

การผลิตไฮโดรไลสจากชีวมวลแหล่งพลังงานความร้อนจากระบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กใน
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน

Hydrolysate Production from Biomass via Hydrothermal Carbonization Using
Magnetic Induction Heating

วิทยา ชูเนตร¹, อลิสา ธรรมฤทธิ¹, จริญญา ภาคพรม¹, พิสิษฐ์ จันแปงเงิน¹, ชาญชัย ทองโสภ¹, นุชนาฏ สันतालุนัย²
สำราญ สันतालุนัย¹ และ สำเร้ง สันतालุนัย^{1*}

Wittaya ChUNET¹, Alisa Thammarit¹, Jariya Pakprom¹, Pisit Janpangngern¹, Chanchai Thongsopa¹,
Nuchanart Santalunai² Samran Santalunai¹ and Samroeng Santalunai^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นครราชสีมา 30000

¹Electronic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhonratchasima 30000

²Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of
Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

¹Corresponding author: Tel.: 08-353100702. E-mail address: Samroeng.js@gmail.com

Abstract

This study develops an induction-heated hydrothermal carbonization (HTC) system to convert tobacco-residue biomass into hydrochar and hydrolysate. A high-power coil driven by a half-bridge inverter (10–20 kHz, 5,000 W) heats a sealed metal reactor; feedstock (tobacco: water = 50:5, w/w) was run for 2 and 3 h, with temperature logged every 5 min and pressure every 30 min. Products were separated into hydrochar (oven-dried at 105 °C for 3 h) and hydrolysate. During the 2-h run, the temperature reached ~140 °C and the pressure ~4.1 bar, demonstrating the feasibility of induction heating for HTC. Optimizing power density, coil-to-reactor spacing, insulation, and water ratio is still required to achieve conventional HTC temperatures (~200–230 °C) and improve product quality.

Keywords: Hydrothermal carbonization; hydrolysate production; Magnetic induction heating; Hydrolysate formation; Tobacco biomass conversion

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ออกแบบและประเมินระบบไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (HTC) สำหรับแปรรูปใบยาสูบเหลือทิ้งโดยใช้การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแทนการเผาไหม้แก๊ส ต้นแบบประกอบด้วยขดลวดกำลังสูงขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ฮาร์ฟบริดจ์ (10–20 kHz, 5,000 W) ให้ความร้อนผนังถังโลหะในสภาวะปิด สูตรป้อนใบยาสูบต่อน้ำ 50:5 และทดสอบที่เวลาพัก 2 และ 3 ชั่วโมง โดยบันทึกอุณหภูมิทุก 5 นาที และความดันทุก 30 นาที ผลผลิตแยกเป็นไฮโดรชาร์ (อบที่ 105 °C 3 ชม.) และไฮโดรไลเสต สำหรับการทดสอบ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุด ~140 °C และความดัน ~4.1 bar แสดงศักยภาพของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต่อกระบวนการ HTC ทั้งนี้ยังควรปรับความหนาแน่นกำลัง ระยะเวลา-ถึง ฉนวน และสัดส่วนน้ำ เพื่อเข้าใกล้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม (~200–230 °C) และยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ: การคาร์บอนซ์แบบไฮโดรเทอร์มอล; การผลิตไฮโดรชาร์; การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก; การสร้างไฮโดรไลเสต; การแปรรูปชีวมวลใบยาสูบ

บทนำ

ปัญหาการจัดการขยะชีวมวลและของเสียอินทรีย์จากเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร และชุมชนที่มีความรุนแรงตามการเติบโตทางเศรษฐกิจและจำนวนประชากร รายงานสหประชาชาติ [1–2] ชี้ว่าปริมาณขยะชีวมวลทั่วโลกเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ขณะที่วิธีกำจัดแบบดั้งเดิม เช่น ฝังกลบและเผา ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีแปรรูปที่ยั่งยืนเพื่อเปลี่ยนของเสียให้เป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพมูลค่าสูงและนำกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน เป็นกระบวนการเคมี-ความร้อนที่แปรรูปชีวมวลขั้นสูง (~60–80%) โดยไม่ต้องอบแห้ง ภายใต้อุณหภูมิ ~150–250 °C และความดันอิมิต์วของน้ำ ผลิตภัณฑ์หลักได้แก่ไฮโดรชาร์ (เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งหรือวัตถุดิบคาร์บอนฟังก์ชัน), ไฮโดรไลเสต (สารละลายอินทรีย์) และก๊าซจากการแตกสลายอินทรีย์ [3–4] กระบวนการขับเคลื่อนด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดีคาร์บอกซิเลชัน และดีไฮเดรชัน ที่ย่อยสลายเซลลูโลส-เฮมิเซลลูโลส-ลิกนินให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้การแปลงของเสียอินทรีย์มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน

อย่างไรก็ตามงานวิจัย HTC ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้น hydrochar สำหรับพลังงานและวัสดุคาร์บอนฟังก์ชัน แต่ hydrolysate ซึ่งเป็นเศษของเหลวกลับได้รับความสนใจน้อย ทั้งที่มีสารอินทรีย์และธาตุอาหารพืชสำคัญจำนวนมาก (เช่น กรดอินทรีย์ น้ำตาลอนุพันธ์ ฟีนอล และ N-P-K) จึงมีศักยภาพต่อการใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพหรือสารตั้งต้นผลิตพลังงานชีวภาพต่อเนื่อง [5–6]

หนึ่งในข้อจำกัดของกระบวนการ HTC คือการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมที่อาศัยการนำ-การพาผ่านผนังถัง ซึ่งทำให้ร้อนช้า กระจายไม่สม่ำเสมอ และกระทบต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา [7] แนวทางแก้คือการใช้เทคโนโลยีให้ความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ที่สร้างกระแสไหลวนในผนังโลหะให้เกิดความร้อนโดยตรง จึงร้อนเร็ว สม่ำเสมอ และลดการสูญเสียพลังงาน [8] ผลคือเร่งการย่อยสลายเซลลูโลส-เฮมิเซลลูโลส-ลิกนิน เพิ่มสารอินทรีย์ละลายน้ำ และยกระดับปริมาณ/คุณภาพของไฮโดรไลเสตเมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิม

งานวิจัยนี้ประยุกต์การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (MIH) ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (HTC) เพื่อยกระดับ hydrolysate จากผลพลอยได้ให้เป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพมูลค่าสูง โดยมุ่งพัฒนาและประเมินระบบ HTC ที่ใช้ MIH สำหรับชีวมวลเปียก ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำต่อปริมาณ-คุณภาพของ

hydrolysate พร้อมวิเคราะห์สมบัติและสารอาหารที่ละลายน้ำ ได้แก่ pH, COD, TOC, ไนโตรเจน-ฟอสฟอรัส-โพแทสเซียม และกรดอินทรีย์ เพื่อจัดทำองค์ความรู้รองรับการใช้ประโยชน์ hydrolysate อย่างยั่งยืน

วิธีการวิจัย

การเตรียมวัตถุดิบสำหรับทดสอบ

ใบยาสูบซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ถูกบดให้ขนาดสม่ำเสมอและผสมน้ำในอัตราส่วน 50:5 (โดยมวล) ก่อนบรรจุในถังปฏิกิริยาโลหะและให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำจากขดลวดกำลังสูงที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบฮาร์ตฟรیدจ์ (10–20 kHz, 5,000 W) การทดลองกำหนดระยะเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง โดยบันทึกอุณหภูมิทุก 5 นาทีและความดันทุก 30 นาที หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา แยกผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง (ไฮโดรชาร์) และของเหลว (ไฮโดรไลเสต) ด้วยการกรอง และนำไฮโดรชาร์ไปอบที่ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อเตรียมทดสอบ ระบบติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ-ความดัน พร้อมอุปกรณ์ความปลอดภัย (เบรกเกอร์และพัดลมระบายความร้อน) ขึ้นตอนก่อนเริ่มงานประกอบด้วยการปรับอัตราส่วนน้ำ ระยะห่างขดลวด และระดับกำลังจ่ายตามผลการจำลอง เพื่อให้ได้สภาวะปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอและปลอดภัย

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดในการวิจัย

รายการ	ค่า
อุณหภูมิเป้าหมาย HTC (°C)	200-300
ความดันเป้าหมาย (บาร์)	16-23
เวลาปฏิกิริยา (นาที)	30-60
กำลังจ่ายทดสอบ (กิโลวัตต์)	5,000

การนำใบยาสูบมาผ่านกระบวนการ Hydrothermal Carbonization (HTC) สามารถช่วยแก้ปัญหานี้ได้ โดยกระบวนการ HTC จะเปลี่ยนใบยาสูบให้เป็นถ่านชีวภาพ ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น ลดปริมาณขยะชีวมวลและช่วยกำจัดสารพิษในใบยาสูบ ทำให้ถ่านชีวภาพที่ได้ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังสามารถนำไปใช้ในเกษตรกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์และกักเก็บคาร์บอนในดิน หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีค่าพลังงานสูง ซึ่งช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล



(ก) ก่อนบด



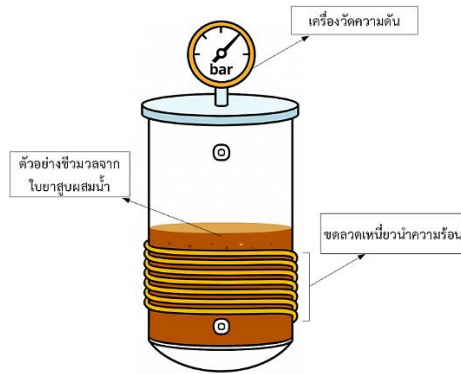
(ข) หลังบด

ภาพที่ 1 ใบยาสูบแห้งสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบชีวมวลในการทดลองกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชัน

ระบบทดสอบผลิตไฮโดรไลเสต

ระบบทดสอบผลิตไฮโดรไลเสตจากชีวมวลด้วยความร้อนจากสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (ภาพที่ 2) ประกอบด้วยภาชนะปฏิกิริยาทรงกระบอกปิดสนิท ทนแรงดัน-อุณหภูมิสูง ติดตั้งเกจวัดความดันแบบเรียลไทม์เพื่อควบคุมสภาวะและ

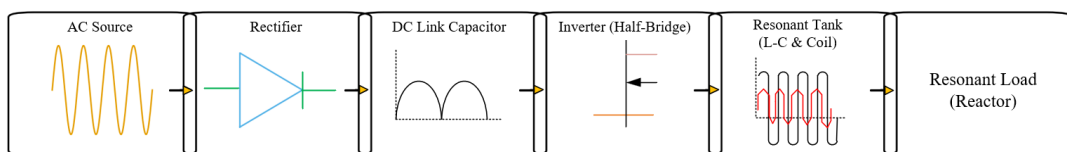
ความปลอดภัย ภายในบรรจุตัวอย่างชีวมวลผสมน้ำให้ระดับครอบคลุมขดลวดทองแดงที่พันรอบภาชนะ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กก่อให้เกิดความร้อนเหนี่ยวนำ ทำให้อุณหภูมิและแรงดันเพิ่มขึ้น กระตุ้นการแตกตัวของสารอินทรีย์จนได้ไฮโดรไลเสตที่พร้อมต่อยอดใช้เป็นวัตถุดิบด้านพลังงานชีวภาพหรือการเกษตร ระบบถูกออกแบบให้ควบคุมได้และรักษาเงื่อนไขปฏิกิริยาให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต



ภาพที่ 2 ระบบทดสอบผลิตไฮโดรไลเสตจากชีวมวลแหล่งพลังงานความร้อนจากระบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ทฤษฎีและหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

กระบวนการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นเทคนิคให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับป้อนเข้าขดลวดให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับซึ่งเชื่อมต่อกับชิ้นงาน เมื่อชิ้นงาน (ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าและมีสมบัติแม่เหล็ก) อยู่ในสนามดังกล่าว จะเกิดกระแสไหลวน ภายในชิ้นงานตามกฎของเลนซ์ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก กระแสไหลวนนี้สูญเสียพลังงานผ่านความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ ทำให้เกิดความร้อนโดยตรงภายในเนื้อวัสดุ นอกจากนี้ในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกยังมีการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสแม่เหล็กซึ่งเพิ่มการเกิดความร้อนร่วมด้วย จึงไม่ต้องอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากผิวภายนอก ส่งผลให้การเพิ่มอุณหภูมิรวดเร็ว ควบคุมได้แม่นยำ และมีประสิทธิภาพพลังงานสูง



ภาพที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

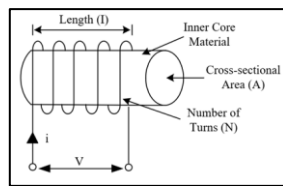
จากภาพที่ 3 ซึ่งเป็นการแสดงลำดับการทำงานของระบบจ่ายพลังงานสำหรับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างเป็นขั้นตอน โดยเริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งถูกแปลงเป็นกระแสตรงด้วยวงจรเรกติไฟเออร์ และทำให้แรงดันเรียบด้วยตัวเก็บประจุคัปปลิงฝั่งกระแสตรง ต่อจากนั้นแรงดันกระแสตรงดังกล่าวถูกแปลงกลับเป็นกระแสสลับความถี่สูงด้วยอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์แล้วจ่ายเข้าสู่วงจรเรโซแนนซ์ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (L-C) ร่วมกับคอยล์เหนี่ยวนำ เพื่อให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์และการถ่ายโอนพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง สุดท้ายพลังงานความถี่สูงถูกส่งต่อไปยังโหลดแบบเรโซแนนซ์ เพื่อก่อให้เกิดความร้อนภายในรีแอคเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด [9]

กระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถถ่ายเทพลังงานไปยังวัสดุได้โดยตรงผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเข้าสู่ขดลวด เมื่อสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำในวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) จะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ภายในวัสดุ ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียไปในรูปของความร้อนตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน [11] หลักการทำงานของระบบเหนี่ยวนำสามารถอธิบายได้ผ่านบล็อกไดอะแกรม เริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านวงจรเรียงกระแสและตัวกรอง เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงเรียบ ก่อนเข้าสู่วงจรถอแรงดันที่แปลงกลับเป็นกระแสสลับความถี่สูงโดยใช้ออสเฟต (MOSFET) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลัง และจ่ายเข้าสู่วงจรรเรโซแนนซ์ซึ่งเชื่อมต่อกับโหลด เพื่อก่อให้เกิดความร้อนในวัสดุเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (L) เป็นปัจจัยกำหนดขนาดของการเหนี่ยวนำในระบบ โดยขึ้นกับพารามิเตอร์ทางกายภาพของคอยล์และแกนอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ จำนวนรอบของขดลวด (N) พื้นที่หน้าตัดของแกนที่ใช้พันขดลวด (A) และคุณสมบัติของวัสดุแกนผ่านค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) รวมถึงความยาวเชิงแม่เหล็กของแกน (l) ซึ่งความสัมพันธ์เชิงปริมาณสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [12]

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (1)$$

โดยที่ N คือจำนวนขดลวด, μ คือค่าความซึมซาบของวัสดุแกน, A คือพื้นที่หน้าตัดของแกน และ l คือความยาวของแกน



ภาพที่ 4 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำ

เรโซแนนซ์

เรโซแนนซ์ (Resonance) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อระบบไฟฟ้าหรือระบบกลทางกายภาพได้รับแรงกระตุ้นที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบนั้น ส่งผลให้เกิดการสั่นหรือการตอบสนองที่มีแอมพลิจูดสูงสุดในบริบทของวงจรไฟฟ้า เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) และค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) มีผลทำให้รีแอกแตนซ์รวมในระบบเป็นศูนย์ หรือสมดุลกัน ส่งผลให้ค่าความต้านทานรวมของวงจรมีค่าต่ำที่สุดในวงจร RLC แบบอนุกรม และมีค่ามากที่สุดในการวงจร RLC แบบขนาน ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 [13]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

โดยที่ f คือความถี่เรโซแนนซ์ (เฮิร์ตซ์), L คือค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี) และ C คือค่าคาปาซิแตนซ์ (ฟาร์ด)

การถ่ายโอนความร้อน

ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบให้ความร้อน ต้องคำนึงถึงกลไกการถ่ายโอนพลังงานความร้อน 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) การนำความร้อน ซึ่งพลังงานเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุจากบริเวณร้อนสู่บริเวณเย็นโดยไม่มีเคลื่อนที่ของตัวกลาง (2) การพาความร้อน ซึ่งพลังงานถูกพาไปพร้อมการไหลเคลื่อนที่ของของไหลหรือลม และ (3) การแผ่รังสีความร้อน ซึ่งส่งผ่านพลังงานโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง สำหรับการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ จะเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการออกแบบวงจร เรโซแนนซ์ ให้ทำงานที่ความถี่เฉพาะซึ่งถ่ายโอนพลังงานสู่โหลดได้สูงสุด ส่งผลให้สร้างกระแสสลับความถี่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการสูญเสีย และยกระดับประสิทธิภาพการแปลงพลังงานโดยรวม

ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการให้ความร้อน เป็นพลังงานที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งปริมาณพลังงานความร้อนในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ สามารถหาได้จากสมการที่ 3 [14]

$$Q = mc\Delta T \quad (3)$$

โดยที่ Q คือปริมาณความร้อน (จูล), m คือมวลของสาร (กิโลกรัม), c คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 4.186 กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส และ ΔT คือความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

เมื่อต้องการคำนวณเป็นกำลังงานไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$P = \frac{Q}{t} \quad (4)$$

โดยที่ P คือกำลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์), Q คือปริมาณพลังงานในหน่วยชั่วโมง (กิโลวัตต์ชั่วโมง) และ t คือเวลาในหน่วยชั่วโมง (h)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันต้องควบคุมตัวแปรเวลา อุณหภูมิ และความดันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์และไฮโดรไลสเสตอย่างมีประสิทธิภาพ โดยงานนี้ตั้งเงื่อนไขเวลาศึกษา 2 และ 3 ชั่วโมง ภายใต้กำลังจ่าย 5,000 วัตต์ และบันทึกอุณหภูมิทุก 5 นาทีควบคู่กับการบันทึกความดันทุก 30 นาที สำหรับรอบทดลอง 2 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ถึงปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 140 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุดประมาณ 4.1 บาร์ โดยแนวโน้มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงเริ่มทดลองและชะลอตัวใกล้จุดสูงสุด ขณะเดียวกันความดันเพิ่มขึ้นเป็นขั้นตามช่วงเวลา (stepwise) จนถึงค่าดังกล่าวเมื่อสิ้นสุดรอบ 2 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบ HTC ที่ต้องอาศัยการกักเก็บพลังงานความร้อนและการเกิดไอน้ำภายในถังเพื่อขับเคลื่อนปฏิกิริยา

ผลการทดลองวัดค่าความเป็นกรดต่างของไฮโดรไลสเสต

โดยทั่วไปแล้ว pH ของปุ๋ยน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกควรอยู่ระหว่าง 5.5–7.5 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของพืชส่วนใหญ่ ถ้าค่า pH ของปุ๋ยที่ต่ำกว่า 5.5 จะเป็นกรดมากเกินไป และถ้า pH สูงกว่า 7.5 จะมีความเป็นด่างมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้พืชเติบโตได้ไม่ดี การปรับค่า pH ของปุ๋ยควรสอดคล้องกับดิน เพื่อให้เกิดการดูดซึมสารอาหารที่มีประสิทธิภาพ

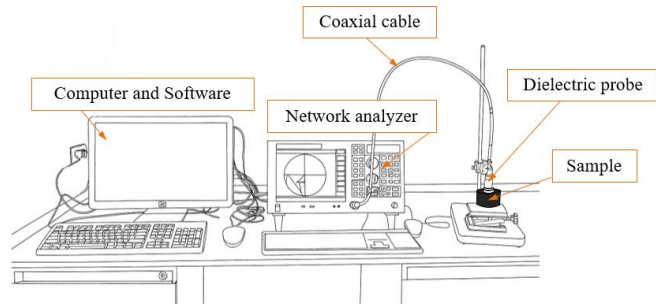


ภาพที่ 5 ผลการทดสอบวัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำใบยาสูบที่เวลาต่าง ๆ (ก) 30 นาที (ข) 120 นาที และ (ค) 180 นาที

จากกราฟภาพที่ 5 พบว่าค่า pH ของไฮโดรไลเสตเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาปฏิกิริยา โดยเริ่มจากประมาณ 6.2 ที่เวลา 30 นาที และสูงขึ้นเป็นราว 7.0 และ 7.8 เมื่อครบ 120 และ 160 นาทีตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชส่วนใหญ่ (pH 5.5–7.5) และมีแนวโน้มเป็นด่างเล็กน้อยในช่วงเวลาท้าย การเพิ่มขึ้นของ pH สะท้อนถึงการสลายตัวของสารอินทรีย์ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารประกอบต่าง เช่น แอมโมเนียหรือสารประกอบไนโตรเจน รวมถึงการละลายของธาตุอาหารหลักอย่างโพแทสเซียมและแคลเซียมซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง ทั้งนี้ค่า pH ที่เกิน 7.5 แม้ยังไม่เป็นปัญหารุนแรง แต่หากนำไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำควรปรับให้สอดคล้องกับชนิดดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมธาตุอาหาร นอกจากนี้แนวโน้มค่า pH ที่สูงขึ้นยังบ่งชี้ว่าการเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการอาจเร่งการย่อยสลายสารประกอบพอลิเมอร์ เช่น เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ต่างมากขึ้น การสังเกตนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่รายงานว่าผลิตภัณฑ์ไฮโดรไลเสตมีค่า pH ใกล้เคียงกลางถึงด่างเล็กน้อย ซึ่งเป็นลักษณะพึงประสงค์สำหรับการใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพหรือสารปรับปรุงดินที่ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์และเสถียรภาพของดิน

ผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

การวัดค่าไดอิเล็กตริกได้นำไฮโดรไลเสตไปวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผล (dielectric constant) และค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) เพื่อทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของไฮโดรไลเสต ซึ่งการวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุทำโดยใช้ชุดวัดประกอบด้วยเครื่อง Network Analyzer สำหรับกำเนิดสัญญาณและวัด S-parameters เชื่อมต่อกับหัววัดไดอิเล็กตริก (dielectric probe) ผ่านสายโคแอกเซียลความถี่สูง โดยมีคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานและประมวลผลผลลัพธ์ ตัวอย่าง (ของเหลวหรือของแข็งผิวเรียบ) ถูกนำมาสัมผัสกับปลายหัววัดโดยตรง ขั้นตอนเริ่มจากการปรับเทียบระบบด้วยมาตรฐานอ้างอิง (เช่น open/short และน้ำกลั่น) เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อน จากนั้นสแกนความถี่ในช่วงที่กำหนด ข้อมูลการสะท้อน/ส่งผ่านที่วัดได้จะถูกแปลงในซอฟต์แวร์เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) และค่าปัจจัยการสูญเสีย (dielectric loss factor) ของวัสดุอย่างต่อเนื่องตามความถี่ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 6 การวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ค่าไดอิเล็กตริกเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของการตอบสนองของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า โดยจำแนกเป็นส่วนเชิงจริงหรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') ซึ่งสะท้อนความสามารถในการกักเก็บประจุ และส่วนเชิงจินตภาพหรือค่าปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริก (ϵ'') ซึ่งบ่งชี้พลังงานที่สูญเสียระหว่างการมีปฏิสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า ผลการวัดในงานนี้ให้แนวโน้มของ ϵ' และ ϵ'' ตามความถี่ แต่เนื่องจากเงื่อนไขการทดลองยังไม่ครอบคลุมช่วงเป้าหมายเชิงทฤษฎี จึงอ้างอิงและเปรียบเทียบกับวรรณกรรมที่ [15] ซึ่งรายงานการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของไฮโดรคาร์บอนจากเปลือกปาล์ม เพื่อใช้เป็นกรอบอ้างอิงในการประเมินรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของ ϵ' และ ϵ'' ที่คาดหวังจากกราฟ และยืนยันความสอดคล้องของทิศทางแนวโน้มกับกลไกทางวัสดุศาสตร์ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

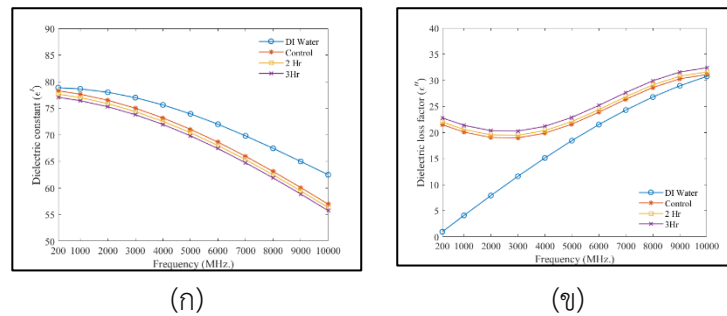
จากภาพที่ 7(ก) เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงจริง (ϵ') ของน้ำกลั่น (DI) กับไฮโดรไลเสตทั้งชุดตั้งต้น (Control) และหลังปฏิกิริยา 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า ϵ' ของน้ำกลั่นสูงสุด ($\approx 62-79$) ขณะที่ Control อยู่ราว 56-78 ส่วนที่ 2 ชั่วโมงอยู่ 56-77 และที่ 3 ชั่วโมงต่ำสุดราว 55-77 แนวโน้มโดยรวม ϵ' คือ ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มจาก 200 MHz เป็น 10 GHz อันเนื่องมาจากการตอบสนองการจัดเรียงตัวของโมเลกุลน้ำที่ลดลงในย่านความถี่สูง การลดลงชัดเจนของไฮโดรไลเสตที่ 3 ชั่วโมงอาจสะท้อนการเพิ่มชนิดละลายและไอออนซึ่งรบกวนการหมุนของไดโพลน้ำ ส่งผลให้ความสามารถในการโพลาไรซ์ลดลงเล็กน้อย จึงควรคัดเลือกเวลาปฏิกิริยาให้เหมาะสมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ/คลื่นวิทยุและการใช้งานเชิงเกษตรหรือการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้า-แม่เหล็ก

จากภาพที่ 7(ข) ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (dielectric loss factor) จะเห็นว่าไฮโดรไลเสตที่เวลา 3 ชั่วโมง จะมีค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (dielectric loss factor) สูงที่สุด ตามด้วยเส้นกราฟของไฮโดรไลเสตที่เวลา 2 ชั่วโมง และไฮโดรไลเสตตั้งต้น (Control) ส่วน DI Water พบว่ามีค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (dielectric loss factor) ลดลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับ ไฮโดรไลเสตที่เวลา 3 ชั่วโมง ไฮโดรไลเสตตั้งต้น และไฮโดรไลเสตที่เวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อนำน้ำปราศจากไอออน (DI) หรือน้ำกลั่นกับไฮโดรไลเสตตั้งต้น (Control) ที่เวลา 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง จากกราฟภาพที่ 7 มาเปรียบเทียบในรูปแบบตาราง โดยทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผล และค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกในช่วงความถี่ 200 MHz ถึง 10,000 MHz

เพื่อประเมิน สมบัติทางไฟฟ้าและพฤติกรรมตอบสนองของวัสดุชีวมวล (ไฮโดรไลเสต) ต่อสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำและไมโครเวฟ เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') บ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า ในขณะที่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก (ϵ'') แสดงถึงความสามารถในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงาน

ความร้อน การเข้าใจค่าทั้งสองนี้จึงช่วยให้สามารถกำหนดช่วงความถี่และกำลังไฟที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงาน ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์ที่ได้



ภาพที่ 7 กราฟแสดงผลที่ได้จากการทดสอบ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผล และ (ข) ค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกของไฮโดรไลเซต

ตารางที่ 2 แสดงผลการวัดค่าไดอิเล็กตริก

ความถี่ (MHz)	น้ำ DI		Control		2 ชั่วโมง		3 ชั่วโมง	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
200	78.853	0.9543	78.267	21.482	77.637	21.982	77.047	22.782
1000	78.626	4.0717	77.625	20.062	76.995	20.562	76.405	21.362
2000	77.989	7.8897	76.486	19.021	75.856	19.521	75.266	20.321
3000	76.977	11.580	74.992	18.945	74.362	19.445	73.772	20.245
4000	75.613	15.104	73.162	19.848	72.532	20.348	71.942	21.148
5000	73.933	18.421	71.026	21.584	70.396	22.084	69.806	22.884
6000	71.979	21.495	68.612	23.871	67.982	24.371	67.392	25.171
7000	69.799	24.292	65.959	26.340	65.329	26.840	64.739	27.640
8000	67.450	26.781	63.103	28.593	62.473	29.093	61.883	29.893
9000	64.990	28.935	60.088	30.265	59.458	30.765	58.868	31.565
10000	62.480	30.730	56.957	31.087	56.327	31.587	55.737	32.387

จากตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') และค่าปัจจัยการสูญเสีย (ϵ'') ในช่วงความถี่ 200-10,000 MHz พบว่าค่า (ϵ') ของไฮโดรไลเซตทุกกลุ่มตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับน้ำ DI สำหรับการวิเคราะห์ค่าปัจจัยการสูญเสีย (ϵ'') ซึ่งบ่งชี้ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นความร้อน พบว่ากลุ่มตัวอย่างไฮโดรไลเซตที่ผ่านกระบวนการ 3 ชั่วโมงมีค่า (ϵ'') สูงที่สุดในทุกย่านความถี่ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ยืนยันว่าระยะเวลาในกระบวนการ HTC ส่งผลต่อค่า (ϵ'') อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ 10 GHz ค่า (ϵ'') ของกลุ่ม 3 ชั่วโมง (32.387) สูงกว่ากลุ่มน้ำ DI (30.730) และกลุ่มควบคุม (31.087) อย่างชัดเจน การเพิ่มขึ้นนี้ชี้ให้เห็นว่าการยืดระยะเวลาปฏิกิริยาช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบอินทรีย์และไอออนในไฮโดรไลเซต ส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้ดีขึ้น และมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารดูดซับไมโครเวฟหรือวัสดุในการแปรรูปพลังงาน

โดยตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าคงที่และการสูญเสียไดอิเล็กตริกคือ ค่าความถี่ ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระที่ควบคุมการตอบสนองของโมเลกุลน้ำและสารละลายต่อสนามไฟฟ้า ยิ่งความถี่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลงเนื่องจากโมเลกุลไม่สามารถจัดเรียงตามการเปลี่ยนแปลงของสนามได้ทัน ขณะที่เวลา (2 และ 3 ชั่วโมง) และ ค่า Control เป็นปัจจัยรองที่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีของไฮโดรไลเสต เช่น ปริมาณสารอินทรีย์และไอออนที่ละลายน้ำ ซึ่งมีผลต่อค่าการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระดับรอง ดังนั้นค่าความถี่จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่สุดต่อค่าเป้าหมายที่ต้องการ ส่วนค่าควบคุมและเวลาเป็นตัวแปรเสริมที่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ โดยค่าที่แสดงในบทสรุปเป็นค่าโดยประมาณจากการวัดเชิงทดลองในช่วงความถี่ 200–10,000 MHz ภายใต้เงื่อนไขจริงของกระบวนการทดลอง

จากแนวโน้มของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลและการเปลี่ยนแปลงของพันธะไฮโดรเจนได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงและค่าการสูญเสียเพิ่มขึ้น แสดงถึงการลดลงของการจัดเรียงเชิงระเบียบของโมเลกุลน้ำและการอ่อนแรงของพันธะไฮโดรเจนภายในระบบ การวิเคราะห์แนวโน้มเหล่านี้สามารถใช้เป็นหลักฐานสนับสนุนเชิงอ้างอิง โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้า เช่น งานของ [15] ซึ่งแสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกันภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล จึงสามารถยืนยันผลการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างได้

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดปัญหาการจัดการขยะชีวมวลจากไบยาสูบด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (HTC) ที่ใช้การให้ความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (Magnetic Induction Heating: MIH) แทนวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ระบบต้นแบบประกอบด้วยขดลวดกำลังสูงและวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 10–20 kHz กำลัง 5,000 วัตต์ โดยออกแบบให้อุ่นถึงปฏิกิริยาโลหะโดยตรงภายใต้เงื่อนไขทดสอบ 2 และ 3 ชั่วโมง อัตราส่วนไบยาสูบ:น้ำ เท่ากับ 50:5 (โดยมวล) พร้อมการบันทึกอุณหภูมิทุก 5 นาที และความดันทุก 30 นาที ผลการทดลองพบว่าในรอบ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุดภายในถังปฏิกิริยาประมาณ 140 °C และความดันสูงสุดประมาณ 4.1 บาร์ โดยอุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับสอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบ HTC ผลผลิตถูกแยกเป็นไฮโดรชาร์และไฮโดรไลเสต โดยไฮโดรชาร์อยู่ที่ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อเตรียมทดสอบสมบัติเพิ่มเติม ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าการใช้ MIH สามารถสร้างความร้อนสม่ำเสมอและรวดเร็ว ลดการสูญเสียพลังงาน และมีศักยภาพในการเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไฮโดรไลเสตเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบเดิม ทั้งนี้การปรับปรุงพารามิเตอร์ระบบ เช่น ความหนาแน่นระยะห่างขดลวด และอัตราส่วนน้ำ จะช่วยให้กระบวนการเข้าใกล้ช่วงอุณหภูมิ HTC ที่เหมาะสม ($\approx 200\text{--}230\text{ }^{\circ}\text{C}$) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณค่าการใช้งานของผลิตภัณฑ์ชีวภาพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือทดลอง และทรัพยากรวิจัย ตลอดจน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการและความร่วมมือในการวิเคราะห์ผล นอกจากนี้ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในกระบวนการทดลองอย่างต่อเนื่อง รวมถึงนักศึกษาที่มีส่วนร่วมในการจัดเตรียมวัสดุและดำเนินการทดสอบในทุกขั้นตอน

ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกหน่วยงานและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ให้ข้อมูลและการสนับสนุนตลอดโครงการ ซึ่งมีส่วนสำคัญให้ผลการวิจัยครั้งนี้บรรลุเป้าหมายตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Toplicean, I. M., & Datcu, A. D. (2024). An overview on bioeconomy in agricultural sector, biomass production, recycling methods, and circular economy considerations. *Agriculture*, 14(7), 1143.
- [2] Şerban LR, Păucean A, Chiş MS, Pop CR, Man SM, Puşcaş A, Ranga F, Socaci SA, Alexa E, Berbecea A, et al. Metabolic Profile of Einkorn, Spelt, Emmer Ancient Wheat Species Sourdough Fermented with Strain of *Lactiplantibacillus plantarum* ATCC 8014. *Foods*. 2023; 12(5):1096. <https://doi.org/10.3390/foods12051096>
- [3] Huang, J., Zhao, B., Liu, T., Mou, J., Jiang, Z., Liu, J., ... & Liu, M. (2019). Wood-derived materials for advanced electrochemical energy storage devices. *Advanced Functional Materials*, 29(31), 1902255.
- [4] Zoppi, G., Tito, E., Bianco, I., Pipitone, G., Pirone, R., & Bensaid, S. (2023). Life cycle assessment of the biofuel production from lignocellulosic biomass in a hydrothermal liquefaction–aqueous phase reforming integrated biorefinery. *Renewable Energy*, 206, 375-385.
- [5] Li, J., Zhu, X., Li, Y., Tong, Y. W., Ok, Y. S., & Wang, X. (2021). Multi-task prediction and optimization of hydrochar properties from high-moisture municipal solid waste: Application of machine learning on waste-to-resource. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123928.
- [6] Liu, Y., Sun, Y., Wan, Z., Jing, F., Li, Z., Chen, J., & Tsang, D. C. (2021). Tailored design of food waste hydrochar for efficient adsorption and catalytic degradation of refractory organic contaminant. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127482.
- [7] Volpe, M., & Fiori, L. (2017). From olive waste to solid biofuel through hydrothermal carbonisation: The role of temperature and solid load on secondary char formation and hydrochar energy properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 63-72.
- [8] Yuan, J., Liu, N., Zhang, W., Peng, B., & Dong, W. (2022). Study on the effect of changing stator structure on wind permanent magnet eddy current heating device. *Energy Reports*, 8, 592-600.
- [9] Trip, N. D., Burca, A., Leuca, T., & Dudrik, J. (2014, November). Considerations on the analysis of an induction heating system. In *2014 11th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [10] จีระศักดิ์ วงศา, จีระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว, & วันชัย ทรัพย์สิงห์. (2014). นวัตกรรมการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ. *Journal of Humanities and Social Sciences Thonburi University*, 8(17), 111-117.

- [11] Zinn, S., & Semiatin, S. L. (1988). Coil design and fabrication: basic design and modifications. *Heat treating*, 12(3), 32-36.
- [12] Knight, D. W. (2013). Solenoid inductance calculation. DW Knight.
- [13] Shen, L., Long, S., Allarding, M. R., & Walton, M. (1977). Resonant frequency of a circular disc, printed-circuit antenna. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 25(4), 595-596.
- [14] Wang, Z., & Zhu, Z. (2021). Experimental study on the effects of different heating rates on coalbed methane desorption and an analysis of desorption kinetics. *ACS omega*, 6(50), 34889-34903.
- [15] Nizamuddin, S., Mubarak, N. M., Tiripathi, M., Jayakumar, N. S., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2015). Chemical, dielectric and structural characterization of optimized