

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ
เพื่อเพิ่มผลผลิตและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากกาบหมาก

Study of Optimal Conditions for Physical Activation in Activated Carbon Production
to Enhance Yield and BET Surface Area from Areca Spathe

ลลิตา เพชรใจหาญ¹ ธเนศ ไชยชนะ¹ กิตติกร สาสุจิตต์² ขจรเกียรติ กันทะหล้า² และ ภคมน ปินตนา^{2*}
Lalita Petchaihan¹ Tanate Chaichana¹ Kittikorn Sasujit² Kajonkiat Kantala² and Pakamon Pintana^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

¹ Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

² สาขาวิชาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน (ต่อเนื่อง) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

² Energy Conservation Engineering (Continuing Program), School of Renewable Energy,
Maejo University, Chiang Mai 50290

¹Corresponding author: Tel.: 09-86196155. E-mail address: p.pintana@gmail.com

Abstract

This study aimed to determine the optimal conditions for producing activated carbon from areca spathe via physical steam activation, to enhance the yield and BET surface area of the produced activated carbon. The experiments were designed using the Response Surface Methodology (RSM) with the Box–Behnken Design (BBD) under three main factors: activation temperature (700–900 °C), activation time (1–3 h), and steam flow rate (50–100 cm³/min). The results showed that activation temperature and time significantly influenced the characteristics of the activated carbon, particularly yield and surface area. Increasing the temperature and activation time improved surface area and pore development but reduced the yield due to carbon structure decomposition. The steam flow rate had less influence; however, excessively high values led to material degradation and ash formation. From the mathematical model and experimental results, the optimal conditions were found to be 800 °C, two hours, and a steam flow rate of 50 cm³/min, yielding approximately 60% and achieving a maximum BET surface area of 652.97 m²/g. These values are consistent with the standard range for biomass-based activated carbon and are suitable for adsorption and environmental treatment applications. Moreover, the process does not involve chemical agents, making it environmentally friendly.

Keywords: Activated Carbon, Physical Activation, Yield, BET Surface Area, Areca Spathe

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบหมากด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ เพื่อเพิ่มผลผลิต (Yield) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) แบบ Box-Behnken Design (BBD) ภายใต้ตัวแปรสำคัญ 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ 700–900 °C เวลา 1–3 h และอัตราการไหลของไอน้ำ 50–100 cm³/min ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและเวลาการกระตุ้น เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะค่าพื้นที่ผิวและผลผลิต การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาช่วยเพิ่มค่าพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ แต่ทำให้ผลผลิตลดลงเนื่องจากการสลายโครงสร้างคาร์บอน ส่วนอัตราการไหลของไอน้ำมีผลน้อยกว่า แต่หากสูงเกินไปจะทำให้ถ่านสลายตัวเป็นเถ้า จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิ 800 °C เวลา 2 ชั่วโมง และอัตราการไหลของไอน้ำ 50 ตารางเซนติเมตรต่อนาที ซึ่งให้ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 60% และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 652.97 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของถ่านกัมมันต์จากชีวมวล และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานดูดซับและบำบัดสิ่งแวดล้อม ทั้งยังเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้สารเคมี จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ การกระตุ้นทางกายภาพ ผลผลิต พื้นที่ผิวจำเพาะ กาบหมาก

บทนำ

ในปัจจุบันแนวทางการส่งเสริมให้ชุมชนมีส่วนร่วมในการผลิตและการใช้พลังงานทดแทนนั้นมีอยู่มากมายหลายประเภท เช่น การผลิตถ่านจากชีวมวล การผลิตพืชพลังงาน การผลิตเตาชีวมวล การผลิตจานกาบหมากทดแทนการใช้โฟมและพลาสติก และอีกมากมายหลากหลายการผลิต เป็นต้น [1] จากการศึกษา รวบรวม และสำรวจข้อมูล พบว่ามีเครือข่ายรัฐวิสาหกิจชุมชนการผลิตจานกาบหมากหลายแห่งทั่วประเทศ อีกทั้งมีแหล่งเพาะปลูกหมากที่มาก จากสถิติของกรมส่งเสริมการเกษตร ในปี 2558 พบว่าประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกหมากมากกว่า 36,489,600 m² โดยส่วนใหญ่อยู่ในจังหวัดทางภาคใต้ และมีมูลค่าการส่งออกหมากแห้งไปยังต่างประเทศมากกว่า 1.04 B เพิ่มขึ้นจากปี 2557 สูงถึง 255.01 M และจากแหล่งเพาะปลูกที่ใหญ่ที่สุดในภาคเหนือ นั่นก็คือ หมู่บ้านเป็งเค็ง อำเภออุ้มผาง จังหวัดตาก ซึ่งเป็นแหล่งผลิตหมากส่งออกประเทศสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมาร์หรือพม่าสูงสุด เป็นต้น และเพื่อแก้ปัญหาเศษวัสดุจากกาบหมากคงเหลือที่มากจากกระบวนการผลิตจานกาบหมาก จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำวัสดุนี้มาเพิ่มมูลค่าและสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ให้กับวิสาหกิจชุมชน ช่วยในเรื่องการทำให้เศษวัสดุเป็นศูนย์ (Zero waste) เป็นการใช้ประโยชน์จากกาบหมากให้คุ้มค่าทั้งด้านต้นทุนและการขนส่ง เป็นแนวทางการส่งเสริมก่อให้เกิดรายได้แก่เกษตรกรและวิสาหกิจชุมชนเพิ่มขึ้นได้ในอนาคต ช่วยส่งเสริมพืชทางเลือกใหม่ในการเพาะปลูกและเพิ่มรายได้ในภาคพื้นเกษตรกรรมของไทยได้ [2]

ในอดีตมีการพัฒนาและใช้งานเตาผลิตถ่านประเภทดั้งเดิมอยู่แล้ว เช่น เตาถังขนาด 200 L เตาดิน เตาอิฐถาวร เतालาน หรือเตาแบบปิด มักมีการสูญเสียความร้อนสูง ทำให้ไม้ไม่ถูกแปรสภาพเป็นถ่านอย่างสมบูรณ์ เกิดการเผาไหม้ไม่ทั่วถึง เตาเหล่านี้มักมีประสิทธิภาพต่ำ การกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ถ่านที่ได้มีคุณภาพไม่คงที่ บางส่วนกลายเป็นเถ้า ขณะที่บางส่วนยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ได้ผลผลิตน้อย ใช้ระยะเวลาสั้นเปลืองเชื้อเพลิง และต้องใช้แรงงานเฝ้าเตาอย่างต่อเนื่อง เตาแบบเปิดหรือเตาที่ไม่มีระบบจัดการก๊าซ จะปล่อยควันดำที่มีสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) และเขม่าคาร์บอนสู่สิ่งแวดล้อม ปัจจุบันมีการพัฒนาเตารูปแบบใหม่หลากหลายรูปแบบ เช่น เตาเผาถ่านไร้

ควัน หรือเตาเผาแบบต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มผลผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดของการใช้เทคโนโลยีดังกล่าว ใช้งานยาวรวมไปถึงผลิตแล้วไม่สามารถตรวจวัดคุณภาพของถ่านได้เอง ซึ่งถ่านไม้ในปัจจุบันถูกนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ไม่เพียงแต่เป็นเชื้อเพลิงในภาคครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็กเท่านั้น แต่ยังรวมถึงธุรกิจที่ต้องการถ่านคุณภาพสูงสู่การผลิตถ่านกัมมันต์ ให้ความร้อนรุกรุน สารระเหยต่ำ และประสิทธิภาพการดูดซับสูง

ถ่านกัมมันต์ (Activated Charcoal) คือ ถ่านที่ผ่านกระบวนการพิเศษเพื่อให้มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี ทำให้ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลากหลาย ทั้งในทางการแพทย์ การบำบัดน้ำเสีย การกรองอากาศ และอื่น ๆ [3] กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ ประกอบไปด้วย 2 กระบวนการ คือ การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) การนำถ่านที่ผ่านการเผาไหม้ในสภาพอ็อกซิเจนหรือจำกัดอากาศทำให้มีออกซิเจนน้อยมากระตุ้นโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หรือไอน้ำที่มีอุณหภูมิกระตุ้น (Activation temperature) ประมาณ 600-950°C การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation) การเปลี่ยนวัตถุดิบโดยใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 550-950°C [4-5] ถ่านกัมมันต์ผลิตจากวัสดุคาร์บอน เช่น ถ่านหิน กะลามะพร้าว หรือไม้ไผ่ โดยผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนหรือสารเคมี เพื่อสร้างรูพรุนจำนวนมาก ถ่านที่เผาอย่างสมบูรณ์จะมีค่าคาร์บอนคงที่สูง ถ่านจากชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียน หากผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือของเสียจากธุรกิจวิสาหกิจชุมชน จะช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลการใช้ถ่านหิน และลดปริมาณของเสียทางชีวภาพ เป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ทางเลือกใหม่สำหรับธุรกิจและผู้บริโภค นอกจากนี้การเตรียมถ่านก่อนกระตุ้นสำคัญมาก หากควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต จะสามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดซับที่ผิวสูง รูพรุนจำนวนมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวมากสำหรับการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับ ดูดซับสารต่าง ๆ ได้ทั้งของเหลวและก๊าซ เช่น สารพิษ กลิ่น สี ส่งเสริมระบบนิเวศอย่างยั่งยืน ช่วยลดภาวะโลกร้อน

แต่ปัญหาของการผลิตถ่านชาร์ การขาดองค์ความรู้และการถ่ายทอดเทคโนโลยี หลายพื้นที่ยังขาดความรู้ในการผลิตถ่านชาร์ที่เหมาะสมกับการผลิตถ่านกัมมันต์ ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ยังขาดระบบรับรองคุณภาพที่เป็นสากล ในบางประเทศ ทำให้การนำไปใช้อย่างเป็นทางการหรือเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด การรับรองมาตรฐานต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องพัฒนาการผลิตถ่านชาร์ให้เหมาะสมกับการนำไปผลิตถ่านกัมมันต์ การนำปัญหาข้อบกพร่องและข้อดีต่าง ๆ มาพัฒนาให้ใช้ทั้งในเชิงพลังงาน การบำบัดน้ำเสีย การกรองน้ำ การกรองอากาศ และอื่น ๆ โดยพัฒนาเตาที่มีการควบคุมอุณหภูมิได้ดีและมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง จะช่วยให้ได้ถ่านชาร์ที่มีค่าคาร์บอนคงที่และค่ารูพรุนสูงก่อนนำไปกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถตอบโจทย์ต่อความต้องการของตลาดปัจจุบัน ลดการใช้สารเคมี และการใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมไปถึงการนำขยะ (Waste) ที่เหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปให้เพิ่มมูลค่าเป็นผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบหมากด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ เพื่อศึกษาผลผลิต (Yield) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์ที่ได้ โดยการออกแบบสภาวะการผลิต ประกอบด้วย อุณหภูมิการกระตุ้น ระยะเวลา และอัตราการไหลของไอน้ำกระตุ้น เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง มีค่ารูพรุนพัฒนาอย่างเหมาะสม และมีสมบัติการดูดซับตามเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งนี้เพื่อประเมินความเหมาะสมของวัสดุในการประยุกต์ใช้ด้านการดูดซับมลพิษ การกรอง และการใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมในอนาคต รวมถึงเป็นแนวทางสนับสนุนการพัฒนาและต่อยอดผลผลิตแบบไม่ใช้สารเคมี

วิธีการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ได้ออกแบบระเบียบวิธีวิจัยและวิธีการดำเนินการอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริง การศึกษามีเป้าหมายหลัก เพื่อพัฒนาถ่านชาร์จากกากหมากให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะการเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุน ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การศึกษากระบวนการคาร์บอนในเซชัน งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเตรียมวัสดุก่อนการกระตุ้นทางกายภาพในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของเตาผลิตถ่านชาร์ขนาด 50 L ที่เน้นการควบคุมการเผาไหม้และการกระจายอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ ใช้กากหมาก (*Areca catechu L.*) เป็นวัตถุดิบชีวมวล ตัวแปรสำคัญในการทดลอง ได้แก่ ขนาดรูห้องเผาไหม้ 3.18 mm ระยะเวลา 180 min และปริมาณเชื้อเพลิง 3.5 kg ผลการทดลองและการจำลองด้วย Design Expert วิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) พบว่าสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะเหมาะสมที่สุดของกระบวนการผลิต ผลผลิตถ่านชาร์มีพื้นที่ผิวสูงสุด (BET) 108.61 m²/g ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 9.43 และผลผลิต (Yield) เท่ากับ 29.80% เตาถ่านชาร์ที่พัฒนาขึ้นช่วยลดปัญหาการกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอและการไหลเวียนอากาศไม่คงที่ ทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงขึ้น คุ่มค่าทางเศรษฐกิจ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และถือเป็นขั้นตอนแรกในการเตรียมวัสดุก่อนนำไปผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง

2. การออกแบบการทดลองการผลิตถ่านกัมมันต์ การศึกษาครั้งนี้มุ่งวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเน้นการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) แทนการใช้สารเคมี (Chemical Activation) เพื่อพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน งานวิจัยนี้ต่อยอดองค์ความรู้เดิม สร้างนวัตกรรมและเทคนิคการผลิตถ่านกัมมันต์รูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และช่วยประหยัดพลังงานตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ การออกแบบการทดลองการกระตุ้นถ่านกัมมันต์และการวิเคราะห์ทางสถิติได้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Design Expert (เวอร์ชัน 2013) โดยอ้างอิงหลักการของวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) ใช้แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ข้อมูลการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับปัจจัยอิสระทั้งสาม ได้แก่ อุณหภูมิ (700–900 °C) เวลา (1–3 h) และอัตราการไหลของไอน้ำ (50–100 cm³/min) กำหนดให้แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ศึกษาในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

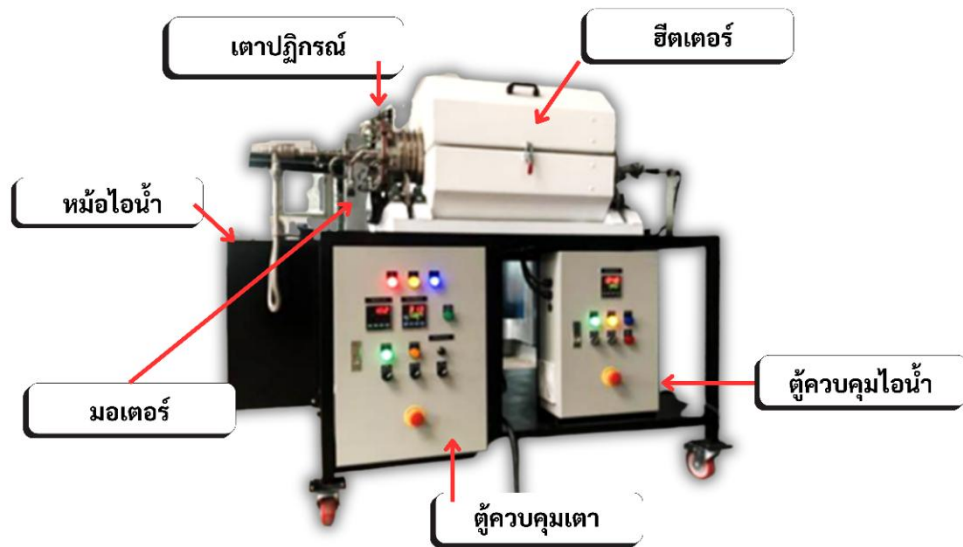
Factors		Level		
		-1	0	+1
อุณหภูมิ (°C)	(A)	700	800	900
เวลา (h)	(B)	1	2	3
อัตราการไหลของไอน้ำ (cm ³ /min)	(C)	50	75	100

แบบจำลองการถดถอยพิจารณาผลกระทบของตัวแปรหลายตัว รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลกระทบลำดับสูง ตามที่แสดงในสมการที่ 1 การออกแบบนี้ทำให้สามารถประเมินทั้งผลกระทบหลัก (Main effects) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interactions between factors) ได้ โดยที่ Y คือ ตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม (dependent variable) ที่ต้องการพยากรณ์หรืออธิบาย β_0 คือ ค่าคงที่ (Constant term) แทนค่าของ Y เมื่อค่าของตัวแปรอิสระทั้งหมดเป็นศูนย์ A, B, C คือ ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง Y และ $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) แสดงผลกระทบของตัวแปรอิสระ A, B, และ C ตามลำดับ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 \quad (1)$$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการผลิตถ่านกัมมันต์ ปริมาณถ่านกัมมันต์ คำนวณหาปริมาณถ่านกัมมันต์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2 โดยที่ Y_{AC} คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ (%wt) w_{af} คือ น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g) และ w_{be} คือ น้ำหนักวัสดุเริ่มต้น (g)

$$Y_{AC} = \frac{w_{be}}{w_{af}} \times 100 \quad (2)$$



ภาพที่ 1 เครื่องผลิตถ่านกัมมันต์

3. เครื่องผลิตถ่านกัมมันต์ ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่ เตาปฏิกรณ์ ฮีตเตอร์ หม้อไอน้ำ มอเตอร์ และตู้ควบคุม โดยเตาปฏิกรณ์ (Reactor) ใช้สำหรับบรรจุถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสหรือการคาร์บอนไนเซชันแล้ว ภายในเตาติดตั้งฮีตเตอร์ (Heater) ที่ฝังอยู่ด้านบน พร้อมฉนวนกันความร้อนเพื่อลดการสูญเสียพลังงานระหว่างการทำงาน ส่วนของมอเตอร์ (Motor) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนให้เตาปฏิกรณ์หมุน เพื่อให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ หม้อไอน้ำ (Boiler) ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบกระตุ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์และตู้ควบคุม (Control Panel) ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิ อัตราการจ่ายไอน้ำ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา โดยทั้งหมดถูกติดตั้งและทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบดังแสดงในภาพที่ 1 ในการทดลองการผลิตถ่านกัมมันต์จะทำการทดสอบตามการออกแบบการทดลองโปรแกรม Design Expert ทั้งหมด 17 Run

4. การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน การวิเคราะห์พื้นที่ผิวดำเนินการโดยใช้วิธีฟิสิซอร์ปชัน (Physisorption method) โดยช่วงของ P/P_0 อยู่ระหว่าง 0.05–0.3 และเก็บข้อมูล 80–100 จุด โดยใช้วิธี BET (Brunauer–Emmett–Teller) การวิเคราะห์นี้ใช้เครื่อง ASAP 2460 (Micromeritics, USA) เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุน

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตัวแปรตอบสนองสำหรับผลผลิต (Yield)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) ตัวแปรตอบสนอง ผลผลิต (Yield) พบว่าค่า F-value ของแบบจำลอง (Model F-value) เท่ากับ 12.53 หมายความว่าแบบจำลองมีความมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีโอกาสเพียง 0.15% ที่ค่า F-value ขนาดนี้จะเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน (Noise) ค่า P-value ที่น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรในแบบจำลองมีนัยสำคัญ ในกรณีนี้ตัวแปร A-อุณหภูมิ และ B-เวลา เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญ ขณะที่ค่าที่มากกว่า 0.1000 แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีนัยสำคัญ หากมีตัวแปรในแบบจำลองหลายตัวที่ไม่มีนัยสำคัญ ไม่นับตัวแปรที่จำเป็นเพื่อรักษาลำดับชั้นของโมเดล การลดจำนวนตัวแปรอาจช่วยปรับปรุงแบบจำลองให้ดีขึ้น ค่า Lack of Fit F-value เท่ากับ 2.13 หมายความว่า Lack of Fit ไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับความผิดพลาดบริสุทธิ์ (Pure error) โดยมีโอกาส 23.93% ที่ค่า Lack of Fit F-value ขนาดนี้จะเกิดจากสัญญาณรบกวน การที่ Lack of Fit ไม่มีนัยสำคัญถือเป็นผลดี เพราะแสดงว่าแบบจำลองสามารถพอดีกับข้อมูลทดลองได้ดี ดังแสดงในตารางที่ 2

ค่า Predicted $R^2 = 0.3896$ ไม่น่าพอใจเท่ากับค่า Adjusted $R^2 = 0.8664$ อย่างที่ควรจะเป็น กล่าวคือความแตกต่างระหว่างค่าสองตัวนี้มากกว่า 0.2 ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงผลกระทบของบล็อกขนาดใหญ่ (Large block effect) หรือปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับแบบจำลองหรือข้อมูลการทดลอง สิ่งที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การลดความซับซ้อนของแบบจำลอง (Model reduction) การแปลงตัวแปรตอบสนอง (Response transformation) การตรวจสอบค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นต้น โดยทั่วไป แบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical models) ทุกแบบควรมีการทดสอบยืนยันผลลัพท์ด้วยการทดลองยืนยัน (Confirmation runs) ค่า Adeq Precision ใช้วัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) โดยค่าที่มากกว่า 4 ถือว่ามีสัญญาณเพียงพอ ในกรณีนี้ ค่า Adeq Precision = 12.739 แสดงว่ามีสัญญาณเพียงพอ ทำให้แบบจำลองนี้สามารถใช้สำรวจพื้นที่การออกแบบ (Design space) ได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3 แบบจำลองนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ และช่วยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรสำคัญ เช่น อุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้น เพื่อเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของถ่านกัมมันต์ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) ตัวแปรตอบสนองผลผลิต (Yield)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	9618.28	9	1068.70	12.53	0.0015	significant
A-Temperature	8001.12	1	8001.12	93.78	< 0.0001	
B-Time	1458.00	1	1458.00	17.09	0.0044	
C-Vapor flow rate	3.13	1	3.13	0.0366	0.8537	
AB	16.00	1	16.00	0.1875	0.6780	
AC	6.25	1	6.25	0.0733	0.7945	
BC	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
A ²	41.12	1	41.12	0.4819	0.5099	
B ²	41.12	1	41.12	0.4819	0.5099	

C ²	55.33	1	55.33	0.6485	0.4471	
Residual	597.25	7	85.32			
Lack of Fit	367.25	3	122.42	2.13	0.2393	not significant
Pure Error	230.00	4	57.50			
Cor Total	10215.53	16				

ตารางที่ 3 สถิติที่ใช้ประเมินความสอดคล้องสำหรับผลผลิต (Yield)

Std. Dev.	9.24	R ²	0.9415
Mean	41.29	Adjusted R ²	0.8664
C.V. %	22.37	Predicted R ²	0.3896
		Adeq Precision	12.7392

ผลสมการในรูปของตัวแปรที่เข้ารหัส (Coded factors) สามารถใช้ในการพยากรณ์ค่าตัวแปรตอบสนองสำหรับระดับที่กำหนดของแต่ละปัจจัย โดยค่าเริ่มต้นระดับสูงของตัวแปรจะถูกเข้ารหัสเป็น +1 และระดับต่ำถูกเข้ารหัสเป็น -1 สมการที่เข้ารหัสนี้มีประโยชน์ในการประเมิน ผลกระทบสัมพัทธ์ของตัวแปรปัจจัย เพราะสามารถเปรียบเทียบค่าของสัมประสิทธิ์แต่ละตัวแปรได้โดยตรง สมการชี้ว่าอุณหภูมิมีผลกระทบมากที่สุดต่อผลผลิต การเพิ่มอัตราการไหลของไอน้ำมีผลน้อย แต่ยังสามารถปรับเล็กน้อยร่วมกับอุณหภูมิได้ ผลผลิตมี Non-linear response ต่อทุกตัวแปร (Quadratic terms) ซึ่งบ่งชี้ว่ามีจุดสูงสุดของผลผลิตในช่วงตัวแปรบางช่วง แสดงดังสมการที่ 3

$$Y_{\text{Physical Activation}} = + 43 - 31.62(A_1) - 13.50(B_2) + 0.625(C_3) - 2.00(A_1B_2) \quad (3)$$

$$+ 1.25(A_1C_3) - 0.00(B_2C_3) - 3.13A_1^2 + 3.12B_2^2 - 3.62C_3^2$$

การที่ตัวแปรหลักมีอุณหภูมิและเวลาเป็นปัจจัยสำคัญสอดคล้องกับความรู้พื้นฐานของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาในการไพโรไลซิสและกระตุ้นมีผลโดยตรงต่อการสลายสารอินทรีย์และการพัฒนารูพรุน ส่วนอัตราการไหลของไอน้ำไม่มีนัยสำคัญในช่วงค่าที่ศึกษา อาจเนื่องจากค่าที่ใช้มีผลจำกัดต่อการเกิดปฏิกิริยากับวัสดุ ซึ่งโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลทดลองได้ดี (R² สูง) แต่ความสามารถพยากรณ์ข้อมูลใหม่ยังต่ำ (Predicted R² ต่ำ) หากในอนาคตจะนำไปใช้งาน แนะนำให้ลดความซับซ้อนของโมเดล เพื่อยืนยันความถูกต้องของโมเดล การปรับปรุงเหล่านี้จะช่วยให้ Predicted R² สูงขึ้น ทำให้โมเดลเชื่อถือได้ทั้งสำหรับการอธิบายและพยากรณ์ผลผลิตในชีวิตจริงอื่นที่จะนำมาศึกษาต่อ

2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตัวแปรตอบสนองสำหรับพื้นที่ผิว (BET)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) ตัวแปรตอบสนองพื้นที่ผิว (BET) ข้อมูลเหล่านี้ถูกยกเว้นในการวิเคราะห์นี้ Run 14, 7, 6 เนื่องจากการทดลองที่อุณหภูมิ 900°C ตัวอย่างเกิดการสลายตัวของถ่านกัมมันต์จนกลายเป็นเถ้า จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลพื้นที่ผิวและรูพรุนได้

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) ตัวแปรตอบสนองพื้นที่ผิว (BET)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1.035E+05	9	11503.45	13.94	0.0110	significant
A-Temperature	6388.08	1	6388.08	7.74	0.0497	
B-Time	10061.09	1	10061.09	12.20	0.0251	
C-Vapor flow rate	6257.60	1	6257.60	7.59	0.0512	
AB	10213.58	1	10213.58	12.38	0.0245	
AC	1921.54	1	1921.54	2.33	0.2017	
BC	2477.55	1	2477.55	3.00	0.1581	
A ²	53074.61	1	53074.61	64.34	0.0013	
B ²	4478.08	1	4478.08	5.43	0.0803	
C ²	1598.28	1	1598.28	1.94	0.2363	
Pure Error	3299.74	4	824.94			
Cor Total	1.068E+05	13				

โดยที่ค่า Model F-value = 13.94 หมายความว่าแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีโอกาสเพียง 1.10% ที่ค่า F-value ขนาดนี้จะเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน ค่า P-value ที่น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรในแบบจำลองมีนัยสำคัญ ในกรณีนี้ตัวแปร A-อุณหภูมิ, B-เวลา, AB-อุณหภูมิและเวลา, และ A²-เทอมกำลังสองของตัวแปรอุณหภูมิ เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญ ขณะที่ค่าที่มากกว่า 0.1000 แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีนัยสำคัญ หากมีตัวแปรในแบบจำลองหลายตัวที่ไม่มีนัยสำคัญ ไม่นับตัวแปรที่จำเป็นเพื่อรักษาลำดับขั้นของโมเดล การลดจำนวนตัวแปรอาจช่วยปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองได้ ดังแสดงในตารางที่ 4 ค่า Adeq Precision ใช้วัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) โดยค่าที่มากกว่า 4 ถือว่ามีสัญญาณเพียงพอ ในกรณีนี้ ค่า Adeq Precision = 11.231 แสดงว่ามีสัญญาณเพียงพอ ทำให้สามารถใช้แบบจำลองนี้เพื่อสำรวจพื้นที่การออกแบบ (Design space) ได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สถิติที่ใช้ประเมินความสอดคล้องสำหรับพื้นที่ผิวและรูพรุน (BET)

Std. Dev.	28.72	R ²	0.9691
Mean	520.53	Adjusted R ²	0.8996
C.V. %	5.52	Predicted R ²	NA ⁽¹⁾
		Adeq Precision	11.2312

⁽¹⁾ กรณีที่มี leverage = 1.0000: ค่า Predicted R² และสถิติ PRESS ไม่สามารถกำหนดได้

สมการในรูปของตัวแปรที่เข้ารหัส (Coded factors) สามารถใช้ในการพยากรณ์ค่าตัวแปรตอบสนองสำหรับระดับที่กำหนดของแต่ละปัจจัย โดยค่าเริ่มต้นระดับสูงของตัวแปรจะถูกเข้ารหัสเป็น +1 และระดับต่ำถูกเข้ารหัสเป็น -1 สมการที่เข้ารหัสนี้มีประโยชน์ในการประเมิน ผลกระทบสัมพัทธ์ของตัวแปรปัจจัย เพราะสามารถเปรียบเทียบค่าของสัมประสิทธิ์แต่ละตัวแปรได้โดยตรง สมการนี้ช่วยให้พยากรณ์พื้นที่ผิวได้ตามระดับตัวแปรที่กำหนด และยังชี้ให้เห็นตัวแปร

ที่สำคัญที่สุดต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังสมการที่ 4 แบบจำลอง Quadratic สำหรับพื้นที่ผิว เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงและวิเคราะห์ผลผลิตพื้นที่ผิว และรูพรุน แต่ต้องระวังช่วงอุณหภูมิสูงที่ทำให้ถ่านสลายตัวและควรยืนยันผลด้วยการทดลองเพิ่มเติมสำหรับชีวมวลอื่น ๆ

$$Y_{\text{BET Surface Area}} = + 602.74 - 69.22(A_1) - 50.15(B_2) - 39.55(C_3) - 87.52(A_1B_2) - 37.96(A_1C_3) + 24.89(B_2C_3) - 213.96A_1^2 - 40.29B_2^2 - 24.07C_3^2 \quad (4)$$

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกาบหมาก

ผลของการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ ประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลา และอัตราการไหลของไอน้ำในการกระตุ้น พบว่าโมเดลพื้นผิวการตอบสนองสามมิติของอุณหภูมิต่อผลผลิตและพื้นที่ผิวรูพรุน ดังแสดงในตารางที่ 6 และภาพที่ 2 การเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 °C เป็น 800 °C ทำให้ผลผลิตลดลงจาก 80% เป็น 55% เนื่องจากคาร์บอนสูญเสียมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวรูพรุนเพิ่มจาก 380.34 เป็น 652.97 m²/g แสดงว่าอุณหภูมิสูงช่วยพัฒนารูพรุน การเพิ่มเวลา 1–2 h ช่วยให้รูพรุนและพื้นที่ผิวสูงขึ้น (591.12–630.27 m²/g) แต่เวลานานเกิน 3 h ทำให้ผลผลิตลดลงเหลือ 20% หรือต่ำสุดจนเหลือเพียง 2% เพราะโครงสร้างถูกกัดกร่อน อัตราการไหลของไอน้ำต่ำทำให้ผลผลิตสูงแต่พื้นที่ผิวน้อย ขณะที่อัตราสูงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว แต่สูงเกินไปร่วมกับอุณหภูมิสูงทำให้ถ่านสลายเป็นเถ้า ปัจจัยสำคัญที่สุดคืออุณหภูมิ รองลงมาคือเวลาและอัตราการไหลของไอน้ำ สภาวะเหมาะสมคือ 800 °C เวลา 2 h และอัตราการไหล 50 cm³/min ให้ผลผลิตประมาณ 60% และพื้นที่ผิวสูงสุด 652.97 m²/g เป็นสภาวะเหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่สมดุลระหว่างการรักษามวลคาร์บอนและการพัฒนารูพรุน การทดลองบางจุดที่อุณหภูมิและอัตราการไหลสูงเกินไปทำให้ ถ่านสลายเป็นเถ้า ทำให้ข้อมูลสูญหาย ผลของอัตราการไหลของไอน้ำ แม้มีแนวโน้มเพิ่มพื้นที่ผิว แต่ก็ยังไม่ชัดเจนจะต้องมีการทำซ้ำหรือขยายช่วงทดสอบเพื่อยืนยันเพิ่มเติม อีกทั้งข้อมูลยังเป็นการศึกษาในระดับเล็ก (Lab scale) การสรุปเชิงปริมาณในเชิงอุตสาหกรรมอาจต้องปรับค่าพารามิเตอร์อีก งานวิจัยนี้ให้เห็นแนวทางที่ชัดเจนและใช้ได้จริงสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง แต่ต้องระวังอุณหภูมิและอัตราการไหลสูงเกินไป และควรยืนยันผลด้วยการทดลองเพิ่มเติม

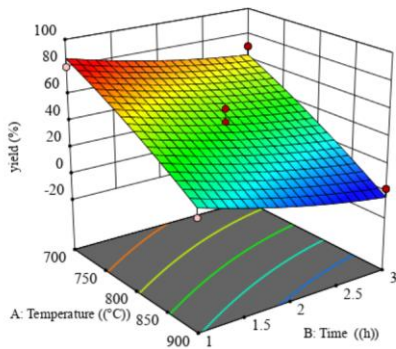
จากการรวบรวมงานวิจัยหลายฉบับ พบว่าการกระตุ้นทางกายภาพยังคงเป็นกระบวนการหลักในเชิงพาณิชย์ เช่นกัน เนื่องจากเป็นวิธี 2 ขั้นตอนที่ไม่ใช้สารเคมี การคาร์บอนเซชัน ในสภาวะบรรยากาศก๊าซเฉื่อยประเภทต่าง ๆ และการกระตุ้นในก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ หรือก๊าซ CO₂ ที่อุณหภูมิ 800–1100 °C ทำให้ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างพรุนดี พื้นที่ผิวสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5] การใช้วิธีพื้นผิวการตอบสนอง (RSM) กับกระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ให้ผลพื้นที่ผิว 473 m²/g และผลผลิต 54% [6] ซึ่งเป็นผลลัพธ์ดีในระดับห้องปฏิบัติการ แต่ยังคงต้องประเมินการใช้งานจริงและต้นทุนหรือการผลิตการใช้วัสดุเหลือทิ้ง เช่น เปลือกพิสตาชิโอ เมล็ดอินทผาลัม กิ่งพืช ก้านหรือต้นข้าวโพด สามารถให้ พื้นที่ผิว 350–789 m²/g และผลผลิตสูง 65–83% [7–9] แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้ชีวมวลเหลือทิ้งผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพดี แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะการผลิตเพื่อให้ชีวมวลดังกล่าวเกิดประโยชน์สูงสุด สภาวะการกระตุ้นด้วยก๊าซ CO₂ มักให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าไอน้ำ เช่น ฟางข้าวบาร์เลย์ให้ผลพื้นที่ผิว 789 m²/g สำหรับก๊าซ CO₂ และ 552 m²/g สำหรับไอน้ำ [9]

ตารางที่ 6 ผลการทดลองการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำต่อค่าผลผลิต (Yield) และค่าพื้นที่ผิว (BET) ของถ่านกัมมันต์

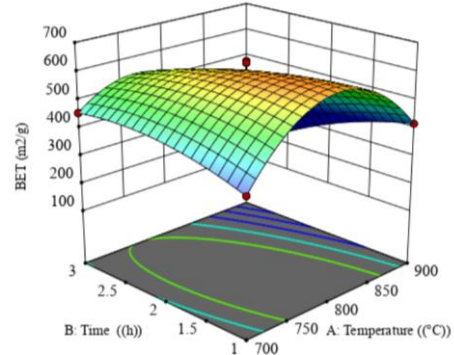
Std.	Run	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (h)	อัตราการไหลของไอน้ำ (cm ³ /min)	Yield (%)	BET (m ² /g)
1	1	700	1	75	80	380.34
14	2	800	2	75	55	571.51
10	3	800	3	50	20	502.89
16	4	800	2	75	35	636.03
11	5	800	1	100	65	524.09
8	6	900	2	100	5	-
6	7	900	2	50	5	-
2	8	900	1	75	20	416.95
12	9	800	3	100	25	473.56
9	10	800	1	50	60	652.97
7	11	700	2	100	65	432.34
5	12	700	2	50	70	435.52
17	13	800	2	75	45	630.27
4	14	900	3	75	2	-
15	15	800	2	75	40	591.12
3	16	700	3	75	70	455.08
13	17	800	2	75	40	584.76

ถ่านกัมมันต์จากแกลบด้วยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO₂ ให้พื้นที่ผิวสูงสุด 502 m²/g และรูพรุนขนาดหลากหลาย ผลชี้ชัดว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญ สำหรับการพัฒนาพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุน [10] เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ ส่วนการกระตุ้นทางกายภาพโดยปรับสัดส่วนไอน้ำ การเพิ่มสัดส่วนไอน้ำทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นจากถ่านชาร์ 89 m²/g เป็นถ่านกัมมันต์ 653 m²/g (ไอน้ำ) [11] นอกจากนี้ตัวแปรดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าการใช้แรงดันหรือความดันภายในห้องกระตุ้นสูงกว่าบรรยากาศ จะช่วยให้สารกระตุ้นเข้าปฏิกิริยากับคาร์บอนได้ดียิ่งขึ้น ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวม [12] ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเศษไม้และกะลาผลไม้มีพื้นที่ผิว 308–367 m²/g และเหมาะกับการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี [13–14] การใช้ RSM กับการออกแบบการทดลองแบบ BBD สำหรับถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดปาล์มสามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมเพื่อดูดซับ CO₂ ได้ 2.13 mg/g ที่อุณหภูมิ 850 °C เวลา 60 min และผลผลิต 25.15 %wt [15] ถ่านกัมมันต์จากกะลามะเขาค้อนด้วยคาร์บอนในเขชัน 500 °C เวลา 90 min และกระตุ้นด้วยไอน้ำ 800 °C เวลา 60 min ได้ผลผลิต 68.81% พื้นที่ผิว 1,245.76 m²/g และสมบัติใกล้เคียงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ [16] ความแตกต่างระหว่างผลผลิต (Yield) กับพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ของถ่านกัมมันต์เกิดจากลักษณะของกระบวนการผลิตและกลไกทางเคมี-กายภาพที่เกี่ยวข้อง คือปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ได้เทียบกับวัสดุต้นกำเนิด ชีวมวลแต่ละชนิดมีโครงสร้างเซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสต่างกัน จะเกิดผลผลิตสูงสุดเมื่อการสูญเสียคาร์บอนและสารระเหยต่ำ การคาร์บอนในเซ

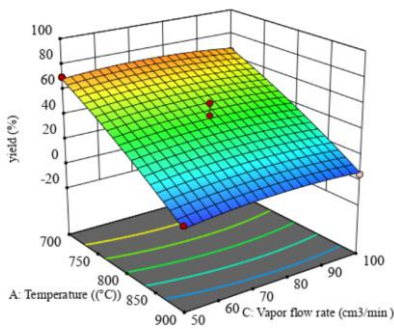
ชั้นหรือการกระตุ้นที่มากเกินไป อุณหภูมิสูง เวลานาน มักทำให้ผลผลิตลดลง เพราะวัสดุถูกเผาไหม้หรือสลายเป็นก๊าซ ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะแสดงถึงจำนวนพื้นที่ผิวที่พร้อมสำหรับการดูดซับจะสูงขึ้น เมื่อเกิดการสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) การเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาการกระตุ้นมากขึ้นจะช่วยเปิดรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิวสูงขึ้น แม้ผลผลิตจะลดลง ดังนั้น การปรับสภาวะการกระตุ้นต้องหาจุดสมดุล เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ทั้งพื้นที่ผิวสูงและผลผลิตดี ซึ่งมวลแต่ละชนิดมีโครงสร้างทางกายภาพและเคมีเฉพาะ ส่งผลต่อการสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจึงแตกต่างกัน แม้กระบวนการผลิตเหมือนกันการปรับอุณหภูมิ เวลา และชนิดตัวกระตุ้น สามารถปรับเงื่อนไขการทดสอบให้เหมาะสมกับวัสดุแต่ละชนิดได้



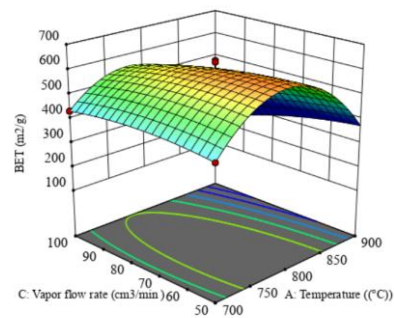
Yield-AB



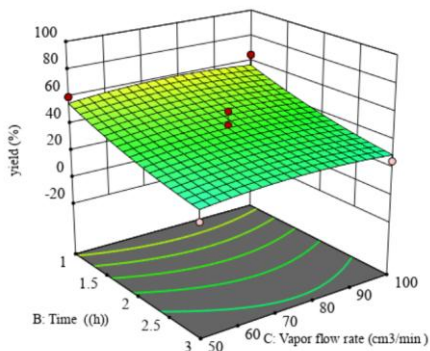
BET-AB



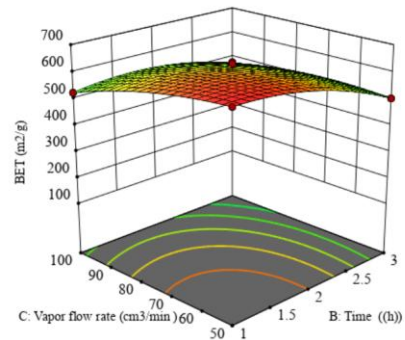
Yield-AC



BET-AC



Yield-BC



BET-BC

ภาพที่ 2 โมเดลพื้นผิวการตอบสนองสามมิติของผลผลิตและพื้นที่ผิวในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากหมาก (Yield-AB และ BET-AB) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลา (Yield-AC และ BET-AC) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอน้ำ และ (Yield-BC และ BET-BC) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา และอัตราการไหลของไอน้ำ

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากหมากโดยใช้กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ เพื่อเพิ่มผลผลิต (Yield) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (RSM) แบบ Box-Behnken Design (BBD) ภายใต้ตัวแปร 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ 700–900 °C เวลา 1–3 h อัตราการไหลของไอน้ำ 50–100 cm³/min ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิและเวลาการกระตุ้น มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะค่าพื้นที่ผิวและผลผลิต การเพิ่มอุณหภูมิและเวลา ช่วยเพิ่มค่าพื้นที่ผิวและรูพรุน แต่ทำให้ผลผลิตลดลงเนื่องจากการสลายโครงสร้างคาร์บอน อัตราการไหลของไอน้ำมีผลน้อยกว่าปัจจัยอื่น แต่หากสูงเกินไปจะทำให้ถ่านสลายตัวเป็นเถ้า จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คืออุณหภูมิ 800 °C เวลา 2 h และอัตราการไหลของไอน้ำ 50 cm³/min ให้ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 60% และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 652.97 m²/g ค่าพื้นที่ผิวดังกล่าวเป็นไปตามค่ามาตรฐานทั่วไปของถ่านกัมมันต์จากชีวมวล และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานดูดซับและบำบัดสิ่งแวดล้อม ทั้งยังเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้สารเคมีจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ แบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยสามารถใช้ในการทำนายและปรับปรุงกระบวนการผลิตในอนาคต เพื่อเพิ่มคุณภาพและความคุ้มค่าทางพลังงานของถ่านกัมมันต์จากชีวมวลอื่นได้เช่นกัน ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย ควรทำการศึกษาระดับถ่านกัมมันต์ในช่วงตัวแปรที่มีความละเอียดมากขึ้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นและมีผลต่อสมมูลเรื่องปริมาณผลผลิต คุณภาพ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ ทูสนับสนุนงานวิจัยภายใต้โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิต วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนสิ่งอำนวยความสะดวกและงบประมาณการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). *งานพลังงานทดแทน/การอนุรักษ์พลังงาน*. สืบค้นจาก <https://www.dede.go.th/>.
- [2] สถานีวิทยุกระจายเสียงเพื่อการเกษตร. (2556). *เกษตร ขับเคลื่อน BCG Model หนุนวิสาหกิจชุมชนโฮมฮักตาก*. สืบค้นจาก <https://www.am1386.com/>.
- [3] สัมฤทธิ์ ไม้พวง. (2564). ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [4] วาโยฟาร์ม. (2565). *ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) คืออะไร?*. สืบค้นจาก <https://farm.vayo.co.th/>.
- [5] Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393-415.
- [6] Yirdaw, G., Dessie, A., & Birhan, T. A. (2023). Optimization of process variables to prepare activated carbon from Noug (*Guizotia abyssinica* cass.) stalk using response surface methodology. *Heliyon*, 9(6).

- [7] Faramarzi, A. H., Kaghazchi, T., Ebrahim, H. A., & Ebrahimi, A. A. (2015). A mathematical model for prediction of pore size distribution development during activated carbon preparation. **Chemical Engineering Communications**, 202(2), 131-143.
- [8] El-Raie, A. E. S., Abdelbary, K. M., Ismail, N. K., & Amer, M. A. (2016). Production of Activated Carbon from Agricultural Residues. **International Journal of ChemTech Research**, 9(8), 62-69.
- [9] Pallares, J., Gonzalez-Cencerrado, A., & Arauzo, I. (2018). Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. **Biomass and bioenergy**, 115, 64-73.
- [10] Wazir, A. H., Wazir, I. U., & Wazir, A. M. (2020). Preparation and characterization of rice husk based physical activated carbon. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-11.
- [11] Mai, N. T., Nguyen, M. N., Tsubota, T., Nguyen, P. L., & Nguyen, N. H. (2021). Evolution of physico-chemical properties of Dicranopteris linearis-derived activated carbon under various physical activation atmospheres. **Scientific reports**, 11(1), 1-9.
- [12] Yi, H., Nakabayashi, K., Yoon, S. H., & Miyawaki, J. (2021). Pressurized physical activation: A simple production method for activated carbon with a highly developed pore structure. **Carbon**, 183, 735-742.
- [13] Lee, S. M., Choi, S. S., & Tiwari, D. (2017). Simultaneous removal of Hg (II) and phenol using functionalized activated carbon derived from areca nut waste. **Metals**, 7(7), 248.
- [14] Arena, N., Lee, J., & Clift, R. (2016). Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells. **Journal of Cleaner Production**, 125, 68-77.
- [15] Rashidi, N. A., & Yusup, S. (2019). Production of palm kernel shell-based activated carbon by direct physical activation for carbon dioxide adsorption. **Environmental Science and Pollution Research**, 26(33), 33732-33746.
- [16] จตุรภัทร เลิศวิภาภัทร (2554). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะเขาวินโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. Chulalongkorn University Thesis and Dissertations (Chula ETD). 61245.