การผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวที่อุณหภูมิต่ำภายใต้ภาวะจำกัดอากาศสำหรับการดูดซับเมธิลีนบลู

ณรงค์ ชัยสงเคราะห์[1] สุธารวดี สุขะวนวัฒน์[2] เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ[3] ศศิธร สรรพ่อค้า[4*]

[1,2,4]สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย*

[3]ศูนย์วิจัยเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : sasithorn_su@rmutto.ac.th

รับต้นฉบับ: 6 กันยายน 2565; รับบทความฉบับแก้ไข: 22 พฤศจิกายน 2565; ตอบรับบทความ: 24 พฤศจิกายน 2565
เผยแพร่ออนไลน์: 22 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

การใช้ชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากขึ้น เนื่องจากมีราคาถูกและมีปริมาณมาก ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้สามารถใช้ในการกำจัดมลพิษในน้ำได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวจากพื้นที่ในจังหวัดชลบุรี โดยแบ่งการผลิตออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การผลิตถ่านชีวภาพและการผลิตถ่านกัมมันต์ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลามีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากภาวะต่าง ๆ มากระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 4 โมลาร์ และเผาที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ พบว่าชีวภาพที่ผลิตด้วยการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด 1,147.74 ตารางเมตรต่อกรัม และการดูดซับเมทิลีนบลูสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9993

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำได้ รวมถึงมีความเป็นไปได้ในการสร้างเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ที่ไม่ซับซ้อนและต้นทุนไม่สูง สามารถลดการใช้พลังงานได้ และใช้ต้นทุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขายเชิงพาณิชย์ จึงแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการลงทุนหรือต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับการดูดซับมลพิษต่อไป

คำสำคัญ **:** ถ่านกัมมันต์ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร กาบมะพร้าว วิสาหกิจชุมชน

Production of Activated Carbon from Coconut Coir Using Chemical Activation at Low Temperature under Limited Air Condition for Methylene Blue Adsorption

Narong Chaisongkroh[1] Sutarawadee Sukawanawat[2] Benjapon Chalermsinsuwan[3] Sasithorn Sunphorka[4*]

[1,2,4*]*Field of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology, Uthen Thawai Area, Bangkok, Thailand*

[3]*Fuels Research Center, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: sasithorn_su@rmutto.ac.th

Received: 6 September 2022; Revised: 22 November 2022; Accepted: 24 November 2022
Published online: 22 December 2022

Abstract

The use of agricultural biomass as raw material for activated carbon production has been increasing because it is cheap and largely generated amount. The produced activated carbon was useful for remove the pollutants from aqueous media. This work aims to study the effects of temperature and time on the activated carbon production from coconut coir obtained from Chonburi province. The experiments were divided into two stages: (i) biochar production and (ii) activated carbon production. The results revealed that both temperature and operation time had the significant effects on solid yield and surface area of Biochar. After that, the biochar obtained from different conditions were activated by using 4M KOH, 4M H_3PO_4 and 4M H_2SO_4 at the desired temperatures and operating time to produce activated carbon. The results showed that biochar which was produced at 500 ^{o}C and 1 h, then activated by KOH at 200 ^{o}C and 2 h provided the activated carbons with the highest surface area of 1,147.74 m^2/g. In addition, the Methylene Blue adsorption was found to follow the Langmuir isotherm model (R^2 = 0.9993).

The overall experimental results revealed that activated carbon produced from coconut coir could be operated under lower temperature and exhibited opportunity and possibility to design the cheap and uncomplicated kiln. The production energy can be reduced. Moreover, the production cost for activated carbon was presented that it was lower than that of commercial activated carbon. Therefore, it probably had an opportunity for commercial business competition or further development to new products for pollutant adsorption and other proposes.

***Keywords*:** Activated carbon, Agricultural waste, Coconut coir, Community enterprise

1) บทนำ

จากข้อมูลการสำรวจในปี พ.ศ. 2563 [1] ประเทศไทยมีการผลิตมะพร้าว 591,017 ตัน โดยหลังจากแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แล้วเกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทเปลือกมะพร้าวประมาณร้อยละ 33 ซึ่งเป็นปริมาณมากและก่อให้เกิดปัญหาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการกำจัด ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งในการเพิ่มต้นทุนการผลิตด้วย การแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้จึงมีความน่าสนใจโดยเฉพาะการแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับมาใช้เพิ่มผลผลิตทางการเกษตร หรือสร้างรายได้และอาชีพใหม่ ๆ ในชุมชน การแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นถ่านกัมมันต์เป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความสนใจเนื่องจากวิธีการไม่ซับซ้อนมาก [2] ถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวดูดซับของเสียในน้ำ/อากาศ/ดิน ปุ๋ย รวมถึงนำมาผสมอาหารและผลิตภัณฑ์เสริมความงาม เป็นต้น [3], [4] ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมามีการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีต่าง ๆ โดยได้มีผู้รวบรวมการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านชีวภาพซึ่งใช้การกระตุ้นทางเคมีอาทิ การกระตุ้นโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกกับถ่านชีวภาพจากปอแก้ว ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวระหว่าง 289.497 ถึง 346.570 ตารางเมตรต่อกรัม การกระตุ้นโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านชีวภาพจากไม้ ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสทำให้เกิดถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 932 ตารางเมตรต่อกรัม [5] หรือการคาร์บอไนซ์ชานอ้อยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน จากนั้นกระตุ้นโดยใช้ผงโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ผสมกับถ่านจากขั้นตอนแรก ในอัตราส่วน 4 ต่อ 1 และเผาที่ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงถึง 3,554 ตารางเมตรต่อกรัม [6] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์อยู่ที่ 400–800 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยสารเคมีอยู่ที่ 400–900 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงที่สุดกว่า 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม [7]

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ โดยนำกาบมะพร้าวมาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ และหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์หรือใช้ประโยชน์ทางการเกษตรอื่น ๆ หรือเป็นข้อมูลในการสร้างเตาเผาถ่านกัมมันต์สำหรับชุมชนต่อไป สำหรับกาบมะพร้าวที่เลือกใช้เป็นกาบมะพร้าวจากชุมชนตะเคียนเตี้ย ในตำบลตะเคียนเตี้ย อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นชุมชนที่มีการรวมกลุ่มและพัฒนาตนเองอย่างสม่ำเสมอ มีการทำสวนมะพร้าวร่วมกับการแปรรูปและจำหน่ายผลิตภัณฑ์จากมะพร้าว ได้แก่ น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น ขนมทองพับ ขนมทอฟฟี่ ประดิษฐ์เครื่องใช้และของตกแต่งบ้านจากกะลามะพร้าว ร่วมกับการเปิดบ้านพักแบบโฮมสเตย์ให้นักท่องเที่ยวร่วมกิจกรรมปั่นจักรยานชมสวนมะพร้าว อย่างไรก็ตามปัญหาขยะกาบมะพร้าวที่เกิดขึ้นทำให้เกิดผลเสีย เช่น ทำลายทัศนียภาพ เป็นที่อยู่ของแมลงบางชนิด และการเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการกำจัด

การผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวนี้จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการกำจัดของเหลือทิ้งทางการเกษตรของชุมชน ควบคู่ไปกับการนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปศึกษาการนำไปใช้ในสวนมะพร้าวของชุมชนในด้านต่าง ๆ เช่น การปรับปรุงคุณภาพดิน การเป็นปุ๋ยชีวภาพแก่พืช เป็นต้น รวมถึงเป็นองค์ความรู้ในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่น ๆ และเป็นข้อมูลในการออกแบบเตาเผาถ่านกัมมันต์เพื่อให้ชุมชนสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้เอง ซึ่งทางวิสาหกิจชุมชนหนองมน อำเภอหนองมน จังหวัดชลบุรี สามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและไม้ไผ่ โดยใช้ไอน้ำในการกระตุ้นมีกำลังการผลิต 60 ตันต่อเดือน สามารถจำหน่าย 50 บาทต่อกิโลกรัม [8] ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากชีวมวลยังสามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสีและมลพิษอื่น ๆ จากน้ำเสียได้อีกด้วย ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ใช้เมทิลีนบลู (methylene blue: MB) ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ [9]–[11]

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้กาบมะพร้าว ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ครูซิเบิลและเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) ซึ่งเป็นระบบที่ใกล้เคียงกับเตาเผาถ่านที่มีในชุมชนเกษตรกรทั่วไป โดยมุ่งหวังให้สามารถนำไปพัฒนาเตาเผาต้นแบบให้เข้ากับสิ่งที่มีในชุมชนได้ การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การผลิตถ่านชีวภาพและการกระตุ้นด้วยสารเคมี ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องของแต่ละขั้นตอน ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้มีการนำไปทดสอบการดูดซับ MB พร้อมกับการคำนวณพื้นที่ผิวและระบุไอโซเทอร์มการดูดซับ เพื่อทราบความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ดูดซับมลพิษในน้ำเสีย รวมถึงวิเคราะห์สภาวะในการผลิตและต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อประกอบการออกแบบเตาเผาที่เหมาะสม คณะผู้วิจัยคาดหวังว่าการทดลองในระบบที่ใกล้เคียงกับเตาเผาของชุมชน จะทำให้ชุมชนสามารถบริหารจัดการเองได้และเป็นต้นแบบในการพัฒนาสู่ชุมชน

อื่นต่อไป นอกจากนี้การศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยแยกการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอนนั้น จะทำให้ได้ข้อมูลผลของอุณหภูมิที่เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิต [7] เพื่อสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีขึ้นหรือใช้อุณหภูมิในการผลิตแต่ละส่วนต่ำลงได้เพื่อลดต้นทุนและความซับซ้อนของเตาเผา

2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าว

2. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าว

3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านการดูดซับและอื่น ๆ

3) วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1) วัตถุดิบ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ กาบมะพร้าวจากพื้นที่ชุมชนตะเคียนเตี้ย อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เมทิลีนบลูจาก Ajax Finechem กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 95–97% จาก Merck กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ความเข้มข้น 85% จาก Ajax Finechem โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จากศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ กรดอะซิติก (CH_3COOH) glacial ความเข้มข้น 100% จาก Merck โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade จาก QreC โดยทำการเผาด้วยเครื่องเตาเผาแบบ Muffle furnace รุ่น Nabertherm

3.2) การออกแบบการทดลอง

วิจัยนี้แบ่งการผลิตออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การผลิตถ่านชีวภาพ (การคาร์บอไนซ์) และการผลิตถ่านกัมมันต์ ในการผลิตถ่านชีวภาพนั้นทำการออกแบบการทดลองโดยวิธี Central Composite Design (CCD) [12] เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพ โดยกำหนดขอบเขตของภาวะที่ใช้ในการทดลองให้ครอบคลุมสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ จากการอ้างอิงและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [13]–[16] ในเบื้องต้นนั้น พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพจะอยู่ระหว่าง 500–600 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1–2 ชั่วโมง ดังนั้นการออกแบบการทดลองสามารถทำได้ดังตารางที่ 1 จากนั้นจะนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology: RSM) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) ต่อไป

ตารางที่ 1 : ภาวะที่ใช้ในการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบ CCD

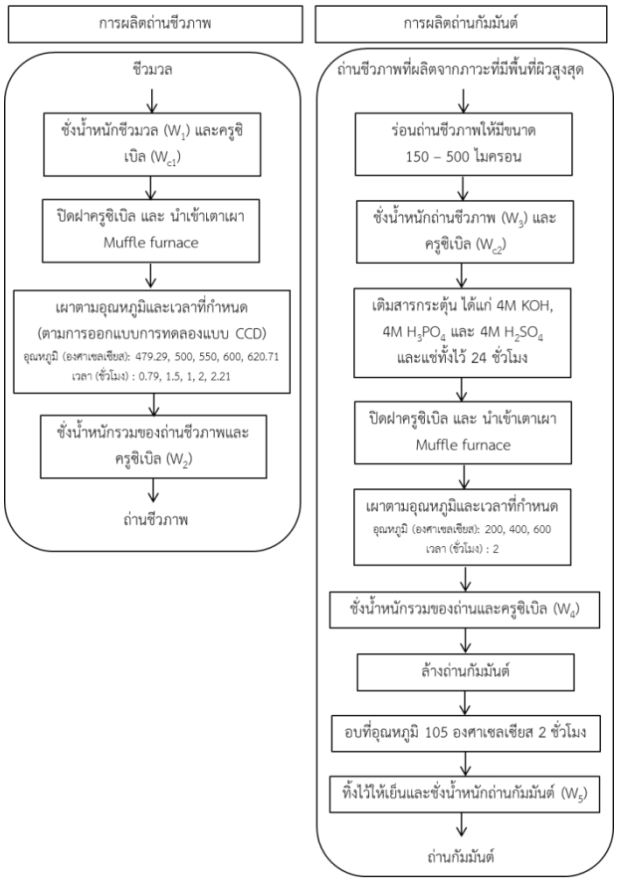
การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), ระดับ	เวลา (ชั่วโมง), ระดับ
1	479.29, -1.414	1.50, 0
2	479.29, -1.414	1.50, 0
3	500.00, -1	1.00, -1
4	500.00, -1	1.00, -1
5	500.00, -1	2.00, 1
6	500.00, -1	2.00, 1
7	550.00, 0	0.79, -1.414
8	550.00, 0	0.79, -1.414
9	550.00, 0	1.50, 0
10	550.00, 0	1.50, 0
11	550.00, 0	1.50, 0
12	550.00, 0	1.50, 0
13	550.00, 0	1.50, 0
14	550.00, 0	2.21, +1.414
15	550.00, 0	2.21, +1.414
16	600.00, 1	1.00, -1
17	600.00, 1	1.00, -1
18	600.00, 1	2.00, 1
19	600.00, 1	2.00, 1
20	620.71, +1.414	1.50, 0
21	620.71, +1.414	1.50, 0

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองจนได้ภาวะที่เหมาะสมแล้ว จึงนำถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากภาวะที่เหมาะสมนั้นมาผลิตถ่านกัมมันต์ โดยนำไปแช่ในสารกระตุ้น ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาเผาที่อุณหภูมิ 200 400 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ต่อไป

3.3) การเตรียมถ่านชีวภาพ

นำชีวมวลมาใส่ในครูซิเบิล ชั่งน้ำหนักครูซิเบิล (W_{c1}) และน้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ (W_1) ปิดฝาครูซิเบิลและนำไปเข้าเตาเผาตั้งเวลาและอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำออกจากเตาเผา เปิดฝา และชั่ง

น้ำหนัก (W_2) เก็บถ่านชีวภาพที่ได้ไว้ในตู้ดูดความชื้นจนกว่าจะมีการใช้งาน



รูปที่ 1 : แผนภาพขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์

3.4) การเตรียมถ่านกัมมันต์

เตรียมสารกระตุ้นให้มีความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร กรองถ่านชีวภาพให้มีขนาดระหว่าง 150–500 ไมครอน ชั่งน้ำหนักครูซิเบิล (W_{c2}) และน้ำหนักของถ่านชีวภาพที่ใช้ (W_3) เติมสารกระตุ้นโดยใช้ปริมาณสารกระตุ้นต่อถ่านชีวภาพเท่ากับ 2 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 200 400 และ 600 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำออกจากเตาเผา เปิดฝา และชั่งน้ำหนักรวมของถ่านกับครูซิเบิล (W_4) ล้างถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายกรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่าพีเอชเป็นกลาง นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นและชั่งน้ำหนัก (W_5) เก็บถ่านกัมมันต์ที่ได้ไว้ในตู้ดูดความชื้นจนกว่าจะมีการใช้งาน ขั้นตอนการทดลองโดยสรุปแสดงดังรูปที่ 1

3.5) การวิเคราะห์สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

3.5.1) การวิเคราะห์ความชื้น (Moisture) วิเคราะห์ปริมาณความชื้น ด้วยวิธี ASTM E-871-82 [17] ชั่งน้ำหนักครูซิเบิล (W_{mc}) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 1 กรัม (W_{m1}) ใส่ในถ้วยครูซิเบิล แล้วไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักของครูซิเบิลและตัวอย่างหลังอบ (W_{m2}) คำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\%M = \frac{W_{m2}-W_{mc}}{W_{m1}} \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่ %M คือ ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
W_{mc} คือ น้ำหนักครูซิเบิล (กรัม)
W_{m1} คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม), as received
W_{m2} คือ น้ำหนักตัวอย่างและครูซิเบิลหลังอบ (กรัม)

3.5.2) การวิเคราะห์เถ้า (% ash) วิเคราะห์ปริมาณเถ้า ด้วยวิธี ASTM E-1755-01 [18] ชั่งน้ำหนักครูซิเบิล (W_{ac}) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งประมาณ 1 กรัม (W_{a1}) ใส่ในถ้วยครูซิเบิล แล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักของครูซิเบิลและตัวอย่างหลังเผา (W_{a2}) คำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\%ash = \frac{W_{a2} - W_{ac}}{W_{a1}} \times 100 \qquad (2)$$

โดยที่ %ash คือ ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
W_{ac} คือ น้ำหนักครูซิเบิล (กรัม)
W_{a1} คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม), dry, ash-free basis
W_{a2} คือ น้ำหนักตัวอย่างและครูซิเบิล

3.5.3) การวิเคราะห์สารระเหย (Volatile Matter) ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) โดยใช้เครื่อง Thermo-gravimetric Analyzer รุ่น NETZSCH TG 209 F3 Tarsus ตามวิธี ASTM E 1868-10 [19] ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เริ่มบันทึกน้ำหนักที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (W_{vm1}) จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 950 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 200 องศาเซลเซียส/นาที และค้างไว้ที่อุณหภูมินี้ 7 นาที แล้วจึงบันทึกน้ำหนักอีกครั้ง (W_{vm1}) ปริมาณของสารระเหยคำนวณจากการนำน้ำหนักสุดท้ายลบด้วยน้ำหนักเริ่มต้น คำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$\%VM = \frac{W_{vm1} - W_{vm2}}{W_{vm1}} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ %VM คือ ปริมาณสารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
W_{vm1} คือ น้ำหนักตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ก่อนเผา (กรัม)
W_{vm2} คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส (กรัม)

3.5.4) การคำนวณค่าคาร์บอนคงตัว คำนวณคาร์บอนคงตัวจากผลต่างดังนี้

$$\%FC = 100 - \%M - \%Ash - \%VM \quad (4)$$

โดยที่ %FC คือ คาร์บอนคงตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

3.5.5) การคำนวณค่าร้อยละผลได้ของแข็ง (% solid) คำนวณหาผลได้ของแข็งสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพและการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นร้อยละได้ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ ดังนี้

$$\%solid = \frac{W_2 - W_{c1}}{W_1} \times 100 \quad (5)$$

และ

$$\%solid = \frac{W_5}{W_3} \times 100 \quad (6)$$

โดยที่ %solid คือ ผลได้ของของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
W_{c1} คือ น้ำหนักครูซิเบิล (กรัม)
W_1 คือ น้ำหนักชีวมวลแห้งก่อนทำการทดลอง (กรัม), dry, ash-free basis
W_2 คือ น้ำหนักถ่านชีวภาพและครูซิเบิลหลังทำการทดลอง (กรัม)
W_3 คือ น้ำหนักถ่านชีวภาพแห้งก่อนทำการทดลอง (กรัม), dry, ash-free basis
W_5 คือ น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (กรัม)

3.5.6) การวิเคราะห์การดูดซับด้วย MB เตรียมสารละลาย MB ให้มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (C_1) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ชั่งน้ำหนักถ่านชีวภาพ/ถ่านกัมมันต์ 0.2 กรัม (W) ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เทสารละลาย MB ที่เตรียมไว้แล้วกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำของผสมที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C glass microfiber filters ขนาด 47 มิลลิเมตร นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV spectrometer ที่ความยาวคลื่น 667 นาโนเมตร คำนวณค่าความเข้มข้น (C_2) จากค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้โดยใช้ calibration curve

3.5.7) การคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับเป็นร้อยละได้ดังนี้

$$\%eff = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (7)$$

โดยที่ %eff คือ ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
C_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)
C_2 คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.5.8) การความสามารถในการดูดซับ คำนวณหาความสามารถในการดูดซับของถ่านได้ดังนี้

$$Qe = \frac{V(C_1 - C_2)}{W} \quad (8)$$

โดยที่ Qe คือ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
C_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)
C_2 คือ ความเข้มข้นสุดท้าย (ความเข้มข้นสมดุล) ของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)
V คือ ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ (ลิตร)
W คือ น้ำหนักของถ่านที่ใช้ (กรัม)

3.5.9) การคำนวณพื้นที่ผิวของวัตถุ คำนวณหาพื้นที่ผิวของถ่านได้ดังนี้ [20], [21]

$$S = \frac{Qe \times N_A \times A_m}{1{,}000 \times M_{MB}} \quad (9)$$

โดยที่ S คือ พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม
Qe คือ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
N_A คือ Avogadro's number (6.02×10^{23} โมเลกุลต่อโมล)
A_m คือ พื้นที่ที่ถูกครอบครองด้วย MB 1 โมเลกุล (1.30×10^{-18} ตารางเมตรต่อโมเลกุล) [20]
M_{MB} คือ มวลโมเลกุลของ MB (373.89 กรัมต่อโมล)

4) ผลการวิจัย

4.1) ลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

จากการสำรวจพื้นที่ในตำบลตะเคียนเตี้ย อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี พบว่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรส่วนใหญ่มาจากสวนมะพร้าว ได้แก่ กาบมะพร้าวและกะลามะพร้าว ซึ่งบางส่วนมีการนำไปแปรรูปแต่บางส่วนถูกทิ้งไว้ นอกจากนั้นยังมีขี้เลื่อย

จากต้นมะพร้าวและแกลบอีกจำนวนหนึ่ง ลักษณะของกาบมะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อยแสดงดังรูปที่ 2

รูปที่ 2 : กาบมะพร้าว (ก) แกลบ (ข) และขี้เลื่อย (ค)

เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) พบว่าองค์ประกอบของกาบมะพร้าวและขี้เลื่อยใกล้เคียงกันโดยมีคาร์บอนประมาณร้อยละ 46 และออกซิเจนประมาณร้อยละ 48 ในขณะที่แกลบมีปริมาณคาร์บอนน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ของกาบมะพร้าวพบว่ามีความชื้นร้อยละ 2.19 ร้อยละสารระเหย 76.61 ร้อยละคาร์บอนคงตัว 18.51 และร้อยละเถ้า 2.69 ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงเลือกกาบมะพร้าวมาผลิตถ่านชีวภาพ

4.2) การผลิตถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าว

จากการผลิตถ่านชีวภาพโดยการออกแบบการทดลองแบบ CCD ดังรายละเอียดในตารางที่ 3 สำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าว พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากกาบมะพร้าวมีพื้นที่ผิวสูงสุดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง คิดเป็นค่าเฉลี่ย 104.75 ตารางเมตรต่อกรัม

เมื่อพิจารณาแนวโน้มโดยทั่วไปของร้อยละผลได้ของแข็ง พบว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลได้ของแข็งจะลดลงเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน (thermal cracking) ของชีวมวลที่อุณหภูมิสูง ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของสารระเหยได้ที่มากขึ้น โดยที่สารระเหยได้บางส่วน รวมถึงเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวก่อนในช่วงอุณหภูมิ 200–500 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 500 องศาเซลเซียส ลิกนินและสารอินทรีย์อื่นที่มีพันธะที่แข็งแรงจะเกิดการสลายตัว และเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 650 องศาเซลเซียส ถ่านชีวภาพจะมีความเสถียรและไม่ชอบน้ำมากขึ้น [22]

ตารางที่ 2 : ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละคาร์บอน (C) ร้อยละไฮโดรเจน (H) ร้อยละไนโตรเจน (N) และ ออกซิเจน (O) (โดยน้ำหนัก) ของชีวมวล

ชีวมวล	% C	% H	% N	% O
กาบมะพร้าว	46.65	5.15	0.25	47.95
แกลบ	40.72	5.30	0.36	53.62
ขี้เลื่อย	45.59	5.87	0.48	48.06

ตารางที่ 3 : ร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าว

อุณหภูมิคาร์บอไนซ์ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละผลได้ของแข็ง	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)
479.29	1.50	34.28	90.93
479.29	1.50	35.28	89.99
500.00	1.00	34.68	75.45
500.00	1.00	36.11	80.44
500.00	2.00	29.23	97.85
500.00	2.00	27.95	103.14
550.00	0.79	32.76	99.51
550.00	0.79	32.88	103.48
550.00	1.50	29.14	94.07
550.00	1.50	30.90	102.51
550.00	1.50	29.76	95.53
550.00	1.50	27.93	93.09
550.00	1.50	28.77	97.29
550.00	2.21	24.19	110.69
550.00	2.21	26.49	110.71
600.00	1.00	28.85	99.51
600.00	1.00	30.57	103.56
600.00	2.00	25.94	106.79
600.00	2.00	24.89	102.71
620.71	1.50	25.44	108.11
620.71	1.50	27.62	112.75

เมื่อนำผลการทดลองของการผลิตถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าวมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาจากค่า p-value พบว่าค่า p-value ของปัจจัย A (อุณหภูมิ) และ B (เวลา) สำหรับการวิเคราะห์ ANOVA ของร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นการระบุว่าอุณหภูมิและเวลามี

ผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับพื้นที่ผิวนั้นพบว่าปัจจัย AB หรืออันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาส่งผลอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าค่า p-value ของปัจจัยที่ไม่อยู่ในลักษณะเชิงเส้น (quadratic effects) เช่น A^2 และ B^2 มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลการทดลองจึงมีลักษณะเชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากงานวิจัยก่อนหน้า [23] ค่าร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพที่สูงที่สุดจึงพบได้จากภาวะที่สูงสุดหรือต่ำสุดของแต่ละปัจจัย ดังจะเห็นในกราฟพื้นผิวตอบสนองและ contour plot ในรูปที่ 3 และ 4 ที่จะอภิปรายต่อไป

ตารางที่ 4 : ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของแข็ง (ก) และพื้นที่ผิว (ข) ของถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าว

(ก) ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของแข็ง

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	231.93	5	46.39	42.34	< 0.0001*
A-Temperature	105.39	1	105.39	96.19	< 0.0001*
B-Time	117.41	1	117.41	107.17	< 0.0001*
AB	3.14	1	3.14	2.87	0.1111
A^2	4.42	1	4.42	4.04	0.0629
B^2	0.18	1	0.18	0.16	0.6918
Residual	16.43	15	1.10		
Lack of Fit	2.06	3	0.69	0.57	0.6436
Pure Error	14.38	12	1.20		
Cor Total	248.36	20			

(ข) ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับพื้นที่ผิว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	1452.81	5	290.56	12.14	< 0.0001*
A-Temperature	786.33	1	786.33	32.84	< 0.0001*
B-Time	376.02	1	376.02	15.7	0.0013*
AB	186.89	1	186.89	7.81	0.0136*
A^2	0.42	1	0.42	0.02	0.8970
B^2	94.56	1	94.56	3.95	0.0655
Residual	359.15	15	23.94		
Lack of Fit	241.85	3	80.62	8.25	0.0030
Pure Error	117.30	12	9.78		
Cor Total	1811.96	20			

*The factors with p-value < 0.05 are significant

จากนั้นเมื่อนำผลการคำนวณมาสร้างสมการถดถอยสำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิว แสดงดังสมการที่ 10 และ 11

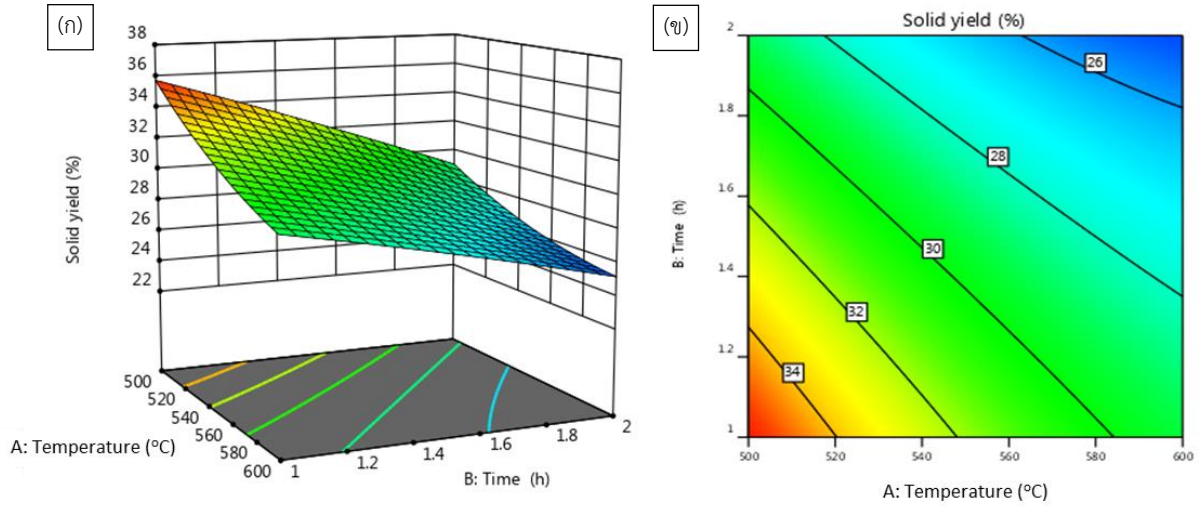
$$\text{Solid yield} = 29.3 - 2.57(T) - 2.71(t) + 0.63(Tt) + 0.65(T^2) - 0.13(t^2) \quad (10)$$

$$\text{Surface area } (m^2/g) = 96.5 + 7.01(T) + 4.85(t) - 4.83(Tt) + 0.20(T2) - 3.03(t2) \quad (11)$$

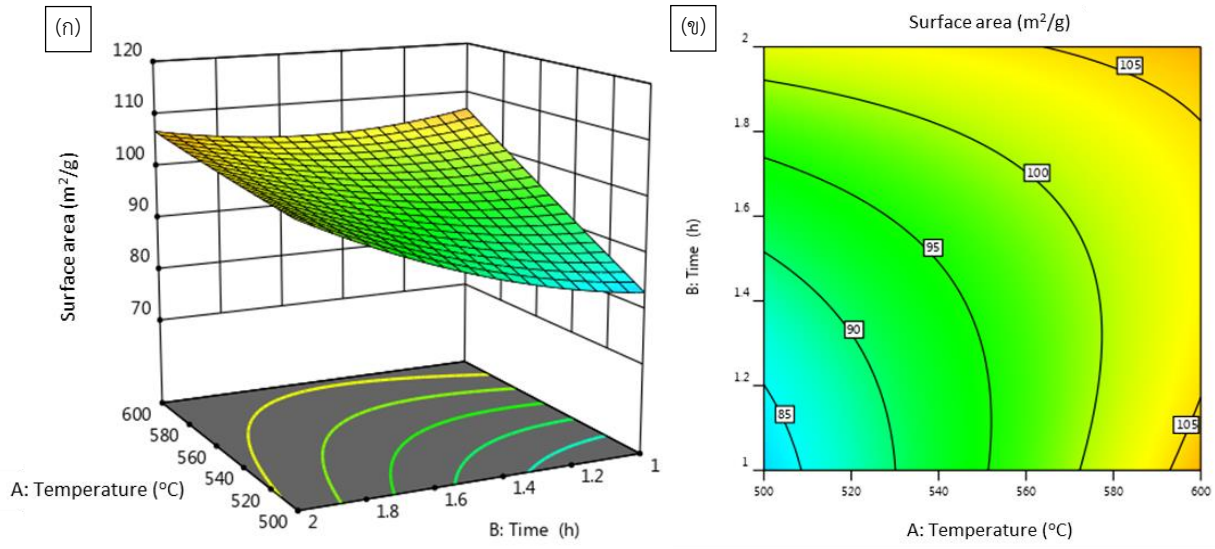
เมื่อ T และ t คือ ระดับของอุณหภูมิและเวลา ตามลำดับ จากสมการถดถอยพบว่าสัมประสิทธิ์หน้า T (อุณหภูมิ) และ t (เวลา) สำหรับร้อยละผลได้ของแข็งมีค่าเป็นลบ แสดงว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาร้อยละผลได้ของแข็งลดลง ในขณะที่สัมประสิทธิ์หน้า T (อุณหภูมิ) และ t (เวลา) สำหรับพื้นที่ผิวมีค่าเป็นบวก แสดงว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลา พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจะเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการอภิปรายผลการทดลองข้างต้นและ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [7] จากนั้นนำสมการถดถอยมาสร้างเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนองและ contour plot สำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิว แสดงได้ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จะทำให้สามารถสังเกตแนวโน้มของผลการทดลองได้ชัดเจนขึ้น รวมถึงสามารถทำนายผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 500–600 องศาเซลเซียสและเวลา 1–2 ชั่วโมงได้โดยมีค่า R^2 = 0.93 และ 0.80 สำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิว ตามลำดับ นอกจากนี้ในรูปที่ 4 (ข) แสดงให้เห็นความโค้งของ contour อันเนื่องมาจากผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อพื้นที่ผิวนั้นเอง

จากผลการทดลองการผลิตถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าว ทำให้สามารถเลือกภาวะที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำมากระตุ้นโดยใช้สารเคมี ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 4 โมลาร์ได้ โดยเลือกถ่านชีวภาพที่ได้ 3 ภาวะ ได้แก่ ภาวะที่ได้ร้อยละผลได้ของแข็งสูงที่สุด ภาวะที่ได้พื้นที่ผิวมากที่สุด และภาวะที่ได้ความพึงพอใจสูงสุด (คำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert) เพื่อให้ลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีความหลากหลาย โดยภาวะที่เลือกแสดงดังตารางที่ 5



รูปที่ 3 : พื้นผิวตอบสนอง (ก) และ contour plot (ข) ของร้อยละผลได้ของแข็ง



รูปที่ 4 : พื้นผิวตอบสนอง (ก) และ contour plot (ข) ของพื้นที่ผิว

ตารางที่ 5 : ภาวะการผลิตถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าวที่เลือกก่อนนำมากระตุ้นด้วยสารเคมี

ภาวะ	อุณหภูมิคาร์บอไนซ์ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
Highest surface area	600	2
Highest solid yield	500	1
Highest desirability	600	1

4.3) การผลิตถ่านกัมมันต์

เมื่อเลือกภาวะที่ต้องการได้ตามตารางที่ 5 จึงนำถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ตามภาวะดังกล่าวไปกระตุ้นด้วยสารเคมี ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 4 โมลาร์ โดยใช้อุณหภูมิ 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6 เมื่อพิจารณาแนวโน้มในภาพรวมจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิกระตุ้นมากขึ้นร้อยละผลได้ของแข็งของถ่านกัมมันต์ลดลง ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อพื้นที่ผิวแตกต่างกัน

4.3.1) ผลของชนิดสารกระตุ้นต่อพื้นที่ผิว จากการวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของแข็งดังแสดงในตารางที่ 6 (ก) พบว่าการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของแข็งสูงถึงร้อยละ 100 และเมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวดังแสดงในตารางที่ 6 (ข) พบว่ามีพื้นที่ผิวสูงมากกว่า 550 ตารางเมตรต่อกรัมและมากกว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยกรดทั้งสองชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้นทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนของผิวถ่านชีวภาพ และสร้างหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนใหม่จำนวนมากและมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity) มากขึ้น [24], [25] เมื่อนำไปทดสอบการดูดซับด้วย MB จึงพบว่าสามารถดูดซับ MB ได้มาก ค่าพื้นที่ผิวที่คำนวณได้จึงมีค่าสูง

นอกจากนี้ เมื่อนำถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า พบว่าผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกหรือกรดซัลฟูริก และเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีลักษณะค่อนข้างเรียบเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพก่อนนำไปกระตุ้น ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สามารถสังเกตเห็นรูพรุนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวได้ ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Brunauer-Emmelt-Teller (BET) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ระบุว่าการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) และรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) ซึ่งทำให้ MB สามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดกลางได้ง่ายขึ้น ในขณะที่การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟูริกไม่สามารถมองเห็นรูพรุนที่เกิดขึ้นได้ [26] อย่างไรก็ตาม ร้อยละผลได้ของแข็งของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ยังคงเท่ากับร้อยละ 100 เนื่องจากการเข้าไปทำปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนกับถ่านชีวภาพ และอุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่สารระเหยจากถ่านชีวภาพจะสลายตัวออกไปจนส่งผลให้น้ำหนักลดลงอย่างเห็นได้ชัด

4.3.2) ผลของอุณหภูมิกระตุ้นต่อพื้นที่ผิว จากตารางที่ 6 (ก) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นทำให้ร้อยละผลได้ของแข็งลดลงเนื่องจากการสลายตัวของสารระเหยบางส่วนที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามร้อยละผลได้ของแข็งของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกกลับมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 200 เป็น 400 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 600 องศาเซลเซียส สาเหตุอาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกกับคาร์บอนในชีวมวล ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางและเกิดหมู่ P-O-C /C-O-PO_3 ทำให้การกักเก็บคาร์บอน (carbon retention) ของถ่านชีวภาพมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่เติมกรด นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการกักเก็บคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 350 เป็น 500 องศาเซลเซียส และลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 650 องศาเซลเซียส [27] ปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับร้อยละผลได้ของแข็งซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นจึงลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส

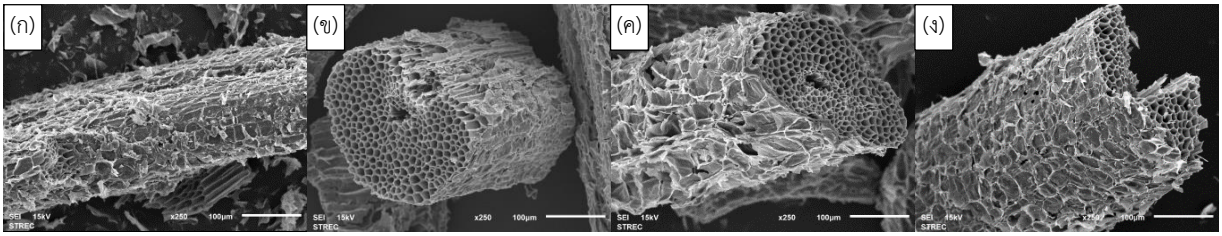
จากตารางที่ 6 (ข) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้พื้นที่ผิวลดลง ส่วนหนึ่งอาจเนื่องมาจากการดูดซับ MB บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยเบสเป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน (exothermic reaction) การเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้ MB หลุดออกจากโครงสร้างได้ง่าย รวมถึงอาจเกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างและรูพรุนใหม่ทำให้ความเป็นรูพรุนลดลงหรือมีลักษณะที่ไม่เหมาะสมต่อการดูดซับ ในทางกลับกันการเพิ่มอุณหภูมิจาก 200 เป็น 400 องศาเซลเซียสในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟูริกทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เป็นไปได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำการเกิดรูพรุนยังไม่สมบูรณ์ [28] การเพิ่มอุณหภูมิทำให้รูพรุนสามารถเกิดได้ดีขึ้นจากการสลายตัวเพิ่มเติมของสาร

ระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยาของกรดกับถ่านชีวภาพ ทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีผลดีในแง่ของการใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำให้สามารถประหยัดพลังงานในการผลิตได้มากกว่าการใช้กรด

ทั้งนี้สำหรับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าวด้วยกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างจากลักษณะทั่วไปของถ่านกัมมันต์ เช่น เป็นสีขาว สีน้ำตาล หรือเหลือน้อยมาก อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิสูง [29] รวมถึงอาจเกิดการออกซิเดชันกับอากาศที่ค้างอยู่ในครูซิเบิลบางส่วน

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งมีการใช้อุณหภูมิสูงในการกระตุ้นและใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ [6], [7] ซึ่งมีความซับซ้อนและไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในระดับชุมชน พบว่างานวิจัยนี้ทำทดลองใน muffle furnace ซึ่งมีข้อดีคือเป็นระบบที่ใกล้เคียงกับการสร้างเตาเผาที่ไม่ซับซ้อนและมีความเป็นไปได้ในการสร้างเพื่อผลิตถ่านชีวภาพในชุมชน รวมถึงสามารถปรับเป็นเตาเผาสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ในลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ข้อเสียคือไม่สามารถทำให้เป็นระบบปิดหรือทำการทดลองภายใต้ inert atmosphere ได้อย่างสมบูรณ์ดังนั้นจึงมีอากาศอยู่จำนวนหนึ่งในครูซิเบิลหลังจากที่ปิดฝาแล้ว เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงออกซิเจนที่มีอยู่จึงทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ถ่านกลายไปเถ้าได้บางส่วนดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 6 จะเห็นว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวที่อุณหภูมิสูงให้ร้อยละผลได้ของแข็งของถ่านกัมมันต์ต่ำ แต่ร้อยละผลได้ของแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำลง จนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยก่อนหน้า [6], [7] และให้พื้นที่ผิวสูงสุดถึง 1,147.74 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์นี้ สามารถผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้อุณหภูมิต่ำได้ ทำให้ช่วยลดพลังงาน ลดความซับซ้อนและต้นทุนของการสร้างเตาเผา ซึ่งคณะผู้วิจัยจะศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์โดยเน้นการใช้อุณหภูมิต่ำในงานวิจัยขั้นต่อไป



รูปที่ 5 : ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า ของถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าวที่เผาอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง (ก) และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการนำถ่านชีวภาพจากกาบมะพร้าวที่เผาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ไปกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ข) กรดฟอสฟอริก (ค) และกรดซัลฟูริก (ง)

4.3.3) ผลของภาวะที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพต่อพื้นที่ผิว จากตารางที่ 6 เมื่อสังเกตภาพรวมของการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านชีวภาพพบว่า การผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากภาวะอื่น อาจเนื่องมาจากโครงสร้างที่ยังมีสารระเหยบางส่วนเหลืออยู่ทำให้การเกิดรูพรุนโดยการกระตุ้นด้วยสารเคมีสามารถเกิดได้สมบูรณ์มากกว่าทั้งนี้ควรวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบสมมุติฐาน รวมถึงทดลองผลิตถ่านชีวภาพด้วยภาวะที่รุนแรงน้อยกว่านี้เพื่อทดสอบผลการกระตุ้นเพิ่มเติม

4.3.4) ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ การศึกษาไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับถ่านกัมมันต์ด้วย MB ผู้วิจัยเลือกถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (พื้นที่ผิว 1,147.74 ตารางเมตรต่อกรัม) มาทำการทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherms) และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freudlich Adsorption Isotherms) [29] โดยมีสมการการดูดซับดังนี้

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}K_L} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (11)$$

สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช:

$$log(q_e) = log(K_F) + \frac{1}{n}log(C_e) \quad (12)$$

โดยที่ q_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสารละลาย MB บนถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสารละลาย MB (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_{max} คือ ความสามารถในการดูดซับแบบชั้นเดียวของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบฟรุนดลิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

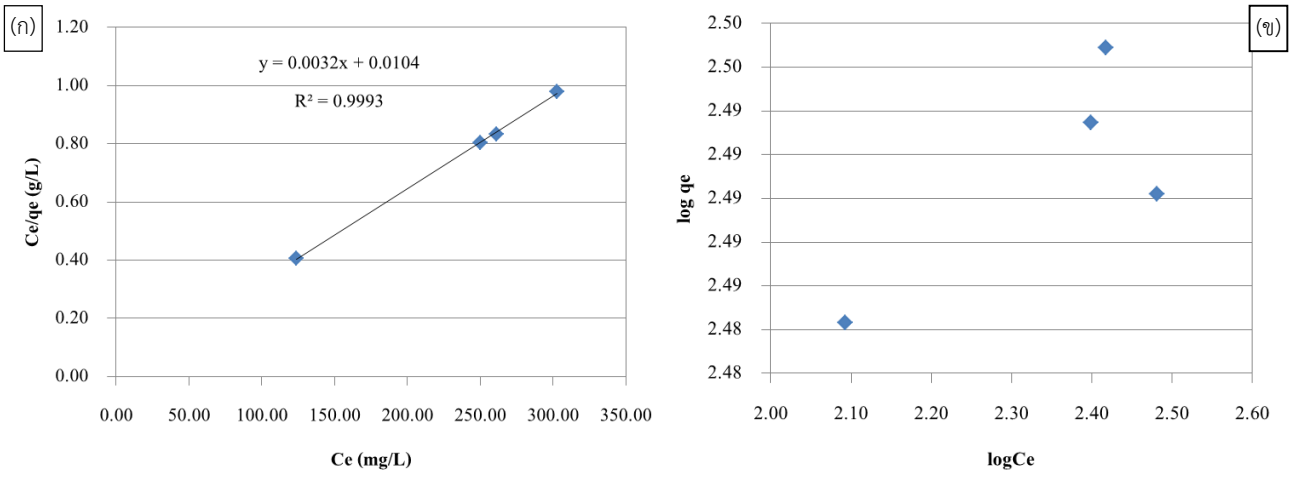
N คือ ค่าแฟกเตอร์ความแตกต่างของพื้นผิวตัวดูดซับ (heterogeneity factor)

เมื่อนำข้อมูลไปพลอตกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e และกราฟระหว่าง $log(q_e)$ กับ $log(C_e)$ จะได้ดังรูปที่ 5 จากรูปพบว่าการดูดซับ MB สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ค่าสหสัมพันธ์ (R^2, linear regression square) เท่ากับ 0.9993 โดยที่สามารถคำนวณค่า q_{max} ได้เท่ากับ 312.50 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่า K_L เท่ากับ 0.31 ลิตรต่อมิลลิกรัม แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของ MB บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)

4.4 วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์และเสนอแนวทางการนำไปใช้

จากการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวด้วยภาวะต่าง ๆ ข้างต้น ผู้วิจัยได้คำนวณต้นทุนการผลิตโดยอ้างอิงจากภาวะที่ทำให้ได้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงที่สุด คือ การคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมงด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีพื้นที่ผิว 1,147.74 ตารางเมตรต่อกรัม และนำไปเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการแข่งขันเชิงธุรกิจ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 7

จากตารางจะเห็นว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวมีต้นทุนที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยอ้างอิงจากยี่ห้อ Fluka (รหัส Honeywell Fluka 05120-1KG) ซึ่งมีการนำมาใช้ในหลายงานวิจัยเนื่องจากมีลักษณะการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นโอกาสในการลงทุนผลิต อย่างไรก็ตามการผลิตในเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์คุณภาพของถ่านกัมมันต์ในด้านอื่นให้ตรงตามมาตรฐาน มอก. 900-2547 ด้วย สำหรับการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ นั้น สามารถนำไปใช้ในการดูดซับสีในกระบวนการผลิตสิ่งทอ การปรับปรุงคุณภาพน้ำ การดูดกลิ่น หรืออื่น ๆ ได้ตามความเหมาะสม



รูปที่ 6 : ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (ก) และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (ข) ของการดูดซับสี ด้วยถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าว

ตารางที่ 6 : ร้อยละผลได้ของแข็ง (ก) และพื้นที่ผิว (ข) ของถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวที่ได้จากการกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟิวริก ที่สภาวะต่าง ๆ

สารเคมี	อุณหภูมิคาร์บอไนซ์ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	(ก) ร้อยละผลได้ของแข็ง			(ข) พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)		
			อุณหภูมิกระตุ้น (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิกระตุ้น (องศาเซลเซียส)		
			200	200	400	200	400	600
KOH	500	1	100.00	61.00	17.82	1,147.74	483.27	45.70
	600	1	100.00	62.00	18.48	635.58	608.03	49.94
	600	2	100.00	60.00	11.27	555.18	406.60	32.16
H_3PO_4	500	1	75.81	99.70	34.06	56.26	370.90	-ไม่ระบุ-
	600	1	84.80	100.00	30.38	26.85	316.01	-ไม่ระบุ-
	600	2	75.33	77.31	42.69	75.77	417.01	-ไม่ระบุ-
H_2SO_4	500	1	89.41	40.74	13.28	46.53	287.31	-ไม่ระบุ-
	600	1	100.00	67.62	15.78	64.96	337.40	-ไม่ระบุ-
	600	2	100.00	66.37	27.42	71.00	289.17	-ไม่ระบุ-

ตารางที่ 7 **:** การประมาณราคาต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์ 1 กิโลกรัมจากกาบมะพร้าว

รายการ	ราคาต่อหน่วย	หน่วย	จำนวนที่ใช้	หน่วย	ราคารวม (บาท)
กาบมะพร้าว	0	บาทต่อกิโลกรัม	3.5	กิโลกรัม	0
ค่าแรง	300	บาทต่อวันต่อคน	3	วันต่อคน (1คน)	900
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	600	บาทต่อกิโลกรัม	2	กิโลกรัม	1,200
กรดแอซิติก	320	บาทต่อลิตร	1	ลิตร	320
น้ำ	0.02	บาทต่อกิโลกรัม	500	กิโลกรัม	10
ไฟฟ้า	4	บาทต่อหน่วย	90	หน่วย	360
ค่าขนส่ง	100	เหมาจ่ายต่อรอบ	1	รอบ	100
ราคารวม					**2,890**

หมายเหตุ: ภาวะในการผลิตคือ คาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมงด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เทียบกับราคาถ่านกัมมันต์จาก Fluka (Honeywell Fluka 05120-1KG) เป็นราคาประมาณ 4,745.90 บาท ข้อมูล ณ วันที่ 10 สิงหาคม 2564

5) สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งจากกาบมะพร้าว โดยเริ่มต้นจากการนำชีวมวลมาผลิตถ่านชีวภาพ หลังจากนั้นเลือกภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำถ่านชีวภาพที่ผลิตได้มากระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ โดยใช้สารเคมีกระตุ้น 3 ชนิดได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟูริก ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ภาวะที่ได้ร้อยละของแข็งสูงที่สุดสำหรับกาบมะพร้าวคือ เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละของแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 35.39 ในขณะที่ถ่านชีวภาพที่ได้จากกาบมะพร้าวมีพื้นที่ผิวสูงสุดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง คิดเป็นค่าเฉลี่ย 104.75 ตารางเมตรต่อกรัม และพบว่าทั้งอุณหภูมิและเวลามีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ

2. เมื่อนำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากภาวะที่แตกต่างกันมากระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ พบว่าการผลิตถ่านชีวภาพโดยใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด การใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำเหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์มากกว่าการใช้กรดทั้งสองชนิด ซึ่งถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวที่เตรียมโดยการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิว 1,147.74 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งใช้อุณหภูมิ

ค่อนข้างต่ำในการผลิต ทำให้ประหยัดพลังงานในการผลิต ลดต้นทุน และความซับซ้อนของเตาเผาได้

3. การดูดซับ MB ของถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

4. จากการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์พบว่ามีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 2,890 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งถูกกว่าราคาถ่านกัมมันต์ที่ขายเชิงพาณิชย์จึงมีความเป็นไปได้ในการลงทุน

จากสรุปผลการทดลองดังกล่าว งานวิจัยนี้ทำการทดลองใน muffle furnace ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน สามารถนำไปปรับใช้ในการออกแบบเตาเผาระดับภาคสนามได้ โดยการออกแบบเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และผลิตถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นสามารถนำไปใช้ในการดูดซับ MB และคาดว่าสามารถนำไปใช้ในการดูดซับมลพิษในน้ำเสียอื่นได้ สำหรับงานวิจัยที่มีความน่าสนใจในการดำเนินการต่อไป คือ การทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ MB สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ภาวะต่าง ๆ การผลิตถ่านกัมมันต์ในช่วงอุณหภูมิต่ำ รวมถึงการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับและการนำถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ MB เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2563 จากเงินงบประมาณผลประโยชน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประสานงานจากสถาบันวิจัยและพัฒนา และผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้คำแนะนำในการดำเนินโครงการ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวายที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรสายสนับสนุนที่กรุณาช่วยเหลือด้านเอกสาร ขอขอบคุณผู้นำชุมชน ชาวบ้าน และบุคลากรที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ชุมชนตะเคียนเตี้ย ตำบลตะเคียนเตี้ย อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในการนำมาใช้ในงานวิจัย ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

REFERENCES

[1] Office of Agricultural Economics. “Mature coconut: Percentage and monthly yield including country, region and province in 2020.” OAE.go.th. https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/Coconut% 20percent% 2063.pdf (accessed Aug. 23, 2020)

[2] S. Tatayanon, T. Piriyayotha, T. Boonyaem, and C. Osot, “Feasibility study on the simple production of activated carbon from biomass,” Forest Research and Development Bureau, Bangkok, Thailand, 2017. [Online]. Available: https://shorturl.asia/b3Jd0

[3] Medthai. “Activated charcoal.” (in Thai), MEDTHAI.com. https://shorturl.asia/VWlpM (accessed Aug. 23, 2020)

[4] J. Manaonok, S. Gonkhamdee, K. Dejbhimon, W. K. Polpinit, and D. Jothityangkoon, “Biochar: Its effect on soil properties and growth of wet-direct seeded rice (a pot trial),” (in Thai), *Khon Kaen Agr. J.*, vol. 45, no. 2, pp. 209–220, 2017.

[5] X. Tan *et al.*, “Biochar as potential sustainable precursors for activated carbon production: Multiple applications in environmental protection and energy storage,” *Bioresour. Technol.*, vol. 227, pp. 359–372, Mar. 2017.

[6] M. Dwiyaniti *et al*., “Extremely high surface area of activated carbon originated from sugarcane bagasse,” in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 909, no. 1, 2020, pp. 1–8.

[7] M. S. Reza *et al.*, “Preparation of activated carbon from biomass and its’ applications in water and gas purification, a review,” *Arab J. Basic Appl. Sci.,* vol. 27, no. 1, pp. 208–238, 2020.

[8] Chulalongkorn University. “High quality smokeless charcoal briquettes and activated carbon products from agricultural waste by the learning and demonstration of solid fuel production center, Chulalongkorn University.” (in Thai), CHULA.ac.th. https://www.chula.ac.th/news/30933/ (accessed Aug. 23, 2020)

[9] M. F. Nazzal, S. T. Ali, and I. A. Abdulwahab, “Removal of methylene blue dye from wastewater using activated carbon: A review,” *Solid State Technol.,* vol. 63, no. 3, pp. 4290–4296, 2020.

[10] S. Karagoz, T. Tay, S. Ucar, and M. Erdem, “Activated carbons from waste biomass by sulfuric acid activation and their use on methylene blue adsorption,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 14, pp. 6214–6222, Sep. 2008.

[11] A. L. Ahmad, M. M. Loh, and J. A. Aziz, "Preparation and characterization of activated carbon from oil palm wood and its evaluation on Methylene blue adsorption," *Dyes and Pigments*, vol. 75, no. 2, pp. 263–272, 2007.

[12] J. Sabseree, "DOE: Central composite design," *For Quality*, (in Thai), no. 145, pp. 72–74, Nov. 2009.

[13] Z. Guo *et al.*, "Activated carbons with well-developed microporosity prepared from Phragmites australis by potassium silicate activation," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 45, no. 5, pp. 2801–2804, Sep. 2014.

[14] N. M. A. Lagtah, A. H. Al-Muhtaseb, M. N. M. Ahmad, and Y. Salameh, "Chemical and physical characteristics of optimal synthesised activated carbons from grass-derived sulfonated lignin versus commercial activated carbons," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 225, pp. 504–514, May 2016.

[15] C. R. Correa, T. Otto, and A. Kruse, "Influence of the biomass components on the pore formation of activated carbon," *Biomass and Bioenergy*, vol. 97, pp. 53–64, Feb. 2017.

[16] S. Li, K. Han, J. Li, M. Li, and C. Lu, "Preparation and characterization of super activated carbon produced from gulfweed by KOH activation," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 243, pp. 291–300, May 2017.

[17] *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels,* ASTM E871-82(2006), Nov. 26, 2013. [Online], Available: https://www.astm.org/e0871-82r06.html

[18] *Standard Test Method for Ash in Biomass*, ASTM E1755-01(2015), Aug. 13, 2020. [Online], Available: https://www.astm.org/e1755-01r15.html

[19] *Standard Test Methods for Loss-On-Drying by Thermo gravimetry*, ASTM E1868-10(2021), Aug. 23, 2022. [Online]. Available: https://www.astm.org/e1868-10r21.html

[20] N. Hegyesiab, R. T. Vadab, and B. Pukánszky, "Determination of the specific surface area of layered silicates by methylene blue adsorption: The role of structure, pH and layer charge," *Appl. Clay Sci.,* vol. 146, pp. 50–55, Sep. 2017.

[21] A. Albalasmeh *et al.*, "Characterization and artificial neural networks modelling of methylene blue adsorption of biochar derived from agricultural residues: Effect of biomass type, pyrolysis temperature, particle size," *J. Saudi Chem. Soc.*, vol. 24, no. 11, pp. 811–823, Nov. 2020.

[22] A. Tomczyk, Z. Sokołowska, and P. Boguta, "Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol*., vol. 19, pp.191–215, 2020.

[23] S. Pap *et al.*, "Optimising production of a biochar made from conifer brash and investigation of its potential for phosphate and ammonia removal," *Ind. Crops. Prod*., vol. 185, Oct. 2022.

[24] M. Hu *et al.*, "Towards understanding the chemical reactions between KOH and oxygen-containing groups during KOH-catalyzed pyrolysis of biomass," *Energy,* vol. 245, Apr. 2022, Art no. 123286.

[25] W. Chen *et al.*, "Insight into KOH activation mechanism during biomass pyrolysis: Chemical reactions between O-containing groups and KOH," *Appl. Energy,* vol. 278, Nov. 2020, Art. no. 1157303.

[26] J. O. Amode, J. H. Santos, Z. Md. Alam, A. H. Mirza, and C. C. Mei, "Adsorption of methylene blue from aqueous solution using untreated and treated (Metroxylon spp.) waste adsorbent: equilibrium and kinetics studies," *Int. J. Ind. Chem*., vol. 7, pp. 333–345, 2016.

[27] L. Zhao *et al.*, "Roles of phosphoric acid in biochar formation: Synchronously improving carbon retention and sorption capacity," *J. Environ. Qual.*, vol. 46, no. 2, pp. 393–401, 2017.

[28] Y. Li, X. Zhang, R. Yang, G. Li, and C. Hu, "The role of H_3PO_4 in the preparation of activated carbon from $NaOH^-$treated rice husk residue," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 41, pp. 32626–32636, 2015.

[29] N. Yuan, H. Cai, T. Liu, Q. Huang, and X. Zhang, "Adsorptive removal of methylene blue from aqueous solution using coal fly ash-derived mesoporous silica material," *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 3-4, pp. 333–348, 2019.