาเผาแบบ muffle furnace ตั้งอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการ จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรรีฟเคชัน คือ 250 °C และเวลา 75 นาที ตามลำดับ อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส คือ 400 °C และเวลา 60 นาที ตามลำดับ เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำออกจากเตาเผา ปิดฝา และชั่งน้ำหนัก เก็บถ่านชีวภาพที่ได้ไว้ในตู้ดูดความชื้น จนกว่าจะมีการใช้งาน

2.3 การผลิตถ่านชีวภาพด้วยเตาเผา 200 ลิตร

เตาเผาที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง และชุดท่อควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2 และมีการเปิดเผยรายละเอียดสิ่งประดิษฐ์แสดงดังอนุสิทธิบัตร เลขที่ 24787 [11] ชุดท่อควบแน่นนี้ทำหน้าที่พาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลในเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพมาควบแน่นให้กลายเป็นน้ำส้มควันไม้ ส่วนสารระเหยบางส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะถูกป้อนกลับเข้าไปที่เตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อเป็นเชื้อเพลิงร่วม การผลิตถ่านชีวภาพจากไบสับปะรดด้วยเตาเผาเมลพิษตานี้ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักไบสับปะรด นำไบสับปะรดใส่ในเตาเผาด้านบน หลังจากนั้นปิดฝากเตาเผา นำดินเหนียวอุดบริเวณฝาเตาเผาและรอบท่อระบายควัน นำเชื้อเพลิงใส่ที่เตาเผาไหม้ด้านล่าง จุดไฟและเปิดน้ำหล่อเย็น เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที น้ำส้มควันไม้จะเริ่มหยดออกมา สังเกตไฟในเตาเผาไหม้และเติมเชื้อเพลิงจนกว่าน้ำส้มควันไม้จะหยุดไหล จากนั้นเผาต่อไปอีก 60 นาที ปล่อยให้เตาเย็นลงข้ามคืน ชั่งน้ำหนักถ่านชีวภาพที่ได้ และเก็บถ่านชีวภาพใส่ภาชนะที่เหมาะสมเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป [3]

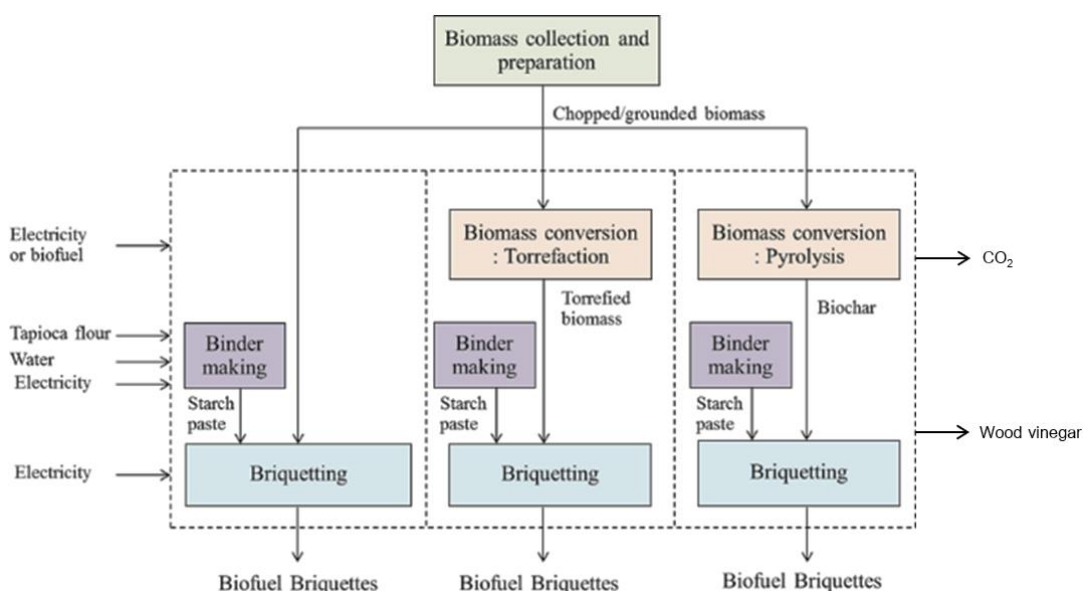


รูปที่ 2 ภาพร่างส่วนประกอบเตาเผา 200 ลิตร (ซ้าย) และเตาเผา 200 ลิตร ภาคสนาม (ขวา)

2.4 การผลิตชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และถ่านชีวภาพอัดแท่ง

เชื้อเพลิงอัดแท่งทั้ง 3 ชนิดที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบแตกต่างกัน กล่าวคือ ชีวมวลอัดแท่งเป็นการนำชีวมวลแห้งมาตัด และผสมกับวัสดุประสาน จากนั้นอัดขึ้นรูปให้เป็นแท่ง สำหรับชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่งเป็นการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการทอรรีฟเลชัน (torrefaction) จากนั้นนำมาผสมกับวัสดุประสานและอัดขึ้นรูปให้เป็นแท่ง ส่วนถ่านชีวภาพอัดแท่งนั้นเป็นการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จากนั้นนำมาผสมกับวัสดุประสานและอัดขึ้นรูปให้เป็นแท่ง ซึ่งกระบวนการทอรรีฟเลชันเป็นการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 200-300 °C ส่วนไพโรไลซิสเป็นการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 400-600 °C หรืออาจสูงกว่านั้น

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการทดลอง คือ แป้งเปียกซึ่งเตรียมได้โดยการนำแป้งมันสำปะหลัง มาผสมน้ำและต้มให้สุก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อแป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 3 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำแป้งเปียกที่เตรียมได้มาผสมกับชีวมวล ชีวมวลทอรรีฟายด์ หรือถ่านชีวภาพ ในอัตราส่วนแป้งเปียกต่อชีวมวลหรือถ่าน เท่ากับ 1 ต่อ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อผสมจนทั่วกันแล้วจึงนำเข้าเครื่องอัดแท่ง และตัดตามความยาวที่ต้องการ นำเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ไปตากแดด ประมาณ 2-3 วัน แล้วเก็บไว้ในที่แห้ง [4] กระบวนการในการแปรรูปชีวมวลให้เป็นการผลิตชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และถ่านชีวภาพอัดแท่ง รวมถึงวัสดุและแหล่งพลังงานที่ใช้ ตลอดจนขอบเขตของการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการแปรรูปชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

2.5 การวิเคราะห์พลังงานของชีวมวล ชีวมวลทอรรีฟายด์และถ่านชีวภาพ

นำถ่านชีวมวลหรือชีวภาพไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยธาตุ (Ultimate Analysis) ด้วยเครื่อง THERMO FLASH 2000 CHNS/O ANALYZERS โดยเทคนิคการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (flash combustion method) และนำองค์ประกอบโดยธาตุที่ได้ไปคำนวณค่าความร้อนสูงสุดตั้งสมการ (2) [12]

$$\text{ค่าความร้อนสูงสุด (MJ/kg)} = 0.3856 (C + H) - 1.6938 \text{ MJ/kg} \quad (2)$$

โดยที่ C คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนเฉลี่ย และ H คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุไฮโดรเจนเฉลี่ย

2.6 การคำนวณปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการศึกษาความแตกต่างของการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบต่าง ๆ ได้แก่ ชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และถ่านชีวภาพอัดแท่ง ดังนั้นจึงกำหนดกรอบการวิจัยตาม Life Cycle Inventory (LCI) เฉพาะกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่แสดงดังรูปที่ 3 เท่านั้น โดยมีสมมุติฐานและขอบเขตดังนี้

1) ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเป็นวัสดุที่นำมาจากพื้นที่เกษตร ซึ่งเกษตรกรมีการเก็บเกี่ยวตากแห้ง ตัดหรือเลื่อยให้มีขนาดเล็ก และรวบรวมอยู่แล้ว แม้ว่าจะไม่มีการนำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งก็ตาม

2) การทดลองทำในพื้นที่การเกษตรจึงไม่มีขั้นตอนการขนส่ง

3) กระบวนการอัดแท่งสำหรับแต่ละกรณี มีสารขาเข้า (input) ได้แก่ ชีวมวลที่เตรียมไว้แล้ว แป้งมันสำปะหลัง ไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักร และน้ำ ส่วนในสารขาออก (output) ได้แก่ เชื้อเพลิงอัดแท่ง (ผลิตภัณฑ์หลัก) คาร์บอนที่สูญเสียในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำส้มควันไม้แสดงดังรูปที่ 3 โดยมีขอบเขตของกระบวนการแต่ละกรณีในรอบสี่เหลี่ยม (เส้นประ) เท่านั้น

4) ค่า Emission factor (EF) ของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในกระบวนการอัดแท่ง น้ำ และไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเตาเผา muffle furnace และเครื่องอัดถ่านแท่ง นำมาจากฐานข้อมูลจากองค์การบริหารจัดการแก๊สเรือนกระจก (องค์การมหาชน) แสดงดังตารางที่ 1 [13]

5) การคำนวณค่า Emission factor ของเชื้อเพลิงแข็ง คำนวณจากการเปลี่ยนค่าร้อยละองค์ประกอบคาร์บอน (%C content) ให้เป็นน้ำหนักของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ เมื่อโมลของคาร์บอนเท่ากับโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [14] ตั้งสมการ (3)

$$EF \text{ (kgCO}_2\text{-eq, biomass)} = (\%C \text{ content}/100) \times (44/12) \quad (3)$$

6) คาร์บอนที่สูญเสียไปจากกระบวนการสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยถือว่าเป็นการปลดปล่อยของกระบวนการ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$\text{kgCO}_2\text{-eq จากคาร์บอนที่สูญเสียจากกระบวนการ} = \left[\left(\frac{\%C_{\text{ชีวมวลเริ่มต้น}}}{100} \times \text{ปริมาณชีวมวลเริ่มต้น} \right) - \left(\frac{\%C_{\text{ผลิตภัณฑ์}}}{100} \times \text{ปริมาณผลิตภัณฑ์} \right) \right] \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

โดยที่ $\%C_{\text{ชีวมวลเริ่มต้น}}$ คือ ปริมาณร้อยละองค์ประกอบคาร์บอนโดยน้ำหนักของชีวมวลก่อนกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง และ $\%C_{\text{ผลิตภัณฑ์}}$ คือ ปริมาณร้อยละองค์ประกอบคาร์บอนโดยน้ำหนักของชีวมวล ชีวมวลทอริฟายด์ หรือถ่านชีวภาพที่ผลิตได้หลังจากกระบวนการ

7) การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากแต่ละกระบวนการ สามารถคำนวณได้จากสมการ (5)

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงอัดแท่ง} = \left[\left(\frac{\text{solid yield (wt.\%)}}{100} \right) \times \text{ปริมาณชีวมวลเริ่มต้น} \right] + \text{ปริมาณแยมันสำหรับหลัง} \quad (5)$$

8) การคำนวณค่าประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency; η) คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ไปหรือพลังงานสุทธิที่เข้าสู่กระบวนการ ดังสมการ (6) [15,16]

$$\eta \text{ (\%)} = \frac{\text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้}}{\text{พลังงานสุทธิที่เข้าสู่กระบวนการ}} \times 100 \quad (6)$$

ตารางที่ 1 ค่า emission factor ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อ	รายละเอียด	หน่วย	ค่า EF (kgCO ₂ eq/ หน่วย)	แหล่งข้อมูล อ้างอิง	วันที่ อัปเดต
แก๊สมัน สำหรับหลัง	เลขที่ใบรับรอง: TGO CFP FY24-047-04-0963	kg	0.5720	Thailand Greenhouse Gas Management Organization [17]	28/11/2566
น้ำประปา- การประปา ส่วน ภูมิภาค	ผลิตโดยใช้น้ำผิวดิน น้ำใต้ ดิน และน้ำทะเล; ครอบคลุม ตั้งแต่ขั้นตอนการสูบน้ำดิบ การผลิตน้ำประปา จนถึงการ ส่งน้ำประปาผ่านระบบท่อ กปภ. สู่ผู้ใช้น้ำ; ข้อมูลการ ผลิตปีงบประมาณ 2561; LCIA method IPCC 2013 GWP 100a V1.03	m ³	0.5410	Thai National LCI Database, TIIS-MTEC- NSTDA (with TGO electricity 2016-2018) [13]	Update July 2022
Electricity, grid mix (ไฟฟ้า)	ไฟฟ้าแบบ grid mix ปี 2016- 2018; LCIA method IPCC 2013 GWP 100a V1.03	kWh	0.5986	Thai National LCI Database, TIIS-MTEC- NSTDA (with TGO electricity 2016-2018) [13]	Update Dec 2019

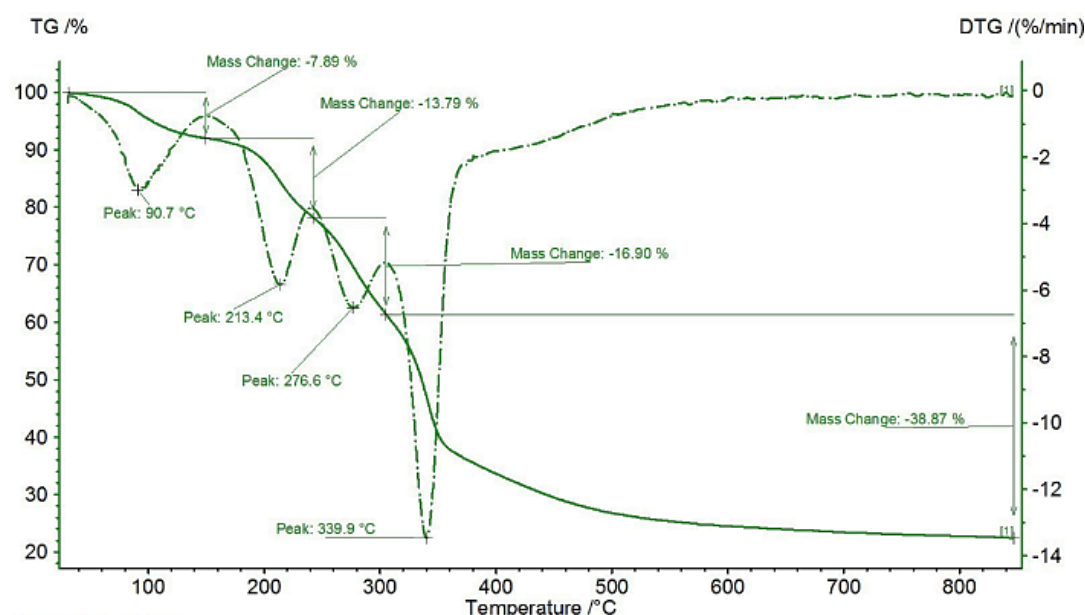
3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

จากการลงพื้นที่ ณ ตำบลเขาคันทรง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี พบว่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรส่วนใหญ่มาจากไร่นาสับปะรด ได้แก่ ใบสับปะรด ซึ่งบางส่วนมีการนำไปแปรรูป หรือ หากไม่มีการนำออกไปนอกพื้นที่ต้องฝังกลบ [18]

เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) พบว่าผลการวิเคราะห์ร้อยละคาร์บอน ร้อยละไฮโดรเจน ร้อยละไนโตรเจน และร้อยละออกซิเจนของไบสับประด มีค่าเท่ากับ 45.88, 6.60, 1.15 และ 46.37 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 18.54 MJ/kg สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุในเถ้าของไบสับประดพบว่ามีร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ได้แก่ โพแทสเซียมร้อยละ 26.60 คลอรีนร้อยละ 7.64 แคลเซียมร้อยละ 2.89 ฟอสฟอรัสร้อยละ 2.79 แมกนีเซียมร้อยละ 2.35 ซิลิกอนร้อยละ 1.44 และพบธาตุที่มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 1 ได้แก่ ซัลเฟอร์ แมงกานีส โซเดียม รูบิเดียม และอื่น ๆ

รูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไบสับประดด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA/DTG) ลักษณะของกราฟจาก TGA/DTG สามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการสลายตัวขณะได้รับความร้อน เช่น อัตราการสูญเสียน้ำหนัก และอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด เป็นต้น จากข้อมูลการสลายตัวทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 850 °C เมื่อพิจารณาจากกราฟ DTG (เส้นประ) พบว่าเกิดพีคที่ 90.70 °C, 213.40 °C, 276.60 °C และ 339.90 °C จากการใช้พลังงานในการสลายตัวช่วงต่าง ๆ เมื่อพิจารณาควบคู่กับกราฟ TGA (เส้นทึบ) ซึ่งแสดงการสูญเสียน้ำหนักของชีวมวล พบว่า การสลายตัวช่วงแรก ที่อุณหภูมิ 90.70 °C เกิดการสูญเสียน้ำหนักของชีวมวลร้อยละ 7.89 เกิดจากการสูญเสียความชื้นจากกระบวนการทำให้แห้ง จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการปลดปล่อยสารระเหยเนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบหลักของชีวมวล ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส (200–300 °C) รวมถึงเซลลูโลส (250–300 °C) และลิกนินบางส่วน (200–500 °C) [19] ทำให้น้ำหนักของชีวมวลลดลงอย่างรวดเร็ว จากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด คือ 339.9 °C และชีวมวลมีการสูญเสียน้ำหนักรวมจนเหลือประมาณร้อยละ 40 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 °C ไบสับประดยังมีการสลายตัวอย่างช้า ๆ จากการสลายตัวของลิกนินและองค์ประกอบที่ซับซ้อนอื่น ๆ ที่เหลืออยู่ จนกระทั่งน้ำหนักของไบสับประดลดลงเหลือประมาณร้อยละ 25 ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าน้ำหนักที่เหลืออยู่นั้นเป็นน้ำหนักของคาร์บอนคงตัวและเถ้า จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสลายตัวทางความร้อนสำหรับการทอรีรีแฟคชันเพื่อให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยบางส่วน คือ 250 °C และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสเพื่อให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยมากที่สุด คือ 400 °C



รูปที่ 4 การสลายตัวทางความร้อนของโพลีโพรพิลีน

3.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกระบวนการต่าง ๆ

เมื่อนำโพลีโพรพิลีนไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการต่าง ๆ พบว่าลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันมีบางส่วนเป็นสีดำและบางส่วนมีสีน้ำตาลเข้ม ลักษณะคล้ายโพลีโพรพิลีนแห้ง ในขณะที่เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการและการไพโรไลซิสระดับภาคสนามด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร มีลักษณะเป็นสีดำเงา ซึ่งการที่เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันบางส่วนยังมีสีน้ำตาลคล้ายสีเดิมของโพลีโพรพิลีนแห้งนั้น เนื่องจากการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ (250 °C) มีเพียงเอมีเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนเท่านั้น โดยพิจารณาได้จากผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของโพลีโพรพิลีนที่แสดงดังรูปที่ 4 ในขณะที่องค์ประกอบเซลลูโลสยังคงอยู่มาก ดังนั้นลักษณะของเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันจึงมีความใกล้เคียงกับชีวมวลเริ่มต้น ในขณะที่เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส นั้น ดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่า (400 °C) ซึ่งองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 50 เกิดการสลายตัวแล้ว ทำให้ลักษณะทางกายภาพแตกต่างจากชีวมวลเริ่มต้นมาก อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการ และกระบวนการไพโรไลซิสระดับภาคสนามนั้น มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน คือ เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการมีสีดำตืดมือเล็กน้อย ส่วนเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสระดับภาคสนามมีสีดำที่ไม่ตืดมือ สีดำที่ตืดมือนี้น่าจะมาจากน้ำมันที่ติดค้างที่ผิวของถ่านชีวภาพ โดยกระบวนการระดับภาคสนามมีการระบายสารระเหยออกจากส่วนผลิตถ่านชีวภาพ ทำให้สารระเหยที่กลายเป็นน้ำมันที่ตืดมือนี้นั้น

สีน้ำตาลเข้มหรือสีดำและเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (light hydrocarbon) ตกค้างอยู่ที่ผิวน้อยกว่าการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ที่พบว่าถ่านชีวภาพจากกระบวนการระดับภาคสนามมีองค์ประกอบร้อยละของไฮโดรเจนน้อยกว่าถ่านชีวภาพจากกระบวนการระดับห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงร้อยละผลได้ของแข็ง และร้อยละองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟคชัน การไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการ และการไพโรไลซิสระดับภาคสนาม ด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร จะเห็นได้ว่ากระบวนการทอรรีแฟคชันทำให้เชื้อเพลิงมีร้อยละได้ของแข็งสูงถึงร้อยละ 56.33 แต่ร้อยละคาร์บอนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งมีร้อยละผลได้ของแข็งต่ำกว่า แต่มีร้อยละคาร์บอนคิดเป็นร้อยละ 33.02 และ 27.07 สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพจากห้องปฏิบัติการและการผลิตถ่านชีวภาพจากเตาเผา 200 ลิตร ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการทอรรีแฟคชันดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้การสลายตัวทางความร้อน (thermal cracking) ของชีวมวลเกิดขึ้นบางส่วน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินบางส่วนเริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 170°C [20] เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ คือ $170\text{--}390^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 390°C ลิกนินส่วนที่เหลือจะสลายตัวต่อไปจนถึงอุณหภูมิมากกว่า 800°C ซึ่งการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นทำให้ชีวมวลสูญเสียสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำบางส่วนไป จากนั้นอัตราการสลายตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างซับซ้อนจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเชื้อเพลิงจากกระบวนการทอรรีแฟคชันนั้น แม้ว่าจะมีองค์ประกอบคาร์บอนสูงกว่าไบสับปรดแห้งเนื่องจากการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบางส่วน แต่ก็ยังมีปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนน้อยกว่าเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่ดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่า อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการมีองค์ประกอบคาร์บอนสูงจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิง กล่าวคือเมื่อร้อยละคาร์บอนมาก ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่จะสังเกตได้ว่าร้อยละผลได้ของแข็งกลับลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ลดลงตามไปด้วย ซึ่งการเลือกกระบวนการที่เหมาะสมจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์การใช้งานและความคุ้มค่าในด้านต่าง ๆ รวมถึงปริมาณและคุณภาพของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

จากการคำนวณค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากแต่ละกระบวนการ พบว่าชีวมวลจากเตาเผา 200 ลิตร หรือกระบวนการระดับภาคสนามมีค่าความร้อนสูงสุด เนื่องจากการสลายตัวของไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้เชื้อเพลิงหรือถ่านชีวภาพที่ได้มีปริมาณร้อยละคาร์บอนสูง ส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงสุด รองลงมาคือถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการระดับห้องปฏิบัติการ และชีวมวลทอรรีฟายด์ ตามลำดับ เนื่องจากยังมีสารระเหยหรือไฮโดรคาร์บอนที่มี

น้ำหนักโมเลกุลต่ำคงเหลืออยู่มาก สังเกตได้จากปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนที่สูง ทำให้ค่าความร้อนสูงสุดที่คำนวณได้มีค่าลดลง

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

ชนิดเชื้อเพลิง	ร้อยละผลได้ ของแข็ง (solid yield (wt.%))	ร้อยละองค์ประกอบ (โดยน้ำหนัก)				ค่าความร้อนสูงสุด (MJ/kg)
		คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน	
ชีวมวลทอรรีฟายด์	56.33	52.26	4.96	1.71	41.07	20.37
ถ่านชีวภาพจาก ห้องปฏิบัติการ	33.02	61.56	3.12	1.06	34.26	23.25
ถ่านชีวภาพจาก เตาเผา 200 ลิตร	27.07	70.49	1.26	1.38	26.87	25.97

3.3 การคำนวณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบสับประดทั้ง 4 กระบวนการ คือ ชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง สามารถนำมาคำนวณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยมีขอบเขตการศึกษา ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ และวิธีการคำนวณในหัวข้อที่ 2.4 และ 2.6 จะได้ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากองค์ประกอบและกระบวนการต่าง ๆ โดยเริ่มจากสมมติฐานในการใช้ชีวมวลตั้งต้นจำนวน 5 กิโลกรัม นำมาผ่านกระบวนการ 4 กระบวนการ โดยกระบวนการแรก คือ การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งเป็นการนำใบสับประดมาผสมแบริ่งเปียก และเข้าเครื่องอัดแท่ง ทำให้ปัจจัยขาเข้า หรือ input ประกอบด้วย ชีวมวล แบริ่งมันสำปะหลัง น้ำ และพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องอัดแท่ง ส่วนปัจจัยขาออก คือ เชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยที่ของเสียถือว่าปริมาณน้อยมากจนตัดทิ้งได้ ส่วนกระบวนการผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่งและกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง มีกระบวนการที่ใกล้เคียงกัน ต่างกันเพียงอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง จึงมีปัจจัยขาเข้าประกอบด้วย ชีวมวล แบริ่งมันสำปะหลัง น้ำ พลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาและเครื่องอัดแท่ง ส่วนปัจจัยขาออก ประกอบด้วยของเสียและเชื้อเพลิงอัดแท่ง สำหรับกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามอัดแท่งนั้น มีการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนแทนเตาเผาพลังงานไฟฟ้า และมีการผลิตถ่านชีวภาพร่วมกับการผลิตน้ำส้มควันไม้ ทำให้ปัจจัยขาเข้าประกอบด้วย ชีวมวล แบริ่งมันสำปะหลัง น้ำ ชีวมวลที่ใช้เป็น

เชื้อเพลิง และพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องอัดแท่ง ส่วนปัจจัยขาออก ประกอบด้วยของเสีย น้ำส้มควันไม้และเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากผลการคำนวณจะเห็นว่าปัจจัยการผลิตที่ก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด คือ การใช้พลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งส่งผลให้การผลิตชีวมวลทอรรีฟายอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด โดยคิดเป็น $3.93 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ และ $4.41 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ตามลำดับ การที่เตาเผาไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทำให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงนั้น เนื่องจากต้องใช้เตาเผาหลายครั้งจึงจะได้ปริมาณถ่านชีวภาพหรือชีวมวลทอรรีฟายด์ตามปริมาณที่กำหนด หากใช้เตาเผาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอาจจะทำให้ลดจำนวนครั้งในการใช้ต่อการผลิตหนึ่งครั้ง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการผลิตในปริมาณมาก อาจมีการใช้เชื้อเพลิงอื่นในการผลิตแทน เช่น น้ำมัน หรือใช้ไม้เนื้อแข็ง ซึ่งจะทำให้ค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เปลี่ยนแปลงไปจากที่แสดงในตาราง แต่แนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการผลิตชีวมวลทอรรีฟายอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่งพบว่า การผลิตถ่านชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการทำให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานกว่า จึงมีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ในขณะที่การผลิตชีวมวลอัดแท่งและถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง ซึ่งไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเตาเผา มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า โดยคิดเป็น $2.61 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ และ $1.78 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ตามลำดับ โดยปัจจัยหลักที่ทำให้การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตชีวมวลอัดแท่งมีค่ามากกว่า คือ การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการนำชีวมวลอัดแท่งไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยคิดเป็น $1.68 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด เนื่องจากชีวมวลแทบจะไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป ทำให้องค์ประกอบของชีวมวลอัดแท่งยังคงคล้ายกับชีวมวลเริ่มต้น กล่าวคือ มีองค์ประกอบของสารระเหย หรือไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้เมื่อเกิดการเผาไหม้จะสามารถปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องระบุว่า การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งมากกว่าชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีฟายด์อัดแท่ง มีสาเหตุหลักมาจากการเผาไหม้สารระเหย [21]

สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพในระดับภาคสนามอัดแท่งนั้น มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด ซึ่งจะเห็นว่ามีการใช้ชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเตาเผา โดยชีวมวลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็น $0.67 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ซึ่งน้อยกว่าปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาเผาในการผลิตชีวมวลทอรรีฟายอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง ที่คิดเป็น $1.80 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ และ $2.63 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ตามลำดับ นอกจากนี้

ของเสียหรือการสูญเสียจากกระบวนการผลิตยังน้อยกว่า เนื่องจากสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการไฟโรไลซิสนั้น บางส่วนถูกควบแน่นและกักเก็บคาร์บอนไว้ในรูปของน้ำส้มควันไม้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการใช้งาน โดยทั่วไปแล้ว ถ่านชีวภาพมักมีการใช้งานที่จำเพาะเจาะจงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น เนื่องจากถ่านชีวภาพมีความเป็นรูพรุนสูง จึงมีการนำถ่านชีวภาพมาบดแล้วเติมในดิน กล่าวคือ ใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน เพื่อปรับสภาพดินให้พร้อมแก่การทำการเกษตร ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการกักเก็บคาร์บอนอย่างหนึ่ง [22] ดังนั้น หากไม่นำถ่านชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิง แต่เลือกใช้เป็นวัสดุปลูก จะทำให้การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ในกรณีของการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 4.41 เป็น 3.60 kgCO₂-eq และในกรณีของการผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามอัดแท่ง มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 1.78 เป็น 0.98 kgCO₂-eq

ตารางที่ 3 ค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบต่าง ๆ

รายการ	กรณี/กระบวนการผลิต	หน่วย	ค่า Life Cycle Inventory (LCI)		ค่า EF	kgCO ₂ -eq/หน่วย	kgCO ₂ -eq
			ปริมาณ	ปริมาณ/ Fraction unit			
การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง							
Input							
ชีวมวล		kg	5.0000	1.0000	1.6823		
แป้งมันสำปะหลัง	ชีวมวลอัดแท่ง	kg	0.5000	0.1000	0.5720		0.0572
	ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง	kg	0.2816	0.0563	0.5720		0.0322
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kg	0.1651	0.0330	0.5720		0.0189
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	0.1354	0.0271	0.5720		0.0155
น้ำ	ชีวมวลอัดแท่ง	m ³	0.0015	0.0003	0.541		0.0002
	ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง	m ³	0.0008	0.0002	0.5410		0.0001
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	m ³	0.0005	0.0001	0.5410		0.0001
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	m ³	0.0004	0.0001	0.5410		0.0000

ตารางที่ 3 ค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบต่าง ๆ (ต่อ)

รายการ	กรณี/กระบวนการผลิต	หน่วย	ค่า Life Cycle Inventory (LCI)		ค่า EF kgCO ₂ -eq/ หน่วย	kgCO ₂ -eq
			ปริมาณ	ปริมาณ/ Fraction unit		
การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (ต่อ)						
Input						
ไฟฟ้า – เตาเผา*	ชีวมวลอัดแท่ง	kWh	ND	ND	ND	ND
	ชีวมวลทอรัฟไฟดัดอัดแท่ง	kWh	15.0000	3.0000	0.5986	1.7958
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kWh	21.9600	4.3920	0.5986	2.6291
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kWh	ND	ND	ND	ND
ชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	5.0000	1.0000	1.6716**	0.6687
ไฟฟ้า - เครื่องอัด	ชีวมวลอัดแท่ง	kWh	4.8000	0.9600	0.5986	0.5747
	ชีวมวลทอรัฟไฟดัดอัดแท่ง	kWh	1.2000	0.2400	0.5986	0.1437
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kWh	0.6000	0.1200	0.5986	0.0718
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kWh	0.6000	0.1200	0.5986	0.0718
Output						
ของเสีย เช่น คาร์บอนจากสารระเหยที่หายไปจากกระบวนการ	ชีวมวลอัดแท่ง	คำนวณจากสมมูลคาร์บอนในสมการที่ (4)				0.0000
	ชีวมวลทอรัฟไฟดัดอัดแท่ง	คำนวณจากสมมูลคาร์บอนในสมการที่ (4)				0.7788
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	คำนวณจากสมมูลคาร์บอนในสมการที่ (4)				0.8824
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	คำนวณจากสมมูลคาร์บอนในสมการที่ (4)				0.2011
น้ำส้มควันไม้	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	dm ³	2.5000	0.5000	0.0490	0.0245
เชื้อเพลิงอัดแท่ง	ชีวมวลอัดแท่ง	kg	4.9950	0.9990	ND	1.6806***
	ชีวมวลทอรัฟไฟดัดอัดแท่ง	kg	3.0976	5.0000	ND	1.1825***

ตารางที่ 3 ค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบต่าง ๆ (ต่อ)

รายการ	กรณี/กระบวนการผลิต	หน่วย	ค่า Life Cycle Inventory (LCI)		ค่า EF	kgCO ₂ -eq	kgCO ₂ -eq
			ปริมาณ	ปริมาณ/ Fraction unit	kgCO ₂ -eq/ หน่วย		
การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (ต่อ)							
Output							
เชื้อเพลิงอัดแท่ง (ต่อ)	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kg	1.8158	0.3632	ND		0.8059***
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	1.4888	0.2978	ND		0.7989***
รวมการปลดปล่อย CO ₂ จากการผลิต	ชีวมวลอัดแท่ง	ผลรวมของค่า kgCO ₂ -eq ทั้งกระบวนการ					2.3126
	ชีวมวลทอรัฟฟายด์อัดแท่ง	ผลรวมของค่า kgCO ₂ -eq ทั้งกระบวนการ					3.9331
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	ผลรวมของค่า kgCO ₂ -eq ทั้งกระบวนการ					4.4081
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	ผลรวมของค่า kgCO ₂ -eq ทั้งกระบวนการ					1.7805
การใช้งานถ่านชีวภาพเป็นวัสดุผสมในดินปลูกหรือตัวดูดซับ							
การใช้เป็นวัสดุผสมในดินปลูกหรือตัวดูดซับ	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kg	1.8158	0.3632	ND		-0.8059
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	1.4888	0.2978	ND		-0.7989
รวมการปลดปล่อย CO ₂ จากการผลิตและผสมในดิน****	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kg	1.8158	0.3632	ND		3.6022
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	1.4888	0.2978	ND		0.9816

หมายเหตุ: ND คือ not determined

* คือ เวลาและ kW จากการใช้ muffle furnace ในห้องปฏิบัติการ

** คือ ร้อยละของคาร์บอน (%C content) ของชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเท่ากับร้อยละ 45.59

*** คือ ปริมาณเชื้อเพลิงอัดแท่งคำนวณดังสมการ (5) และ kgCO₂-eq ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง = kgCO₂-eq ของเชื้อเพลิง + kgCO₂-eq ของแบริ่งน้ำมันสำหรับหลั

**** คือค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีให้นำถ่านชีวภาพไปเติมในดิน

ตารางที่ 4 การคำนวณประสิทธิภาพพลังงานสำหรับการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยกระบวนการต่าง ๆ

ก) กระบวนการผลิตชีวมวลอัดแท่ง

Energy in	(MJ)	Energy out	(MJ)
ชีวมวล	92.71	เชื้อเพลิงอัดแท่ง	92.62
แป้งมันสำปะหลัง	8.79	การสูญเสีย (loss)	138.45
ไฟฟ้าจากเครื่องอัด	17.28		
รวม	176.83	รวม	176.83

$\eta = 52.38 \%$

ข) กระบวนการทอรีแฟคชัน ด้วยเตาเผา muffle furnace ระดับห้องปฏิบัติการ

Energy in	(MJ)	Energy out	(MJ)
ชีวมวล	92.71	ชีวมวลทอรีฟายด์	57.36
แป้งมันสำปะหลัง	4.95	การสูญเสีย (loss)	98.62
ไฟฟ้าจากเตาเผา	54.00		
ไฟฟ้าจากเครื่องอัด	4.32		
รวม	155.99	รวม	155.99

$\eta = 36.78 \%$

ค) กระบวนการไพโรไลซิส ด้วยเตาเผา muffle furnace ระดับห้องปฏิบัติการ

Energy in	(MJ)	Energy out	(MJ)
ชีวมวล	92.71	ถ่านชีวภาพ	38.38
แป้งมันสำปะหลัง	2.90	การสูญเสีย (loss)	138.45
ไฟฟ้าจากเตาเผา	79.06		
ไฟฟ้าจากเครื่องอัด	2.16		
รวม	176.83	รวม	176.83

$\eta = 21.70 \%$

ง) กระบวนการไพโรไลซิส ด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร ระดับภาคสนาม

Energy in	(MJ)	Energy out	(MJ)
ชีวมวล	92.71	ถ่านชีวภาพ	35.15
แป้งมันสำปะหลัง	2.38	การสูญเสีย (loss)	98.40
ชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง	36.30		
ไฟฟ้าจากเครื่องอัด	2.16		
รวม	133.55	รวม	133.55

$\eta = 26.32 \%$

การพิจารณาด้านประสิทธิภาพพลังงาน (η) สำหรับการผลิตชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง โดยคำนวณอัตราส่วนระหว่างพลังงานจากเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ (energy out) และพลังงานสุทธิที่ใช้ในกระบวนการ (energy in) ดังสมการ (6) จะได้รายการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณความร้อนหรือพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงอัดแท่งนั้น มีค่าน้อยกว่าพลังงานจากชีวมวลเริ่มต้น แม้ว่าเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนสูงกว่าค่าความร้อนของชีวมวลเริ่มต้นก็ตาม เนื่องมาจากการนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการทอรรีฟเลชันหรือกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการดูดความร้อน จำเป็นต้องใช้พลังงานบางส่วนไปในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ในกระบวนการทอรรีฟเลชันหรือไพโรไลซิวยังก่อให้เกิดการสูญเสียมวลบางส่วนจากการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล น้ำหนักหรือปริมาณของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จึงน้อยลง หากปริมาณสารระเหยในชีวมวลเริ่มต้นมาก การสูญเสียมวลในระหว่างกระบวนการผลิตก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [23]

จากการคำนวณประสิทธิภาพพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพพลังงานกรณีการผลิตชีวมวลอัดแท่งมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากไม่ต้องใช้พลังงานในการแปรรูปชีวมวล และใช้เพียงพลังงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดแท่ง เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง (ตารางที่ 4(ข)) พบว่าค่าประสิทธิภาพพลังงานต่ำลง เนื่องจากต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งในกระบวนการทอรรีฟเลชันชีวมวล แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพพลังงานขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการสลายหรือกำจัดความชื้นและสารระเหย [24] เมื่อพิจารณาการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง (ตารางที่ 4(ค)) พบว่าประสิทธิภาพพลังงานลดลงต่ำที่สุด คือ 21.70% เนื่องจากการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสใช้อุณหภูมิและพลังงานสูงกว่าการผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์ เพื่อให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนและเกิดการกำจัดสารระเหยมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามอัดแท่งนั้น พบว่ามีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง โดยพบว่ามีประสิทธิภาพความร้อนเท่ากับ 26.32% เนื่องจากหลักการทำงานของเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่ใช้ในการทดสอบระดับภาคสนาม ตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.3 นั้น มีการหมุนเวียนแก๊สชีวมวลหรือสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกจากชีวมวลในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส มาควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้ส่วนหนึ่ง อีกส่วนหนึ่งที่ไม่สามารถควบแน่นได้ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม ทำให้สามารถลดพลังงานภายนอกที่ต้องนำมาใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ ประสิทธิภาพพลังงานจึงสูงกว่าการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการที่ไม่มีการหมุนเวียนแก๊สชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม และใช้เพียงพลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาเพียงอย่างเดียว

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละกระบวนการได้ ดังนี้

1) ชีวมวลอัดแท่ง มีข้อได้เปรียบ คือ ประสิทธิภาพพลังงานสูง และไม่ต้องผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อน แต่มีข้อเสียเปรียบ คือ ใช้พลังงานสูงในกระบวนการอัดแท่ง

2) ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง มีข้อได้เปรียบ คือ มีการดำเนินการผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้กำจัดสารระเหยบางส่วนได้ และเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงกว่าชีวมวลอัดแท่ง แต่มีข้อเสียเปรียบ คือ เกิดของเสียหรือการสูญเสียระหว่างกระบวนการสูง และประสิทธิภาพพลังงานไม่สูงมากนัก

3) ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง มีข้อได้เปรียบ คือ เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนสูง มีน้ำสัสมันไม่เปื้อนผลิตภัณฑ์พลอยได้ มีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าการดำเนินการระดับห้องปฏิบัติการเนื่องจากการหมักหมนเวียนแก๊สชีวมวล มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่ากระบวนการอื่น และถ่านชีวภาพที่ผลิตได้สามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงสภาพดินซึ่งช่วยในการกักเก็บคาร์บอน แต่มีข้อเสียเปรียบ คือ ประสิทธิภาพพลังงานไม่สูงมากนัก

จะเห็นว่าเมื่อคำนึงถึงการนำชีวมวลหรือไบโอสบประตมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งในแง่ของการใช้เป็นพลังงานทางเลือก กรณีการผลิตชีวมวลอัดแท่งเป็นกระบวนการที่น่าสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพพลังงานสูง กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อนเนื่องจากไม่จำเป็นต้องนำชีวมวลมาแปรรูปผ่านกระบวนการทางความร้อน อย่างไรก็ตามชีวมวลอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมากจึงจะได้พลังงานความร้อนตามที่ต้องการ ในกรณีที่จำเป็นต้องผลิตและใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งในปริมาณมาก จึงมีการผลิตเป็นชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่งแทนการผลิตชีวมวลอัดแท่งเนื่องจากการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการทางความร้อนบางส่วน ทำให้สารระเหยลดลง เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนต่อหน่วยสูงขึ้น แต่ก็มีข้อเสียเปรียบ คือ เกิดการสูญเสียระหว่างกระบวนการและประสิทธิภาพพลังงานลดลง

เมื่อพิจารณาการผลิตเชื้อเพลิงในรูปของถ่านชีวภาพ พบว่าถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนสูงสุดมากที่สุด สำหรับการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการทำให้เกิดการสูญเสียระหว่างกระบวนการ มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง และมีประสิทธิภาพพลังงานต่ำกว่ากระบวนการอื่น ในขณะที่การผลิตในระดับภาคสนามด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตรนั้น มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด และมีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการเนื่องจากประสิทธิภาพในการจัดการสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกจากกระบวนการไพโรไลซิส และนำแก๊สชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม นอกจากนี้ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุกักเก็บคาร์บอน ดังนั้น แม้ว่าในแง่ของพลังงาน การผลิตเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงอาจยังมีข้อเสียเปรียบบางประการ แต่ในแง่ของสิ่งแวดล้อมและการชดเชยคาร์บอน การผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามเป็นกระบวนการที่มีความน่าสนใจ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง 3 ชนิด ได้แก่ ชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์ และถ่านชีวภาพอัดแท่งที่ผลิตในระดับห้องปฏิบัติการหรือระดับภาคสนาม โดยใช้ชีวมวลเริ่มต้น คือ ใบสับประดศรียาชา จากตำบลเขาคันทรง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี จากการทดลองเพื่อผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์ ถ่านชีวภาพจากห้องปฏิบัติการ และถ่านชีวภาพจากเตาเผา 200 ลิตร พบว่าได้รับร้อยละผลได้ของแข็งเท่ากับร้อยละ 56.33, 33.02 และ 27.07 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณร้อยละคาร์บอนมีแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้าม โดยคิดเป็นร้อยละ 52.26, 61.56 และ 70.49 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง และพิจารณาการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดกระบวนการผลิตถึงการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง พบว่าการผลิตถ่านชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่งมีค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด คิดเป็น 4.41 kgCO₂-eq รองลงมา คือ การผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และชีวมวลอัดแท่ง ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการที่มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด คือ กระบวนการสลายตัวทางความร้อน โดยกระบวนการไพโรไลซิสก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เนื่องจากการดำเนินการที่อุณหภูมิสูงและต้องใช้พลังงานปริมาณมาก รองลงมาคือ กระบวนการทอรรีฟเลชันที่ดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้ ด้วยเหตุผลทางด้านการใช้พลังงานความร้อนในการผลิตดังกล่าว ประสิทธิภาพพลังงานของการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่งจึงน้อยที่สุด ในขณะที่การผลิตชีวมวลอัดแท่งมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพพลังงานสูงที่สุด คิดเป็น 2.31 kgCO₂-eq และ 52.38% ตามลำดับ

เมื่อผลิตถ่านชีวภาพอัดแท่งในระดับภาคสนามด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร พบว่าเตาเผาประเภทนี้ปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่พัฒนาขึ้นใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงแทนพลังงานไฟฟ้า และมีการนำแก๊สชีวมวลที่ปลดปล่อยระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสไปควบแน่นและเก็บในรูปน้ำส้มควันไม้ ส่วนสารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้ เมื่อเปลี่ยนวิธีการใช้ถ่านชีวภาพจากการเป็นเชื้อเพลิงไปเป็นวัสดุปรับปรุงดินในพื้นที่การเกษตร พบว่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 1.78 เป็น 0.98 kgCO₂-eq สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่งและการผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามอัดแท่งตามลำดับ ซึ่งข้อได้เปรียบสำคัญด้านการชดเชยคาร์บอนในดำเนินงานด้านการเกษตร เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจทางหนึ่งในการดำเนินงานเพื่อส่งเสริมสังคมคาร์บอนต่ำของภาครัฐและอุตสาหกรรม ซึ่งผลการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจถึงแนวทางการดำเนินงานเกี่ยวกับการผลิตและใช้งานเชื้อเพลิงอัดแท่ง ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์หรือข้อจำกัดในการผลิตได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การประเมินการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพพลังงานจากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบสับประดศรีราชา โดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริม ววน. (ทุน Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2567) และได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณผลประโยชน์ประจำปี 2567 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (เลขที่สัญญาเงินทุน 039/2567) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคุณปิยะ โกสินทรจิตต์ และบุคลากรที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ตำบลเขาคันทรง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในการนำมาใช้ในงานวิจัย

References

- [1] Office of Agricultural Economics. Agricultural statistics of Thailand 2022 [Internet]. Bangkok: Office of Agricultural Economics; 2023 [cited 2025 Feb 6]. Available from: <https://oae.go.th/uploads/files/2025/05/15/3eff5bf535e375fc.pdf>. (In Thai)
- [2] King Mongkut's University of Technology Thonburi. Upgrading phulae pineapple to zero waste [Internet]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2024 [cited 2025 Feb 6]. Available from: <https://www.kmutt.ac.th/en/news-en/30/04/2024/63853/>.
- [3] Sunphorka S, Yangsawang W. Biochar and wood vinegar production from pineapple leaves using low-emission 200-liter kiln and the feasibility study of production. Journal of Engineering and Digital Technology 2023;11(2):1-13. (In Thai)
- [4] Sunphorka S, Yangsawang W. Production of biochar and wood vinegar from Sriracha pineapple leaves using a low-emission kiln. In: Proceedings of the 3rd National Engineering and Construction Symposium; 2023 May 18-19; Si Racha, Chonburi, Thailand. (In Thai)
- [5] Phananumpha N, Boonyayam T, Wongkamchan B, Julchula B, Suksi C, Uriyarak P. Pellet fuels clean alternative energy [Internet]. Bangkok: Forest Research and Development Office, Department of Forestry; 2016 [cited 2025 Feb 6]. Available from: [Pellet fuels clean alternative energy](#). (In Thai)
- [6] Sahoo K, Bilek E, Bergman R, Mani S. Techno-economic analysis of producing solid biofuels and biochar from forest residues using portable systems. Applied Energy 2019;235:578-90. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.076.

- [7] Notification of the Department of Mineral Fuels Re: criteria on reporting and calculation methods of greenhouse gas emissions from petroleum business operations B.E. 2565 (2022 Aug 16) [internet]. Government gazette vol. 139 (special part 188 Ngor). 2022 [cited 2025 Feb 6]. Available from: <https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/17218722.pdf>. (In Thai)
- [8] Kaewsuwan W. Evaluation of greenhouse gas emissions from rowing and canoeing Thailand championships [master's thesis]. Bangkok: Srinakharinwirot University; 2021.
- [9] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). Emission Factor (CFO) [Internet]. Bangkok: TGO; 2023 [cited 2025 Feb 6]. Available from: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=YjNKblIXNXBlbUYwYVc5dVgyVnRhWE56YVc5dQ>. (In Thai)
- [10] Ananpradit W, Chaiyat N, Intaniwet A, Lertjaturanont W, Munsin R. Carbon footprint evaluation of water hyacinth for generating renewable energy, Proceeding in 12th Conference on Energy Network of Thailand; 2016 Jun 8-10; Phitsanulok. p. 930-7.
- [11] Sunphorka S, Yangsawang W. Low-emission charcoal kiln for biochar and wood vinegar production. Thai Petty Patent 24787. 2024 Oct 30.
- [12] Demirbaş A, Demirbaş AH. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. Energy Exploration and Exploitation. 2004;22(2):135-43. doi:10.1260/0144598041475198.
- [13] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). The greenhouse gas emission factors were compiled from secondary data for the 2022 organizational carbon footprint assessment [Internet]. Bangkok: TGO; 2002 [cited 2025 May 9]. Available from: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/tools/files.php?mod=Y0hKdlpIV%20mpkSE5mWlcxcGMz%20TnBiMjQ9&type=WDBaSIRFVIQ&files=Tnc9PQ>. (In Thai)
- [14] Gmünder S, Toro C, Rojas Acosta JM, Rodriguez Valencia N, Restrepo G, Barrera J, López-Hernández F. Environmental footprint of coffee in Colombia: Guidance document. Bogotá: Quantis; Centro Nacional Para la Producción Más Limpia, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Federación Nacional de Cafeteros de Colombia Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), Embassy of Switzerland in Colombia, Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC); 2021.

- [15] Homchat K, Ramphueiphad S. The continuous carbonisation of rice husk on the gasifier for high yield charcoal production. *Results in Engineering* 2022;15:100495. doi: 10.1016/j.rineng.2022.100495.
- [16] Sampavapon A. Simulation of an enhanced biomass gasification integrated with calcium looping CO₂ capture for hydrogen production [master's thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2019.
- [17] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). Product Carbon Footprint [Internet]. Bangkok: TGO; 2023 [cited 2025 May 9]. Available from: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpIVmpkSE5mWVhCd2NtOTJZV3c9&action=WkdWMFIXbHM¶m=TVRVNU5qVT0>. (In Thai)
- [18] National Innovation Agency (Public Organization). The development journey of woven fabric from pineapple fiber to a national-level innovation. 2024 [cited 2025 Jan 21]. Available from: <https://www.nia.or.th/the-path-to-developing-pineapple-fiber-woven-fabrics-into-innovation-product>.
- [19] Escalante J, Chen W, Tabatabaei M, Hoang A, Kwon EE, Lin KA, Saravanakumar A. Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2022;169:112914. doi: 10.1016/j.rser.2022.112914.
- [20] Varol EA, Mutlu Ü. TGA-FTIR analysis of biomass samples based on the thermal decomposition behavior of hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energies* 2023;16(9): 3674. doi: 10.3390/en16093674.
- [21] Lanjekar PR, Panwar NL, Agrawal C, Gupta T, Meena KK, Meena GL, et al. A review on environmental assessment of thermochemical conversion technologies for energy generation from crop residue. *Earth Energy Science* 2024 Aug 27. doi: 10.1016/j.ees.2024.07.001.
- [22] Deng X, Teng F, Chen M, Du Z, Wang B, Li R, et al. Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China. *Nature Communication* 2024;15:1085. doi: 10.1038/s41467-024-45314-y.
- [23] Fambri G, Lombardi G, Badami M, Chiaramonti D. Energy assessment of a slow pyrolysis plant for biochar and heat cogeneration. *Chemical Engineering Transaction* 2024;109:571-6. doi: 10.3303/CET24109096.

- [24] Cremers M, Koppejan J, Middelkamp J, Witkamp J, Sokhansanj S, Melin S, Madrall S. Status overview of torrefaction technologies—a review of the commercialisation status of biomass torrefaction [internet]. IEA Bioenergy; 2015 [cited 2025 May 9]. Available from: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/11/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_update_2015b.pdf

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร. ณรงค์ ชัยสงเคราะห์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330 โทรศัพท์ 0826197555 E-mail: narong_ch@rmutto.ac.th



ดร. ศรีกุลณัฐ นิลโนรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย 30000 โทรศัพท์ 0819309390 E-mail: srikulnath.ni@g.sut.ac.th



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร สรรพอด้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330 โทรศัพท์ 0890182311 E-mail: sasithorn_su@rmutto.ac.th

Article History:

Received: February 13, 2025

Revised: August 3, 2025

Accepted: August 5, 2025