



Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology



Volume 17, Issue 2, July-December 2025, Pages 1 – 13 ISSN 2985-2641 (Online)

Research Article

การผลิตไฮโดรชาร์จากกากชาเพื่อการใช้งานด้านเชื้อเพลิงโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไเซชัน

Production of Hydrochar From Tea Waste for Fuel Through Hydrothermal Carbonization

นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล^{1*}, พัชรี ปริดาสุริยะชัย²Naruephat Tangmankongworakoon^{1*}, Patcharee Preedasuriyachai²¹คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ¹Faculty of Environmental Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University.²สำนักนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ²Innovative Learning Center, Srinakharinwirot University.

*Corresponding author, e-mail: naruephat@g.swu.ac.th

Received: 19 March 2025; Revised: 23 September 2025; Accepted: 23 September 2025

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อหาแนวทางจัดการกากชาที่มีความชื้นสูงจากอุตสาหกรรมเครื่องดื่มชา โดยการเปรียบเทียบกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไเซชัน (Hydrothermal Carbonization: HTC) และคาร์บอนไเซชันแบบแห้ง (Dry Carbonization: CT) ในการผลิตไฮโดรชาร์และถ่านจากกากชา ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 230–270 องศาเซลเซียส เวลา 90 และ 180 นาที และอัตราส่วนน้ำต่อกากชา 5:1 (w/w) ทำการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิต ค่าความร้อน (Higher Heating Value: HHV) องค์ประกอบธาตุ (Ultimate analysis) สมบัติทางกายภาพ (Proximate analysis) และหมู่ฟังก์ชัน (FTIR) ผลการวิจัยพบว่า HTC ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ให้ค่า HHV 5727.7 แคลอรี/กรัม, ERE สูงสุด 94.5% และมีค่าคาร์บอนคงตัว และ ED สูงกว่า CT ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ในสภาวะเดียวกัน ขณะที่ CT ให้ค่า ash content สูงกว่า และมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O) ต่ำกว่า HTC จากผล FTIR แสดงว่า HTC ทำให้หมู่ C–O และ C–H แบบอะลิฟาติกลดลง แต่หมู่ CH_x และ C=O เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งสัมพันธ์กับปฏิกิริยา dehydration และ decarboxylation การเปรียบเทียบนี้ชี้ให้เห็นว่า HTC เป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับวัตถุดิบชื้นเช่นกากชา

สามารถลดขั้นตอนการทำแห้ง ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมรรถนะด้านพลังงานและสมบัติทางเคมีที่ดีกว่า CT จึงมีศักยภาพสูงสำหรับการต่อยอดไปเป็นเชื้อเพลิงแข็ง วัสดุดูดซับ และสารปรับปรุงดิน

คำสำคัญ: ถ่านไฮโดรชาร์; กากชา; ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน; สารปรับปรุงดิน

Abstract

The objective of this study was to identify an effective approach for managing high-moisture tea waste from the tea beverage industry by comparing hydrothermal carbonization (HTC) and dry carbonization (CT) processes for producing hydrochar and char. Experiments were conducted at temperatures of 230–270 °C for 90 and 180 minutes, with a water-to-tea waste ratio of 5:1 (w/w). The percentage yield, higher heating value (HHV), elemental composition (ultimate analysis), physical properties (proximate analysis), and functional groups (FTIR) were analyzed. Results indicated that HTC at 250 °C for 90 minutes achieved an HHV of 5727.7 cal/g, the highest energy recovery efficiency (ERE) of 94.5%, and greater carbon retention and energy densification (ED) compared to CT at 270 °C under the same conditions. In contrast, CT exhibited higher ash content and a lower abundance of carbonyl (C=O) functional groups than HTC. FTIR analysis revealed that HTC reduced C–O and aliphatic C–H functional groups, while increasing CH_x and C=O groups with rising temperature, corresponding to dehydration and decarboxylation reactions. This comparison highlights HTC as a suitable process for wet feedstocks such as tea waste, as it reduces drying requirements, operates at lower temperatures, and produces a product with superior energy performance and chemical properties compared to CT. Therefore, HTC has strong potential for further development into solid fuels, adsorbents, and soil conditioners.

Keywords: hydrochar; tea residue; hydrothermal carbonization; soil amendment

บทนำ

ในปัจจุบัน เครื่องดื่มชาได้รับความนิยมในกลุ่มผู้บริโภคทุกเพศทุกวัย ส่งผลให้เกิดกากชาในปริมาณมากจากกระบวนการผลิต ทั้งในระดับอุตสาหกรรมและร้านค้าประเภทแฟรนไชส์ กากชาที่เกิดขึ้นมักถูกทิ้งเป็นขยะทุกวันโดยไม่ผ่านการจัดการที่เหมาะสม ซึ่งเพิ่มต้นทุนให้กับผู้ประกอบการทั้งรายใหญ่และรายย่อย (Chaicharoempong, 2009) [1] แม้จะมีความพยายามในการแปรรูปกากชาเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ไส้หมอน วัสดุกำจัดศัตรูพืช หรือบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ แต่การแปรรูปเหล่านี้ยังเผชิญข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความชื้นสูงที่ส่งผลต่อการเก็บรักษาและทำให้เกิดเชื้อรา เส้นใยไม่ผ่านมาตรฐานสำหรับการผลิตวัสดุ และปริมาณสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียอย่างรวดเร็ว สำหรับเทคนิคการจัดการของเสียชีวมวลทั่วไป เช่น การหมักปุ๋ย (composting) ต้องใช้เวลานานและไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เชิงพลังงาน ขณะที่การไพโรไลซิส (Pyrolysis) และคาร์บอนไนเซชันแบบดั้งเดิม (Dry carbonization, CT) จำเป็นต้องใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำ ซึ่งต้องผ่านการอบแห้งก่อน จึงมีข้อจำกัดด้านพลังงานและการสูญเสียมวลอินทรีย์ระหว่างกระบวนการ (Nakasan et al., 2016) [2]

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal Carbonization: HTC) เป็นหนึ่งในแนวทางที่มีศักยภาพสูงสำหรับจัดการของเสียชีวมวลที่มีความชื้นสูง เช่น กากชา โดยเป็นกระบวนการที่ดำเนินในสภาวะอุณหภูมิ

180–350°C ภายใต้อุณหภูมิสูง และใช้น้ำเป็นตัวกลางในระบบปิด (Putra et al., 2017) [3] มีปฏิกิริยาหลัก ได้แก่ ไฮโดรไลซิส การควบแน่น (Condensation) การดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) และการคายน้ำ (Dehydration) ซึ่งช่วยเพิ่มความเสถียรของชีวมวลและแปรสภาพเป็นไฮโดรชาร์ (Hydrochar) ที่มีศักยภาพทั้งด้านพลังงานและการใช้เพื่อสิ่งแวดล้อม เช่น การดูดซับโลหะหนักหรือการบำบัดน้ำเสีย (Sharma et al., 2020) [4] โดยเฉพาะสำหรับวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงจากกระบวนการชงชา เช่น กากชาที่เหลือจากร้านค้า ซึ่งอยู่ในสภาพเปียกตั้งแต่ต้น กระบวนการ HTC จึงสามารถใช้ความชื้นที่มีอยู่เป็นตัวกลางปฏิกิริยาได้โดยตรง ในการศึกษาครั้งนี้เลือกช่วงอุณหภูมิ 230–270 องศาเซลเซียส และเวลา 90 และ 180 นาที โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อกากชาแห้ง 5:1 (w/w) เนื่องจากเป็นค่าที่ใช้แพร่หลายและมีรายงานว่าสามารถรองรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ทำให้สารอินทรีย์ในระบบเดือดจนเกินไป และช่วยลดภาระการจัดการของเหลวหลังปฏิกิริยา (Heilmann et al., 2011; Libra et al., 2011; Reza et al., 2013) [5–7]

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ HTC กับ CT ที่ภาวะดำเนินการเมื่อใช้อุณหภูมิเดียวกัน (270°C) เพื่อประเมินความแตกต่างด้านค่าความร้อน (Higher Heating Value: HHV) ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ปริมาณเถ้า (Ash content) และโครงสร้างหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy: FTIR) รวมถึงการประเมินศักยภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งด้านพลังงานและการใช้เป็นสารปรับปรุงดิน ผลที่ได้จะชี้ชัดข้อได้เปรียบของ HTC ในการแปรรูปวัตถุดิบเปียกให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเหนือกว่าและเหมาะสมกับการต่อยอดในเชิงพาณิชย์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรชาร์ จากกากชาโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน
2. เพื่อทดสอบคุณสมบัติค่าความร้อนสูงและคุณสมบัติในด้านสารปรับปรุงดินของไฮโดรชาร์จากกากชาโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมกากชา

เพื่อเตรียมตัวอย่างกากชาสำหรับการทดลอง HTC และลดผลกระทบจากความชื้นที่แปรผันของกากชาหลังกระบวนการชงชา จึงมีการล้างกากชาด้วยน้ำสะอาดก่อนทำการทำแห้ง โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตากแดดเป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ได้กากชาแห้งที่มีความชื้นคงที่ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ ค่าความชื้น (Moisture Content) ของกากชาแห้ง โดยวิธีการอบที่ 105°C จนได้น้ำหนักคงที่ พบว่ากากชาที่มีความชื้นอยู่ที่ 10.83% โดยน้ำหนักเปียก (wet basis) หรือความชื้นของกากชาเมื่อคิดบนฐานน้ำหนักแห้ง (Dry basis) โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งข้อมูลนี้ถูกใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพื่อให้ได้อัตราส่วน น้ำ : กากชาแห้ง (w/w) = 5:1

การเตรียมไฮโดรชาร์จากกากชาด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

นำกากชาแห้ง 4.46 กรัม และน้ำกลั่น 22.30 กรัม (อัตราส่วน 1:5 โดยน้ำหนัก) ทำซ้ำ 3 ชุด (n = 3) ใส่ลงในถ้วยอลูมิเนียมมีฝาเกลียว จากนั้นบรรจุลงใน Hydrothermal Synthesis Autoclave Reactor ขนาด 100 มิลลิลิตร แยกกันสำหรับแต่ละชุด แล้วนำไปเข้าตู้อบยี่ห้อ SNOL รุ่น 60/300 LSN11 ที่อุณหภูมิ 230–270 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 และ 180 นาที

การเตรียมตัวอย่างถ่านจากการคาร์บอนไนเซชันแบบแห้ง

เพื่อเปรียบเทียบกับ HTC นำกากชาแห้ง ชุดละ 4.46 กรัม ทำซ้ำ 3 ชุด (n = 3) ทำการให้ความร้อนในเตา SNOL

รุ่น 60/300 LSN11 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และ 270 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนไหลผ่านคงที่ โดยไม่เติมน้ำ ระยะเวลาเท่ากับ HTC (90 และ 180 นาที)

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากขาและถ่านไฮโดรคาร์บอนจากกากขา

วิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อน (High Heat Value: HHV) ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-350 วิเคราะห์ตาม ASTM D5865-12 และทำการประเมินค่าประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดว่า วัสดุชีวมวลสามารถเก็บรักษาพลังงานไว้ในผลิตภัณฑ์ถ่านไฮโดรคาร์บอนได้นานเพียงใด เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่ในวัตถุดิบดั้งเดิม เพื่อใช้ประเมินการตัดสินใจเลือกค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดในการผลิตไฮโดรคาร์บอนด้วยการระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน จากการคำนวณร้อยละผลผลิตของไฮโดรคาร์บอนตามสมการที่ (1) คำนวณร้อยละค่าประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (Energy Recovery efficiency, ERE) ดังสมการที่ (2) ของถ่านไฮโดรคาร์บอนจากกากขา (Mannarino et al., 2022) [8] และค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Energy densification) ดังสมการที่ (3) (Deng et al., 2022) [9]

$$\text{ร้อยละผลผลิตถ่านของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของไฮโดรคาร์บอน}}{\text{น้ำหนักแห้งของกากขาก่อนเผา}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ประสิทธิภาพการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่} = \frac{\text{ค่าความร้อนของถ่านไฮโดรคาร์บอน}}{\text{ค่าความร้อนของกากขา}} \times \text{ร้อยละผลผลิตถ่านของแข็ง} \quad (2)$$

$$\text{ค่าความหนาแน่นของพลังงาน} = \frac{\text{ค่าความร้อนของไฮโดรคาร์บอน}}{\text{ค่าความร้อนของกากขา}} \times 100 \quad (3)$$

วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของกากขาและถ่านไฮโดรคาร์บอน ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) ยี่ห้อ Mettler Toledo อุณหภูมิ 25-600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที ภายใต้การเผาของแก๊สไนโตรเจน และ 600-900 องศาเซลเซียส ภายใต้การเผาของแก๊สออกซิเจน (เพื่อ เผาไหม้ส่วนที่เป็นคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) ที่เหลืออยู่หลังจากสารระเหย (Volatile Matter) ถูกปล่อยออกไปแล้วในช่วงแรก (25-600 องศาเซลเซียส ภายใต้ไนโตรเจน) ซึ่งจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash Content) ได้อย่างแม่นยำ

วิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Ultimate analysis) โดยใช้ตัวอย่างกากขาและผลิตภัณฑ์ถ่านไฮโดรคาร์บอนวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยละเอียดโดยหาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ด้วยเครื่อง Elemental Analyzer (EA) (CHNS/O Analyzer) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น PE 2400 series II และการวิเคราะห์เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ สามารถวิเคราะห์ได้ในช่วงความยาวคลื่น 4,000-400 เซนติเมตร⁻¹ (cm⁻¹) ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer – FT-IR ยี่ห้อ Bruker รุ่น INVENIO S / Lumos II

การวิเคราะห์สมบัติและเกณฑ์การวิเคราะห์ ปุ๋ย และวัสดุปรับปรุงดิน (Land Development Department, 2004) [10]

หาปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน โดยวิธีการทดสอบ DOA-MBF-018 ฟอสฟอรัส (Total P₂O₅) โดยวิธีการทดสอบ DOA-MBF-022 และโพแทสเซียม (Total K₂O) โดยวิธีการทดสอบ DOA-MBF-027 หาค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่านำไฟฟ้า (Electrical conductivity) OM ด้วยวิธีทดสอบอ้างอิง In-house method based on manual on organic fertilizer analysis, APSRDO, DOA:4/2551

ผลการวิจัย

คุณสมบัติทางกายภาพของกากขาที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

ในการนำกากขามาผ่านกระบวนการ (HTC) โดยได้แสดงผลร้อยละผลผลิตที่ได้ (Hydrochar yield(%)) ของไฮโดรชาร์ที่ได้ที่อุณหภูมิในช่วง 230-270 องศาเซลเซียส ที่เวลา 90 นาที และ 180 นาที และนำผลผลิตที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความร้อน จากนั้นนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ ของถ่านไฮโดรชาร์จากกากขา (Energy Recovery Efficiency, ERE) และค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Energy Densification, ED) ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์กากขาที่ผ่านกระบวนการ HTC และ CT ที่ช่วงอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

วัสดุ	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	เวลา (นาที)	ร้อยละผลผลิต (%yield)	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	ERE (%)	ED
กากขา	-	-	-	4,589.0 ± 0.8	100.0 ± 0.0	-
CT1	270	90	62.14 ± 0.8	5,629.6 ± 1.1	76.0 ± 0.6	1.23 ± 0.01
CT2	270	180	58.03 ± 1.0	5,625.9 ± 0.9	71.0 ± 0.7	1.23 ± 0.01
HTC1	230	90	81.91 ± 0.6	5,243.7 ± 1.2	93.6 ± 0.5	1.14 ± 0.01
HTC2	230	180	75.34 ± 0.9	5,686.2 ± 1.0	93.4 ± 0.4	1.24 ± 0.01
HTC3	250	90	75.74 ± 0.7	5,727.7 ± 1.1	94.5 ± 0.5	1.25 ± 0.01
HTC4	250	180	69.58 ± 0.8	5,903.3 ± 1.3	89.5 ± 0.6	1.29 ± 0.01
HTC5	270	90	69.18 ± 0.9	5,958.3 ± 1.2	89.8 ± 0.5	1.30 ± 0.01
HTC6	270	180	63.14 ± 0.7	6,191.2 ± 1.1	85.2 ± 0.6	1.35 ± 0.01

CT คือ กระบวนการคาร์บอนไนเซชันแบบปกติโดยไม่ใช้น้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

HTC คือ กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากตารางที่ 1 พบว่าร้อยละผลผลิต (% yield) ของไฮโดรชาร์จากกระบวนการ HTC มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 81.91% (HTC1, 230 องศาเซลเซียส, 90 นาที) เหลือ 69.18% (HTC5, 270 องศาเซลเซียส, 90 นาที) และจาก 75.74% (HTC3, 250 องศาเซลเซียส, 90 นาที) เหลือ 69.58% (HTC4, 250 องศาเซลเซียส, 180 นาที) เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความร้อนและเวลาส่งผลให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบอินทรีย์เพิ่มขึ้น จึงลดปริมาณของแข็งคงเหลือ เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อน (HHV) พบว่า HTC ที่ 270 องศาเซลเซียส, 90 นาที (HTC5) และ 180 นาที (HTC6) มีค่า HHV เท่ากับ 5,958.3 และ 6,191.2 แคลอรี/กรัม ตามลำดับ สูงกว่า CT ที่ 270 องศาเซลเซียส, 90 นาที (CT1 : 5,629.6 แคลอรี/กรัม) และ CT ที่ 270 องศาเซลเซียส, 180 นาที (CT2 : 5,625.9 แคลอรี/กรัม) แม้อุณหภูมิเท่ากัน ความแตกต่างนี้อาจมาจากลักษณะปฏิกิริยาใน HTC ที่เกิดในสถานะเปียก (Aqueous carbonization) ซึ่งเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของสารอินทรีย์และการก่อตัวของโครงสร้างอะโรมาติกที่มีคาร์บอนสูง (Funke and Ziegler, 2010) [11] ขณะที่ CT ซึ่งเป็นกระบวนการแห้งจะมีการระเหยของ

สารประกอบระหว่างกระบวนการมากกว่า ทำให้สูญเสียสารระเหยที่มีพลังงานสูงบางส่วน จึงให้ค่า HHV ต่ำกว่า HTC ภายใต้สภาวะเดียวกัน (Funke and Ziegler, 2010; Libra et al., 2011) [11, 12]

ค่าประสิทธิภาพการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (ERE) ของ HTC อยู่ในช่วง 85–94.5% โดย HTC3 (250 องศาเซลเซียส, 90 นาที) ให้ค่า ERE สูงสุด 94.5% พร้อมค่า HHV 5,727.7 แคลอรี/กรัม เพิ่มขึ้นจากกากชาเริ่มต้น (4,589 แคลอรี/กรัม) รว 24.81% และให้ร้อยละผลผลิต 75.74% ซึ่งถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรชาร์ที่มีสมบัติด้านพลังงานดีและร้อยละผลผลิต (%yield) สูง

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของกากชาและถ่านไฮโดรชาร์ HTC

สารตัวอย่าง	%ความชื้น	%สารระเหย	%คาร์บอนคงตัว	Fuel ratio	%เถ้า	ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)
กากชา	10.83	67.42	16.71	0.25	5.04	4,589
HTC1	6.47	56.90	30.96	0.54	5.67	5243.7
HTC3	5.62	51.94	36.27	0.70	6.17	5727.7
HTC5	5.51	48.23	38.46	0.80	7.80	5958.3
CT1	5.21	52.46	34.21	0.65	8.12	5629.6

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (proximate analysis) ของกากชา ไฮโดรชาร์จากกระบวนการ HTC (230–270 องศาเซลเซียส, 90 นาที) และถ่านจากกระบวนการ CT (270 องศาเซลเซียส, 90 นาที) โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) พบว่า ค่า HHV ของกากชาเพิ่มขึ้นจาก 4,589 แคลอรี/กรัม เป็น 5,629.6 แคลอรี/กรัม สำหรับ CT1 (270 องศาเซลเซียส, 90 นาที) คิดเป็นการเพิ่มขึ้น 22.67% ขณะที่ HTC5 (270 องศาเซลเซียส, 90 นาที) มีค่า HHV เท่ากับ 5,958.3 แคลอรี/กรัม คิดเป็นการเพิ่มขึ้น 29.83% เมื่อเทียบกับกากชาเริ่มต้น ร้อยละคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของ HTC5 เพิ่มขึ้นจาก 16.71% (กากชา) เป็น 38.46% ซึ่งสูงกว่า CT1 (34.21%) ในสภาวะเดียวกัน การเพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับการลดลงของร้อยละสารระเหย (volatile matter) จาก 67.42% เหลือ 48.23% ใน HTC5 และ 52.46% ใน CT1 อันเป็นผลจากการสลายตัวและระเหยของสารอินทรีย์ในช่วงอุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ทำให้โครงสร้างคาร์บอนมีความเข้มข้นมากขึ้น และส่งผลให้ HHV สูงขึ้น

ค่า fuel ratio (Fixed carbon/Volatile matter) เพิ่มขึ้นจาก 0.25 (กากชา) เป็น 0.80 (HTC5) และ 0.65 (CT1) สะท้อนการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบเชื้อเพลิงให้มีศักยภาพด้านพลังงานสูงขึ้น โดย HTC แสดงค่า fuel ratio และ HHV สูงกว่า CT ในสภาวะเดียวกัน ความแตกต่างนี้อาจมาจากกลไกของ Hydrothermal carbonization ซึ่งเกิดในสภาวะเปียกและปิด ทำให้เกิดปฏิกิริยาหลัก ได้แก่ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis), ดีไฮเดรชัน (Dehydration) และพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) (Funke and Ziegler, 2010; Libra et al., 2011) [11, 12] ที่ช่วยเสริมการกักเก็บคาร์บอนและลดการสูญเสียสารประกอบระเหยบางชนิด ส่งผลให้ใช้พลังงานในการผลิตถ่านน้อยกว่ากระบวนการคาร์บอนในสภาวะแบบแห้ง (CT) ที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าเพื่อให้ได้สมบัติใกล้เคียงกัน ในด้านค่าร้อยละเถ้า พบว่า HTC มีค่าเถ้าต่ำกว่า CT อย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุหนึ่งอาจมาจากการละลายของแร่ธาตุอินทรีย์ในเฟสน้ำระหว่าง HTC เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งถูกชะออกจากของแข็ง ทำให้ปริมาณเถ้าในผลิตภัณฑ์ลดลง ขณะที่ CT ไม่มีตัวกลางน้ำ จึงคงปริมาณเถ้าไว้สูงกว่า (Reza et al., 2013) [7] ผลเหล่านี้ชี้ชัดว่า HTC มีข้อได้เปรียบเหนือกว่า CT ในการแปรรูปวัตถุดิบขึ้นอย่างกากชา โดยให้ HHV

และคาร์บอนคงตัวที่สูงกว่า และค่า Ash content ต่ำกว่า จึงเหมาะสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งหรือสารปรับปรุงดินที่มีคุณภาพสูง

ปริมาณธาตุและองค์ประกอบ

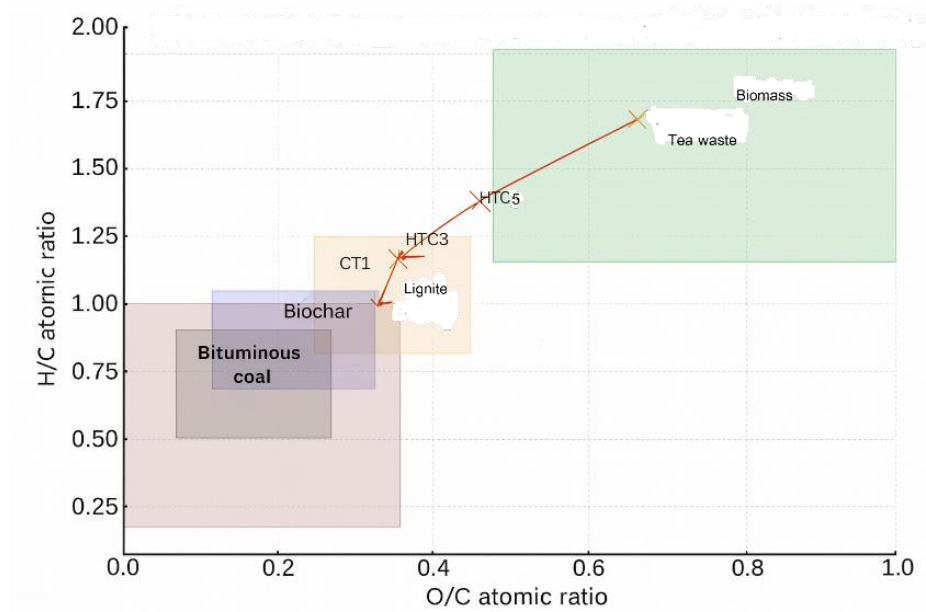
การหาปริมาณธาตุที่มีอยู่ในกากชา และถ่านกากชา ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถันพบว่า ธาตุองค์ประกอบเหล่านี้ในชีวมวลต่อสมบัติของการเผาไหม้ โดยมวลรวมชีวมวลจะลดลงในขณะที่การเผาไหม้เกิดการเปลี่ยนแปลง (Kim et al., 2014; 2017) [13-14] ซึ่งได้จากทั้งอัตราส่วนของ H/C และอัตราส่วนของ O/C ของเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ ของกากชา HTC และ CT

Material	%C	%H	%N	%O	H/C	O/C
กากชา	44.29	6.29	10.3	39.12	1.70	0.66
HTC1	52.60	6.22	9.01	32.17	1.42	0.45
HTC3	56.68	5.68	10.92	26.72	1.20	0.35
HTC5	58.13	5.84	9.51	26.52	1.21	0.34
CT1	59.40	5.05	10.34	25.21	1.02	0.32

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของกากชาและถ่านที่ได้จากกระบวนการ HTC และ CT แสดงในตารางที่ 3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการ HTC เพิ่มขึ้นจาก 230 องศาเซลเซียส (HTC1) เป็น 270 องศาเซลเซียส (HTC5) ปริมาณคาร์บอน (%C) เพิ่มขึ้นจาก 52.60% เป็น 58.13% ขณะที่ไฮโดรเจน (%H) และออกซิเจน (%O) ลดลงจาก 6.22% และ 32.17% เหลือ 5.84% และ 26.52% ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ค่าของอัตราส่วน H/C และ O/C ลดลงจาก 1.42 และ 0.45 เป็น 1.21 และ 0.34 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) และดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ HTC

จากแผนภาพ Van Krevelen (1950) [15] เมื่อเปรียบเทียบ HTC5 (270 องศาเซลเซียส, 90 นาที) กับ CT1 (270 องศาเซลเซียส, 90 นาที) พบว่าแม้ CT1 จะมีค่า %C สูงกว่าเล็กน้อย (59.40%) แต่ HTC5 มีค่า H/C (1.21) และ O/C (0.34) ต่ำกว่าเล็กน้อย และให้ค่าคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนสูงกว่าในสภาวะเดียวกัน (ตารางที่ 1) ซึ่งบ่งชี้ว่า HTC ช่วยคงคาร์บอนและพลังงานได้ดีกว่า CT เนื่องจากเกิดการควบแน่นของสารอินทรีย์ในสภาวะน้ำร้อนอิมิตัว (Aqueous phase) ที่ลดการสูญเสียสารระเหยพลังงานสูง (Libra et al., 2011; Reza et al., 2013) [6-7]



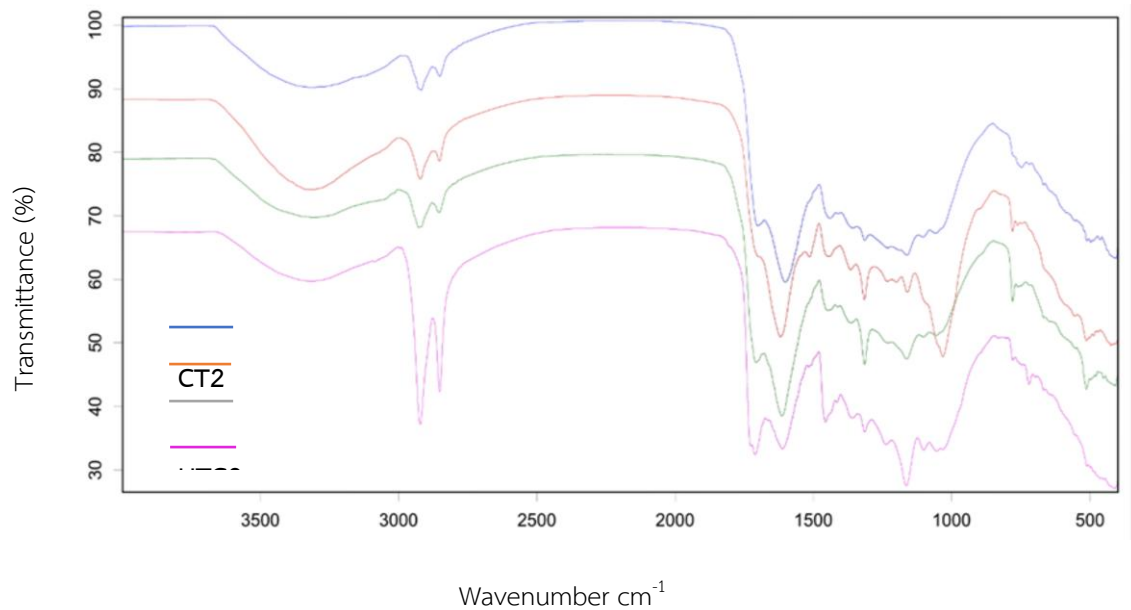
ภาพที่ 2 แผนภาพ จำลอง Van Krevelen สำหรับกากชา HTC3 HTC5 และ CT1

ภาพที่ 2 พบว่าค่า H/C และ O/C ที่ลดลงสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเชิงโพลีเมอร์ไปสู่ลักษณะอะโรมาติกมากขึ้น ส่งผลให้ความเสถียรทางความร้อนและค่าพลังงานสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหิน ไฮโดรคาร์บอนจาก HTC3, HTC5 และ CT1 แสดงคุณสมบัติบางประการใกล้เคียงกับลิกไนต์ และหากผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันขั้นที่สอง (secondary carbonization) ที่อุณหภูมิ 400–700 องศาเซลเซียส ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน จะช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงที่ลดสารระเหย และปรับปรุงคุณภาพให้ใกล้เคียงกับถ่านหินซับบิทูมินัสมากขึ้น (Libra et al., 2011) [6], (Kim et al., 2017) [14]

ดังนั้น ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า กระบวนการ HTC ไม่เพียงเหมาะต่อการแปรรูปวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง เช่น กากชา แต่ยังสามารถผลิตไฮโดรคาร์บอนที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่ดี สำหรับการยกระดับคุณภาพเชิงพลังงานและใช้งานเป็นเชื้อเพลิงแข็งคุณภาพสูงในอนาคต

การศึกษานี้จึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของไฮโดรคาร์บอนในฐานวัตถุดิบเริ่มต้นสำหรับกระบวนการแปรรูปเพิ่มเติมเพื่อยกระดับคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีสมรรถนะใกล้เคียงกับถ่านหินพาณิชย์

โดยสอดคล้องกับภาพที่ 3 แสดงกราฟที่แถบความถี่ของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในกระบวนการ HTC ที่อุณหภูมิ 220 250 และ 270 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาทีและเปรียบเทียบกระบวนการ CT และกระบวนการ HTC ที่ใช้อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที



ภาพที่ 3 การวิเคราะห์เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) ของถ่านกากชาที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน (CT2, 270 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที) และไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ (HTC2 230 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที, HTC4 250 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที และ HTC6 270 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที)

จากผล FTIR spectra (ภาพที่ 3) พบว่า HTC ที่ 270°C มีความเข้มของหมู่ O-H สูงกว่า HTC ที่ 250 องศาเซลเซียส และ 230 องศาเซลเซียส ซึ่งขัดแย้งกับแนวโน้มทั่วไปที่ความเข้มของหมู่ O-H จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการคายน้ำและการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิล ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้ว่า ที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดการสร้างหมู่ฟังก์ชัน O-H ใหม่จากปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับน้ำในระบบ HTC หรือจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน ทำให้ปริมาณหมู่ O-H เพิ่มขึ้น แม้จะมีการสลายตัวของหมู่เดิม

กระบวนการให้ความร้อนทำให้เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในกากชาสลายตัวตามอุณหภูมิ ส่งผลให้สัดส่วนลิกนิน (ซึ่งมีโครงสร้าง อะโรมาติกแบบ โฮโมอะโรมาติก (Homoaromatic) เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของแถบสั่นที่เกี่ยวข้องกับลิกนินเด่นชัดขึ้น แถบ 3200–3400 cm^{-1} (O-H) ใน HTC 2, HTC 4 และ HTC 6 มีความเข้มน้อยลงจากการคายน้ำ แต่ใน HTC ที่ 270 องศาเซลเซียส อาจเพิ่มขึ้นได้จากกลไกการสร้างหมู่ใหม่ดังกล่าว การลดลงของแถบ 1615 cm^{-1} (C=C ในกลุ่มคาร์บอกซิลิก) สอดคล้องกับปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันซึ่งปลดปล่อย CO_2 แถบ 1032 cm^{-1} (C-O ในไฮดรอกซิลหลัก) ลดลงจากการแตกพันธะ C-O ส่วนแถบ 2921–2852 cm^{-1} เพิ่มขึ้นแสดงถึงการเพิ่มของโครงสร้างอะลิฟาติก C-H และหมู่เมทิลีน และแถบ 1707 cm^{-1} (C=O) ก็เพิ่มขึ้น บ่งชี้การเกิดหมู่คาร์บอนิล (1650–1770 cm^{-1}) เช่น แอลดีไฮด์ คีโตน และเอสเทอร์ ซึ่งเป็นหลักฐานถึงการก่อตัวของโครงสร้างแบบอะโรมาติกแบบ เฮเทอโรอะโรมาติก (Heteroaromatic) ที่มีเฮเทอโรอะตอมอย่างออกซิเจนร่วมในวงแหวนโดยรวม ไฮโดรชาร์จาก HTC ที่อุณหภูมิสูงมีหมู่ C=O และ C-H แบบอะลิฟาติกน้อยลง แต่มีหมู่ CH_x และ C=O มากขึ้น อันเป็นผลจากดีคาร์บอกซิเลชันและการเกิด CO_2 (Ibarra, Munoz, and Moliner, 1996) [16] สำหรับการคาร์บอนเซชันที่ 270 องศาเซลเซียส (CT 2) ความเข้มของหมู่ C=O ต่ำกว่า HTC 6 เนื่องจากไม่มีน้ำในระบบ ทำให้หมู่คาร์บอนิลเกิดน้อยกว่า และอาจมีผลต่อสมบัติการดูดซับของถ่าน (Jain et al., 2019) [17]

การวิเคราะห์สมบัติและเกณฑ์การวิเคราะห์ ปุ๋ย และวัสดุปรับปรุงดิน

ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติของไฮโดรซาร์จากกากกากกับปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ปุ๋ยไส้เดือน ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยคอก ได้ทำการวิเคราะห์ธาตุอาหารที่บำรุงดิน ซึ่งหมายถึงสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ธาตุอาหารหลัก (N, P, K), ธาตุอาหารรอง (Ca, Mg, S) และธาตุอาหารเสริม (Fe, Zn, Mn ฯลฯ) เพื่อประเมินศักยภาพของไฮโดรซาร์ในการเป็นวัสดุปรับปรุงดินเชิงชีวภาพ การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารอาหารที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงดิน แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางเคมีของถ่านไฮโดรซาร์จากกากกา

วัสดุ	pH	EC (ds/m)	C/N	OM(%)	Total N(%)	Total P(%)	Total K(%)
กากกา	5.6	1.05	16.3	21.1	3.17	ไม่พบ	0.71
HTC3	5.9	1.67	12.96	19.5	5.1	1.0	1.50
ปุ๋ยไส้เดือน	6.5	0.56	-	26.7	1.19	2.08	1.47
ปุ๋ยหมัก	8.8	7.72	17.33	53.8	1.8	1.9	1.4
ปุ๋ยคอก	8.1	2.2	22.3	-	1.7	1.8	0.79
เกณฑ์มาตรฐาน*	5.5-8.5	≤ 3.5	15 ≤ C/N ≤ 35	≥ 20	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 1.0

*คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่าง ดิน น้ำ ปุ๋ย พืช (Land Development Department, 2004) [10]

โดยค่า pH (ความเป็นกรดด่าง) และค่าการนำไฟฟ้า (Electricity, EC) มักจะได้รับการพิจารณาร่วมกันเพื่อพิจารณาว่าจำเป็นต้องมีการแก้ไขหรือปรับปรุงอะไรในสารนั้นก่อนที่จะนำมาใส่ลงในดิน (Rayment and Higginson, 1992) [18] จากตารางที่ 4 พบว่าไฮโดรซาร์จากกากกา (อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส, 90 นาที) มีค่า pH เท่ากับ 5.8 ค่า pH จะเป็นตัวกำหนดความอยู่รอดของจุลินทรีย์ซึ่งถ้า pH ที่เหมาะสมจะใกล้เคียง 7 ส่งผลที่ดีต่อการเจริญเติบโตของพืชด้วย แบคทีเรียส่วนใหญ่เจริญได้ดีที่สุดในที่มีค่า pH ประมาณ 5.5-8. ในส่วนของค่าการนำไฟฟ้า (EC) เท่ากับ 1.67 โดยค่าที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใส่ลงในดินได้ค่า EC เป็นค่าตัวแปรที่สำคัญในปริมาณของไอออนที่ละลายน้ำได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นปริมาณของเกลือในน้ำ โดยน้ำที่มีเกลือในปริมาณมากจะไม่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของพืชเนื่องจากแรงดันออสโมติกของสารละลายในดินจะเพิ่มขึ้น อาจทำให้ขาดสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ส่วนใหญ่ค่า EC จะอยู่ในช่วง 0-2 ds/m (Schroth et al., 2003) [19] โดยทั่วไป ฟอสฟอรัสในกากกาจะมีในระดับ <0.3% ซึ่งอาจต่ำกว่าค่าที่เครื่องตรวจวิเคราะห์สามารถรายงานได้ ความร้อนใน HTC (~250 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิด Decomposition และ Mineralization ของสารอินทรีย์ ปลดปล่อย P ให้อยู่ในรูปอนินทรีย์ ส่งผลให้ Total P ใน ถ่านไฮโดรซาร์จึงตรวจพบได้ (Mohan and Nikhil, 2016) [20] ส่วนอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C : N) ที่มีอยู่ในวัสดุหมักเป็นแหล่งธาตุอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์ ซึ่งคาร์บอนจะเป็นแหล่งให้พลังงาน ส่วนไนโตรเจนใช้สำหรับกระบวนการสร้างเซลล์และสังเคราะห์โปรตีนของเซลล์ ดังนั้นอัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ ไนโตรเจนในวัสดุหมักหรือปุ๋ยหมักจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนีย หากมีปริมาณแอมโมเนียมากจะส่งผลต่อความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์แต่หากสัดส่วนคาร์บอนสูงกว่าไนโตรเจนมากจะทำให้กระบวนการย่อยสลายจุลินทรีย์ช้าลง ซึ่ง อัตราส่วน C ต่อ N ที่เหมาะสมต้องอยู่ระหว่าง 20-40

ซึ่งค่า C : N ของไฮโดรชาร์จากกากชาพบว่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเนื่องจากกากชามีปริมาณไนโตรเจนที่สูง ดังนั้นถ้าจะนำไฮโดรชาร์นี้ไปเป็นสารปรับปรุงดินอาจจะต้องปรับปรุงคุณสมบัติก่อนคือควรนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิสูงเพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น (Hongkong Organic Resource Centre, 2005; Kim et al., 2015; Roman et al., 2015; Funke and Ziegler, 2010) [21–24]

สรุปและอภิปรายผล

การใช้กากใบชาเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตไฮโดรชาร์ (hydrochar) ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (HTC) ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน และการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน โดยแสดงให้เห็นว่า HTC สามารถลดขั้นตอนการทำให้แห้งและใช้อุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการคาร์บอนเซชันแบบดั้งเดิม ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งอย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 230–270 องศาเซลเซียส ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนในไฮโดรชาร์ สะท้อนจากค่า H/C และ O/C molar ratio ที่ลดลง อันเป็นผลจากปฏิกิริยา dehydration และ decarboxylation ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR ที่พบการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชัน C–H (CH_x) และ C=O เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยเงื่อนไขที่ให้ค่าการกู้คืนพลังงาน (Energy Recovery Efficiency, ERE) สูงสุด คือ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ทั้งนี้ ไฮโดรชาร์ที่ได้ยังมีค่า C : N ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งอาจไม่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารปรับปรุงดินโดยตรง จึงควรผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มคาร์บอนคงที่และปรับสมดุลองค์ประกอบให้เหมาะสมกับการใช้งานในภาคเกษตรกรรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaicharoempong, J. (2009). Tea seed cake for golden apple snail control. In *Proceedings of the National Academic Conference on Biotechnology and Genetic Engineering*, Chulalongkorn University (pp. 37-40). (in Thai)
- [2] Nakasan, K., Itthibenjapong, W., and Pavasant, P. (2016). Adsorption of volatile organic compounds using biomass modified by hydrothermal carbonization. *Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal*, 2(2), 7-19. (in Thai)
- [3] Putra, H., Dewi, K., Pasek, A., and Damanhuri, E. (2017). Hydrothermal carbonization of biomass waste by using a stirred reactor: An initial experimental results. *Reaktor*, 16(4), 212-217. <https://doi.org/10.14710/reaktor.16.4.212-217>
- [4] Sharma, R., Jasrotia, K., Singh, N., Ghosh, P., Srivastava, S., Sharma, N. R., Singh, J., Kanwar, R., and Kumar, A. (2020). A comprehensive review on hydrothermal carbonization of biomass and its applications. *Chemistry Africa*, 3, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s42250-019-00098-3>
- [5] Heilmann, S. M., Jader, L. R., Berruoco, C., and Elliott, D. C. (2011). Hydrothermal carbonization of agricultural and food waste. *Bioresource Technology*, 102(19), 11163-11171. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.003>
- [6] Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., and Emmerich, K. H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass: A review of processes and products. *Biofuels*, 2(1), 71-106. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>

- [7] Reza, M. T., Lynam, J. G., Uddin, M. H., and Coronella, C. J. (2013). Hydrothermal carbonization: Fate of inorganics. *Bioresource Technology*, 150, 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.037>
- [8] Mannarino, G., Sarrion, A., Diaz, E., Gori, R., De la Rubia, M. A., and Mohedano, A. F. (2022). Improved energy recovery from food waste through hydrothermal carbonization and anaerobic digestion. *Waste Management*, 142, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.003>
- [9] Deng, C., Lin, R., Kang, X., Wu, W., Ning, X., Wall, D., and Murphy, J. D. (2022). Co-production of hydrochar, levulinic acid and value-added chemicals by microwave-assisted hydrothermal carbonization of seaweed. *Chemical Engineering Journal*, 441, Article 135915. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135915>
- [10] Land Development Department. (2004). *Manual for the analysis of soil, water, fertilizer, and plant samples* (Vol. 1). Office of Science for Land Development. (in Thai)
- [11] Funke, A., and Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), 160-177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>
- [12] Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., and Emmerich, K.-H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2(1), 71-106. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>
- [13] Kim, D., Lee, K., and Park, K. Y. (2014). Hydrothermal carbonization of anaerobically digested sludge for solid fuel production and energy recovery. *Fuel*, 130, 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.020>
- [14] Kim, D., Lee, K., Bae, D., and Park, K. Y. (2017). Characterizations of biochar from hydrothermal carbonization of exhausted coffee residue. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19, 1036-1043. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0572-2>
- [15] Van Krevelen, D. W. (1950). Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal. *Fuel*, 29, 269-284.
- [16] Ibarra, J., Munoz, E., and Moliner, R. (1996). FTIR study of the evolution of coal structure during the coalification process. *Organic Geochemistry*, 24(6), 725-735. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2018.10.001>
- [17] Jain, M., Yadav, M., Kohout, T., Lahtinen, M., Garg, V. K., and Sillanpää, M. (2019). Development of iron oxide/activated carbon nanoparticle composite for the removal of Cr(VI), Cu(II) and Cd(II) ions from aqueous solution. *Water Resources and Industry*, 20, Article 100104.
- [18] Rayment, G. E., and Higginson, F. R. (1992). *Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods*. Inkata Press.
- [19] Schroth, G., Lehmann, J., and Barrios, E. (2003). *Soil nutrient availability and acidity*. CABI Publishing.

- [20] Mohan, S. V., and Nikhil, G. N. (2016). Tea waste valorization: Physicochemical characterization and potential applications. *Waste and Biomass Valorization*, 7(2), 239-248.
<https://doi.org/10.1007/s12649-015-9454-0>
- [21] Hongkong Organic Resource Centre. (2005). *Compost and soil conditioner quality standards*. Hong Kong Baptist University.
- [22] Kim, D., Yoshikawa, K., and Park, K. Y. (2015). Characteristics of Biochar Obtained by Hydrothermal Carbonization of Cellulose for Renewable Energy. *Energies*, 8(12), 14040-14048.
<https://doi.org/10.3390/en81212412>
- [23] Roman, P., Martinez, M. M., and Pantoja, A. (2015). *Farmer's compost handbook: Experience in Latin America* (FAO Publication). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [24] Funke, A., and Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), 160-177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>