



การศึกษาอุณหภูมิคาร์บอนเซชันและปริมาณของกรดฟอสฟอริกต่อการดูดซับสารฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเม็ดบัว

ณัฐพล จันทศรี และ มาลี สันติคุณากรณ์*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2564 3001-9 ต่อ 3132 อีเมล: smalee@engr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.03.004

รับเมื่อ 10 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 9 กรกฎาคม 2563 ตอรับเมื่อ 17 กรกฎาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 4 มีนาคม 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเม็ดบัวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ซึ่งใช้เป็นสารในการปรับสภาพผิวได้ถูกประเมินความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลในระบบแบบกะที่ค่าพีเอช และความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ นำสองพารามิเตอร์มาพิจารณาคือ อุณหภูมิในการคาร์บอนเซชัน (400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส) และอัตราส่วนระหว่างปริมาณเม็ดบัวกับปริมาณกรด (1 : 1.0, 1 : 1.5 และ 1 : 2.0) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิในการคาร์บอนเซชันและอัตราส่วนระหว่างปริมาณเม็ดบัวกับปริมาณกรดมีบทบาทสำคัญต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ถูกคาร์บอนเซชันที่ 500 องศาเซลเซียส มีค่าไอโอดีนัมเบอร์ ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารฟีนอลสูง โดยเฉพาะ AC500,2.0 ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ถูกคาร์บอนเซชันที่ 600 องศาเซลเซียส ให้ค่าไอโอดีนัมเบอร์ และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูต่ำที่สุดในทุกอัตราส่วน สำหรับการศึกษาการดูดซับสารฟีนอลนั้น การดูดซับสามารถถูกอธิบายด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 นอกจากนี้ ค่าการดูดซับที่สมดุลเป็นไปตามไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ยกเว้น AC600,2.0

คำสำคัญ: เม็ดบัว ถ่านกัมมันต์ การดูดซับ จลนพลศาสตร์ ฟีนอล



Research Article

The Studies of Carbonization Temperature and Amount of Phosphoric Acid on Phenol Adsorption on Activated Carbon Prepared from Apricot Stones

Nattapon Jansri and Malee Santikunaporn*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathum Thani, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2564 3001-9 Ext. 3132, E-mail: smalee@engr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.03.004

Received 10 April 2020; Revised 9 July 2020; Accepted 17 July 2020; Published online: 4 March 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Activated carbon derived from apricot stones with phosphoric acid as a chemical agent was evaluated for the performance on phenol adsorption in a batch process at different pH and initial concentrations. In this work, two parameters, i.e. carbonization temperatures (400, 500 and 600 °C) and apricot stones to phosphoric acid ratios (1 : 1.0, 1 : 1.5 and 1 : 2.0) were considered. The results showed that the carbonization temperature and the ratio of apricot stones to phosphoric acid were predominant on the properties of activated carbon prepared. Activated carbons carbonized at 500 °C gave high iodine number, methylene blue adsorption, and phenol removal efficiency, especially AC500, 2.0 whereas activated carbons carbonized at 600 °C gave the lowest iodine number and methylene blue adsorption for all ratios. For the phenol adsorption study, the adsorption was explained very well by a pseudo-second-order kinetic model with R^2 of 0.99 and the equilibrium adsorption data were fitted to the Langmuir isotherm except AC600,2.0.

Keywords: Apricot Stones, Activated Carbon, Adsorption, Kinetic, Phenol

Please cite this article as: N. Jansri and M. Santikunaporn, "The studies of carbonization temperature and amount of phosphoric acid on phenol adsorption on activated carbon prepared from apricot stones," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 1, pp. 26-37, Jan.-Mar. 2022 (in Thai).



1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยรับแนวคิดขยะเหลือศูนย์ (Zero Waste Management) ซึ่งถือว่าขยะยังมีมูลค่าทางเศรษฐกิจ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อลดปริมาณขยะ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดให้น้อยที่สุด บริษัท ดอยคำผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด เป็นบริษัทที่แปรรูปผลไม้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ผลไม้อบแห้ง และน้ำผลไม้เข้มข้น บัวยเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่มีความนิยมในการบริโภค และมีความต้องการในการผลิตเป็นอันดับต้นๆ ของโรงงาน แต่กระบวนการผลิตบัวยอบแห้งก่อให้เกิดของเสียและยากต่อการกำจัด ซึ่งคือ เม็ดบัวย โดยมีปริมาณสูงถึง 16,800 กิโลกรัมต่อปี ทางบริษัทดอยคำได้มีการนำเนื้อด้านในของเม็ดบัวยมาสกัดเป็นน้ำมัน แต่เปลือกของเม็ดบัวยไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งนี้ เปลือกเม็ดบัวยเป็นวัสดุตั้งต้นที่มีราคาถูกที่เหมาะสมต่อการนำไปเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ และมีประสิทธิภาพมากพอต่อการนำไปทำเป็นวัสดุดูดซับ [1]

ถ่านกัมมันต์ คือ รูปแบบของคาร์บอนที่ผ่านการแปรรูปให้มีรูพรุนขนาดเล็กบนพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้เหมาะต่อการดูดซับหรือเกิดปฏิกิริยาเคมี [2] ซึ่งกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ถูกแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน และขั้นตอนการปรับสภาพผิว สำหรับขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการเผาภายใต้สภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน [3] ส่วนขั้นตอนการปรับสภาพผิวถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางกายภาพและการปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางเคมี สำหรับการปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางกายภาพ ทำได้โดยการใช้ไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส และใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันระหว่าง 400 ถึง 850 องศาเซลเซียส ส่วนการปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางเคมี ทำได้โดยการจุ่มวัสดุตั้งต้นในสารละลายกรด หรือด่าง เช่น กรดฟอสฟอริก ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และทำการคาร์บอนไนเซชันในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส [4] การปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางเคมีมีข้อดีมากกว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น ใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันที่ต่ำกว่า

ได้อัตราส่วนร้อยละสูง และมีโครงสร้างรูพรุนดีกว่า กรดฟอสฟอริก และซิงค์คลอไรด์ได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5] อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีขายอยู่ทั่วไปในปัจจุบันค่อนข้างมีราคาสูง [6] ซึ่งสาเหตุจากวัสดุตั้งต้นในการผลิตเป็นวัสดุที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และมีราคาแพง เช่น ถ่านหิน [7] นักวิจัยหลายท่านจึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุตั้งต้นที่สามารถทดแทนได้ และมีราคาดันทุนที่ค่อนข้างต่ำ โดยวัสดุตั้งต้นส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมทางการเกษตร หรือจากขยะทางการเกษตร เช่น ถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วพีแคน และแอลมอนต์เพื่อใช้ในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย [8] ถ่านกัมมันต์จากเม็ดมะขามเพื่อใช้ในการดูดซับเหล็กไอออนจากสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ [9] และถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด [10]

พินอลและสารประกอบฟีนอลิกเป็นสารอันตรายอันดับต้นๆ ที่ปนเปื้อนอยู่มากในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากพินอลถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมเคมีและกลุ่มปิโตรเคมี นอกจากนี้พินอลยังมีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิต หากมีการสัมผัสถูกผิวหนังอาจทำให้เกิดบาดแผลไหม้ และหากมีการซึมเข้าสู่ร่างกายอาจส่งผลให้เกิดอาการปวดหัว คลื่นไส้ วิงเวียนศีรษะ รวมไปถึงเกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ [11] ทั้งนี้ กระทรวงอุตสาหกรรมได้มีการกำหนดปริมาณการปนเปื้อนของสารพินอลทั้งในดิน และน้ำใต้ดินบริเวณโรงงานได้สูงสุดไม่เกิน 72 มิลลิกรัมต่อลิตร [12] ดังนั้น อุตสาหกรรมเคมีและกลุ่มปิโตรเคมีจึงมีความจำเป็นในการลดปริมาณการปนเปื้อนสารพินอล วิธีการสำหรับกำจัดสารพินอลที่ปนเปื้อนในน้ำนั้นสามารถกระทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่เป็นที่นิยม คือ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง และมีกระบวนการไม่ซับซ้อน

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการเพิ่มมูลค่า และลดผลกระทบของเม็ดบัวยที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม เนื่องจากเม็ดบัวยค่อนข้างแข็ง มีขนาดเล็ก และมีปริมาณมาก จึงก่อให้เกิดการอุดตันในระบบบำบัดน้ำทิ้ง โดยศึกษาสมบัติของถ่าน

กัมมันต์ที่เตรียมจากเม็ดบ๊วยด้วยวิธีการปรับสภาพผิวด้วยกรดฟอสฟอริกต่อความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลในน้ำ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการคาร์บอนเซชันและอัตราส่วนของกรดต่อปริมาณเม็ดบ๊วย ซึ่งอาจมีผลต่ออัตราส่วนร้อยละของผลผลิตและความเป็นรูพรุน รวมไปถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสารฟีนอล

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

เม็ดบ๊วยซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับการเตรียมน้ำกัมมันต์ได้รับจากบริษัท ดอยคำผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด ซึ่งก่อนการนำมาใช้ต้องผ่านการล้างน้ำเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และอบให้แห้งก่อนนำไปกะเทาะแยกเพื่อเอาเนื้อด้านในออกก่อน หลังจากนั้นนำไปล้างและอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้งาน ส่วนสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกรดออร์โท-ฟอสฟอริก (Ortho-Phosphoric Acid) โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium Thiosulfate) และกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) จาก Carlo Erba โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide) โพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium Iodate) และเมทิลีนบลู (Methylene Blue) จาก Ajax 2.0 นอร์มอล โพลิน-ซีโอคาตู ฟีนอล (2.0 N FCP Reagent) จาก Srlchem 0.1 นอร์มอล ไอโอดีน (0.1 N Iodine) และฟีนอล (Phenol) ความบริสุทธิ์ 99% จาก Panreac ซึ่งสารเคมีดังกล่าวเป็นเกรดอุตสาหกรรมและเกรดวิเคราะห์

2.2 การเตรียมน้ำกัมมันต์

นำเม็ดบ๊วยที่กะเทาะแล้ว 50 กรัม จุ่มแช่กับกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 85 ร้อยละโดยมวล ที่อัตราส่วนโดยมวลของเม็ดบ๊วยกับกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 1 : 1.0, 1 : 1.5 และ 1 : 2.0 นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองและนำส่วนของเม็ดบ๊วยไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้ถูกนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชคงที่ หลังจากนั้นให้อบที่ 110 องศาเซลเซียส นาน

24 ชั่วโมง บดถ่านกัมมันต์และนำไปคัดแยกขนาดผ่านตะแกรงร่อน ขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์ที่เลือกใช้คือ 160 ถึง 250 ไมโครเมตร (ทำการเตรียมซ้ำ 3 ครั้ง)

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

2.3.1 การหาค่าความชื้น

การหาค่าความชื้นของถ่านกัมมันต์สามารถทำได้ด้วยเครื่องวัดค่าความชื้น (A&E LAB DSH-50-1) โดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิเป้าหมายเป็น 110 องศาเซลเซียส จากนั้นชั่งถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม ใส่ลงไปในภาชนะตัวอย่าง ปิดฝาเครื่อง กดเริ่มการวิเคราะห์ และบันทึกผล วัดค่าซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

2.3.2 การหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point Zero Charge; pHPZC)

นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จำนวน 50 มิลลิลิตร มาใส่ในขวดปิดฝา จำนวน 5 ขวด โดยแต่ละขวดมีค่าพีเอชแตกต่างกัน เดิมถ่านกัมมันต์ 0.25 กรัม ใส่ในแต่ละขวด นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อวินาที ที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการกรองและวัดค่าพีเอชของสารตัวอย่างที่ได้ โดยทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

2.3.3 ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number)

การหาไอโอดีนนัมเบอร์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นการหาปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม) ในงานวิจัยนี้ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ถูกนำไปวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D4607-14 [13] โดยมีรายละเอียดดังนี้ ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการอบปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10 มิลลิลิตร แกว่งขวดเบาๆ เพื่อให้ถ่านกัมมันต์ชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้า และซิลิเฟอ์ ทั้งไว้ให้เย็นจากนั้นเติมน้ำกลั่นไอโอดีนความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดฝาและเขย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 วินาที กรองแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต และ



คำนวณหาไอโอดีนนับเบอร์ การศึกษาการดูดซับไอโอดีนนั้น จะทำการศึกษาซ้ำ 3 ครั้ง

2.4 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์

การศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ เป็นการศึกษารูปร่างสัณฐานภายนอกและลักษณะ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (JEOL JSM-7800F)

2.5 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวบีอีที

พื้นที่ผิวบีอีทีและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ถูก วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว Micromeritics รุ่น TriStar II3020

2.6 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์

2.6.1 การดูดซับสีเมทิลีนบลู

เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 500, 750, 1,000, 1,250 และ 1,500 มิลลิกรัมต่อกรัม จำนวนอย่างละ 50 มิลลิลิตร เติมน้ำ 0.25 กรัม ของถ่านกัมมันต์ลงในขวดที่บรรจุ สารละลายดังกล่าว แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบ ต่อนาที ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาต่างๆ จนกระทั่ง เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ จากนั้นนำสารละลายที่ได้ มากรองและตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (UV-VIS, Hanon) ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร การศึกษาดังกล่าวถูกทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

2.6.2 การดูดซับสารฟีนอล

ใส่ถ่านกัมมันต์ 0.1 กรัม ลงในขวดที่บรรจุสารละลายฟีนอลความเข้มข้นต่างๆ (100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร) จำนวน 50 มิลลิลิตร ที่มีค่าพีเอชต่างๆ กัน (พีเอชเท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10) นำของผสมดังกล่าวไป เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ที่ 30 องศาเซลเซียส พร้อมจับเวลา จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (600 นาที) หลังจากนั้นนำสารตัวอย่างที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง) และคำนวณหาปริมาณ

การดูดซับของสารฟีนอลจากสมการที่ (1)

$$q_e \left(\frac{mg}{g} \right) = \frac{(C_0 - C_e)}{M_{AC}} \times V \quad (1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณการดูดซับสารฟีนอล (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_0 และ C_e คือ ความเข้มข้นสารฟีนอลเริ่มต้นและที่สมดุล ของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ V คือ ปริมาตรสาร ฟีนอล (ลิตร)

ไอโซเทอมของการดูดซับสารฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้จากเม็ดบวีย ถูกวิเคราะห์โดยใช้การดูดซับแบบ แลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และแบบ ฟรุนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m \times K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารฟีนอลที่สมดุลของ การดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) q_m คือ ปริมาณสูงสุดของสาร ฟีนอลที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_e คือ ปริมาณสารฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์ และ K_F คือ ค่าคงที่ การดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้ถูกศึกษาภายใต้โมเดลที่แตกต่างกัน 2 โมเดล คือ อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order Kinetic Model) และ อันดับสองเทียม (Pseudo-second-order Kinetic Model) ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 \times t}{2.303} \quad (4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \times q_e^2} + \frac{1}{q_e} \times t \quad (5)$$



(ก) เม็ดบั่วยที่ผ่านการกะเทาะ



(ข) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเม็ดบั่วย

รูปที่ 1 ลักษณะของเม็ดบั่วยและถ่านกัมมันต์

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) q คือ ปริมาณของสารฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ชั่วโมง⁻¹) k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง) และ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

3. ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเม็ดบั่วย

ในงานวิจัยนี้เม็ดบั่วยที่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ได้รับจากโรงงานแปรรูปผลไม้ ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้การปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางเคมีด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก เนื่องจากเป็นสารที่ได้รับความนิยมดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ธาตุองค์ประกอบของวัสดุทางการเกษตร

วัสดุตั้งต้น	ร้อยละขององค์ประกอบธาตุ (%)					อ้างอิง
	C	H	N	O	S	
เม็ดบั่วย	49.8	5.8	5.4	38.9	0.1*	งานวิจัย [14]
เม็ดบั่วย	51.5	6.3	0.2	41.9	0.1	
เม็ดเชอร์รี่	53.9	7.1	0.3	38.4	0.3	
เม็ดองุ่น	55.4	7.0	1.5	35.9	0.2	
เปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์	67.5	5.7	1.0	25.8	-	[15]
กะลา มะพร้าว	48.1	7.7	43.7	0.5		[16]

*คำนวณจากผลต่าง

จากตารางที่ 1 เม็ดบั่วยแห้งที่นำมาใช้เตรียมเป็นถ่านกัมมันต์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนร้อยละ 49.8 ไฮโดรเจนร้อยละ 5.8 ไนโตรเจนร้อยละ 5.4 และออกซิเจนร้อยละ 38.9 พบว่า ปริมาณของธาตุคาร์บอนที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุทางการเกษตรอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ได้

3.2 ผลปริมาณสารละลายกรดและอุณหภูมิคาร์บอนในเซชันต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติบางประการของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ไอไอดินนัมเบอร์ และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่า ปริมาณร้อยละผลผลิตซึ่งคำนวณจากน้ำหนักแห้งของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเม็ดบั่วยด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชัน และปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดนั้นส่วนใหญ่ได้ปริมาณใกล้เคียงกัน ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 48.16 ถึง 53.29 โดยที่ปริมาณความชื้นของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันสูงขึ้น เนื่องจากสารระเหยง่าย (Volatile Matter) ที่มีอยู่ในเปลือกของเม็ดบั่วยเกิดการระเหยออกไป จึงทำให้ค่าความชื้นภายในตัวถ่านกัมมันต์นั้นลดลง นอกจากนี้ การ



ตารางที่ 2 ปริมาณ ความชื้น ค่าประจุผิวเป็นศูนย์ และค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเม็ดบว้ย

ตัวอย่าง	ร้อยละผลผลิต (%)	ความชื้น (%)	ค่าประจุผิวเป็นศูนย์	ไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	การดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
AC400,1.0	53.03 ± 0.06	7.24 ± 0.24	2.37 ± 0.04	687.94 ± 18.53	118.35 ± 6.44
AC400,1.5	53.29 ± 0.02	6.14 ± 0.22	2.05 ± 0.03	692.55 ± 14.88	118.84 ± 6.74
AC400,2.0	49.12 ± 0.11	7.28 ± 0.35	2.61 ± 0.01	704.75 ± 16.45	112.79 ± 1.46
AC500,1.0	48.18 ± 1.67	6.05 ± 0.30	2.33 ± 0.01	699.96 ± 19.46	111.54 ± 1.43
AC500,1.5	49.01 ± 2.53	6.95 ± 0.29	2.54 ± 0.02	706.82 ± 13.52	129.88 ± 1.69
AC500,2.0	48.65 ± 2.22	6.90 ± 0.15	2.54 ± 0.02	732.33 ± 10.08	123.55 ± 4.10
AC600,1.0	50.89 ± 0.03	6.09 ± 0.32	2.53 ± 0.01	511.63 ± 10.73	80.44 ± 7.13
AC600,1.5	52.86 ± 0.40	4.25 ± 0.28	2.24 ± 0.03	492.86 ± 5.85	86.33 ± 6.77
AC600,2.0	52.89 ± 0.68	5.22 ± 0.23	2.38 ± 0.02	428.94 ± 7.69	73.07 ± 3.00

ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดยังส่งผลให้ค่าประจุผิวเป็นศูนย์อยู่ในช่วงค่าที่ต่ำ (2.05 ถึง 2.61) โดยอุณหภูมิในการคาร์บอนเซชัน และปริมาณกรดไม่ส่งผลต่อค่าประจุผิวเป็นศูนย์

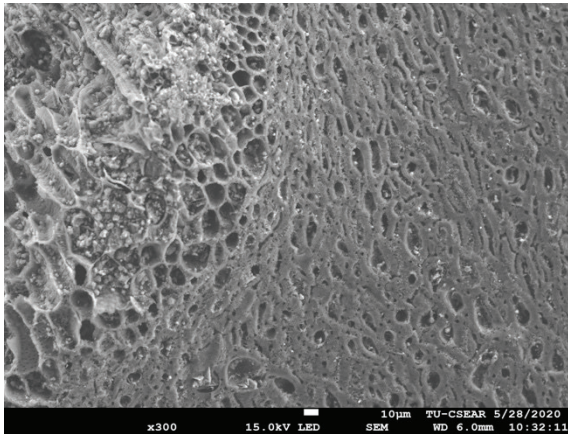
สำหรับการวิเคราะห์ค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้งไอโอดีนนัมเบอร์ และการดูดซับเมทิลีนบลู เป็นการศึกษาเพื่อหาความสามารถในการดูดซับ โดยปริมาณไอโอดีนนัมเบอร์สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 นาโนเมตร) ในขณะที่ปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูจะบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับโมเลกุลขนาดกลาง (ระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร) [17] จากการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณกรดและอุณหภูมิในการคาร์บอนเซชันที่ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่ 400 องศาเซลเซียส มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ในช่วง 687.94 ถึง 704.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนที่ 500 องศาเซลเซียส มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงถึง 699.96 ถึง 732.33 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนเซชันเป็น 600 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลูลดลง และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณกรดจาก 1 : 1 เป็น 2 : 1 กลับทำให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดลง จาก 511.63 เป็น 428.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้ อาจเกิดจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น และปริมาณกรดที่สูง

เกินไปทำให้โครงสร้างของรูพรุนถูกทำลาย โดยโครงสร้างของรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดกลางโดนทำลายกลายเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งเห็นได้ชัดจากรูปที่ 2 รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัยนี้

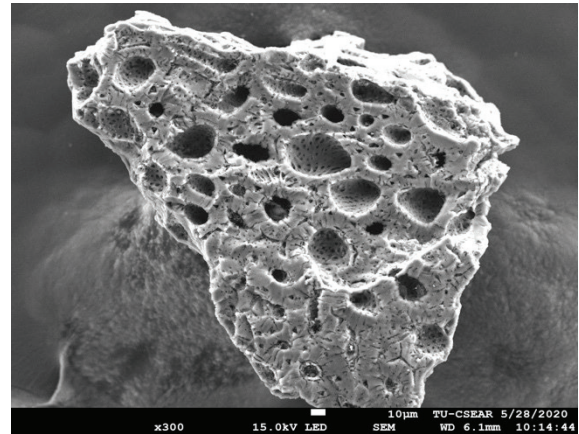
นอกจากนี้ เมื่อนำ AC500,2.0 มาวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวบีเอที ปรากฏว่า AC500,2.0 มีปริมาณพื้นที่ผิวสูงถึง 453.36 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดของรูพรุน 2.36 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรูพรุนที่มีขนาดค่อนข้างเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2 (ค)

3.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์

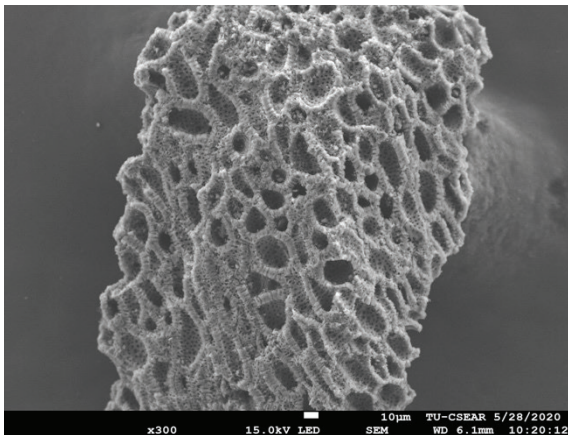
รูปที่ 2 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเม็ดบว้ยที่อุณหภูมิคาร์บอนเซชัน 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส และปริมาณกรดในการปรับสภาพผิวที่อัตราส่วน 1 : 2.0 เปรียบเทียบกับถ่านที่ผ่านการคาร์บอนเซชันที่ 500 องศาเซลเซียส และไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรด จากรูปที่ 2 (ก) พบว่า ถ่านที่ทำการคาร์บอนเซชันที่ 500 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างของรูพรุนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย และไม่มีโพรงเกิดขึ้น ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ถูกคาร์บอนเซชันที่ 400 องศาเซลเซียส และถูกปรับสภาพผิวด้วยกรดที่อัตราส่วน 1 : 2.0 พบว่า เริ่มมีโครงสร้างของรูพรุนเกิดขึ้น และมีรูพรุนภายในโพรงดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) สำหรับถ่านกัมมันต์



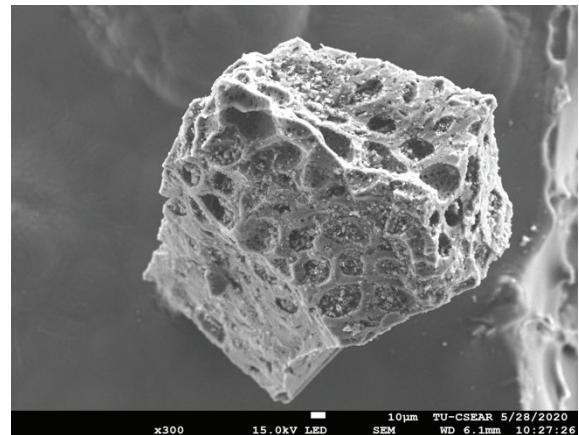
(ก)



(ข)



(ค)



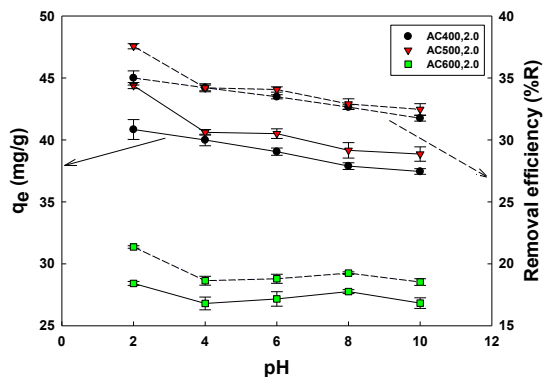
(ง)

รูปที่ 2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (ก) ถ่านที่ทำการคาร์บอนไนซ์ที่ 500 องศาเซลเซียส (ข) AC400,2.0 (ค) AC500,2.0 และ (ง) AC600,2.0

ที่ทำคาร์บอนไนซ์ที่ 600 องศาเซลเซียส และถูกปรับสภาพผิวด้วยกรดที่อัตราส่วน 1 : 2.0 ดังรูปที่ 2 (ง) พบว่า โครงสร้างของรูพรุนถูกทำลายซึ่งคาดว่าจากการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้โครงสร้างรูพรุนต้นและไม่มีโพรงเกิดขึ้น ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ถูกคาร์บอนไนซ์ที่ 500 องศาเซลเซียส และถูกปรับสภาพผิวด้วยกรดที่อัตราส่วน 1 : 2.0 พบว่า มีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นภายในโพรงด้านในของถ่านกัมมันต์และมีการพัฒนาของโครงสร้างของรูพรุนที่ดีที่สุด ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2 (ค) ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมที่สภาวะนี้จึงมีปริมาณพื้นที่ผิวและไอโอดีนัมเบอร์ค่อนข้างสูง

3.4 การดูดซับสารฟีนอล

จากผลการศึกษาในเบื้องต้น ถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมด้วยอัตราส่วน 1 : 2.0 ที่เตรียมด้วยอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่างกันถูกนำมาศึกษาความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลเนื่องจากค่าไอโอดีนัมเบอร์ ค่าการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูและลักษณะพื้นผิวมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมด้วยอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชัน 500 องศาเซลเซียส และที่อัตราส่วน 1 : 2.0 (AC500,2.0) ให้ค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงที่สุด ซึ่งอาจบ่งบอกได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่สภาวะนี้สามารถดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กได้ดี

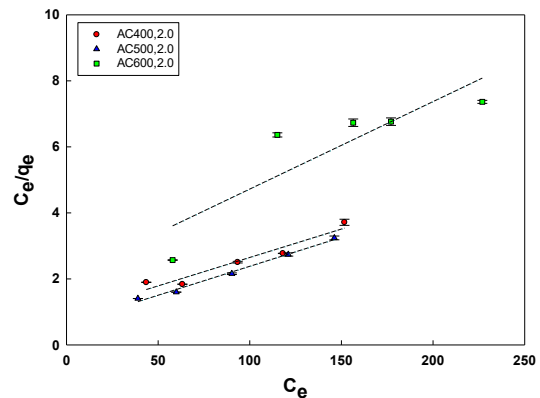


รูปที่ 3 ผลของค่าพีเอชของสารละลายต่อปริมาณการดูดซับ และประสิทธิภาพในการดูดซับภายใต้สภาวะสมดุลที่ 30 องศาเซลเซียส

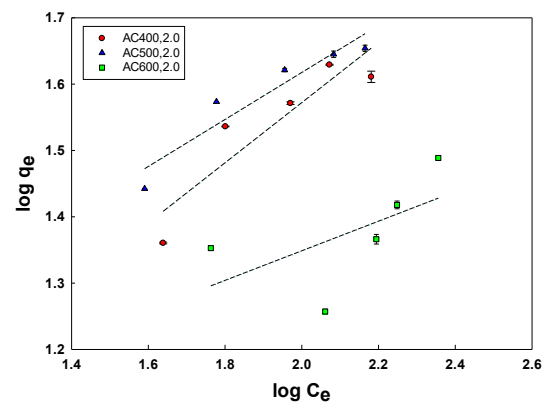
การดูดซับสารฟีนอลจะสามารถดูดซับได้ดีด้วยโครงสร้างของรูพรุนที่มีขนาด 0.8 ถึง 1.4 นาโนเมตร [18] ดังนั้น ในการศึกษาการดูดซับสารฟีนอลจึงสนใจที่ศึกษาโดยใช้ถ่านกัมมันต์ ที่ถูกเตรียมด้วยอัตราส่วนปริมาณเม็ดบวียต่อปริมาณกรด เป็น 1 : 2.0 และอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

3.4.1 ผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับสารฟีนอล

ค่าพีเอชของสารละลายส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีผลต่อค่าผลรวมประจุทั้งในสารฟีนอลและถ่านกัมมันต์ จากรูปที่ 3 ซึ่งแสดงถึงผลของค่าพีเอชของสารละลายต่อการดูดซับสารฟีนอล และประสิทธิภาพในการดูดซับ ภายใต้สภาวะสมดุลที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์อยู่ในช่วง 2.05 ถึง 2.61 ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับที่สมดุลและประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดต่ำลง เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากสารละลายฟีนอลมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนๆ หากมีการปรับค่าพีเอชที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเกิดการแตกตัวจากวงแหวนของฟีนอล จึงอาจทำให้ความสามารถในการดูดซับลดต่ำลง เพราะหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดการแตกตัวอาจเกิดแรงผลักกันกับหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุเป็นลบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีสาเหตุมาจากการปรับค่าพีเอชที่สูงกว่าค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ [19]



(ก) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์



(ข) ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

รูปที่ 4 ไอโซเทอมการดูดซับสารฟีนอลของถ่านกัมมันต์ที่ 30 องศาเซลเซียส

3.4.2 ไอโซเทอมของการดูดซับสารฟีนอล

เมื่อนำข้อมูลการดูดซับของสารฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมจากเม็ดบวียโดยใช้อัตราส่วนปริมาณเม็ดบวียต่อปริมาณกรดเป็น 1 : 2.0 และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชัน ต่างๆ กัน ภายใต้สภาวะการดูดซับที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นเริ่มต้น ต่างๆ กัน โดยเปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับ 2 แบบ ซึ่ง คือ แบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช ดังแสดงในรูปที่ 4 และ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากสมการที่ (2) และ (3) ถูกแสดงใน ตารางที่ 3 พบว่า การดูดซับสารละลายฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

ตารางที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับสารฟีนอลแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

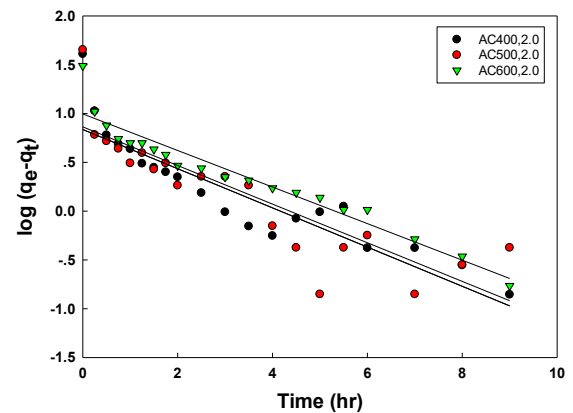
ตัวอย่าง	แลงเมียร์ไอโซเทอม			ฟรุนดลิชไอโซเทอม			อ้างอิง
	K_L	q_m	R^2	K_F	n	R^2	
AC400,2.0	0.019	58.140	0.937	4.620	2.204	0.830	งานวิจัย
AC500,2.0	0.028	57.143	0.991	8.108	2.822	0.901	
AC600,2.0	0.013	37.736	0.771	7.989	4.482	0.356	
Samla coal	0.008	13.280	0.968	1.442	0.318	0.944	[20]
Residual Samla coal	0.013	45.450	0.935	6.357	0.273	0.933	
CS850A	0.019	205.842	0.938	37.111	3.668	0.934	[16]

มากกว่าแบบฟรุนดลิช โดยเฉพาะที่อุณหภูมิคาร์บอนโนเซชัน 400 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Mohd Din และคณะ [16] และ Ahmaruzzaman และ Sharma [20] ส่วนที่อุณหภูมิคาร์บอนโนเซชัน 600 องศาเซลเซียส การดูดซับที่ได้ไม่สอดคล้องกับไอโซเทอมทั้งสองแบบ ซึ่งอาจเนื่องมาจากความเสียหายของรูพรุนที่เกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น

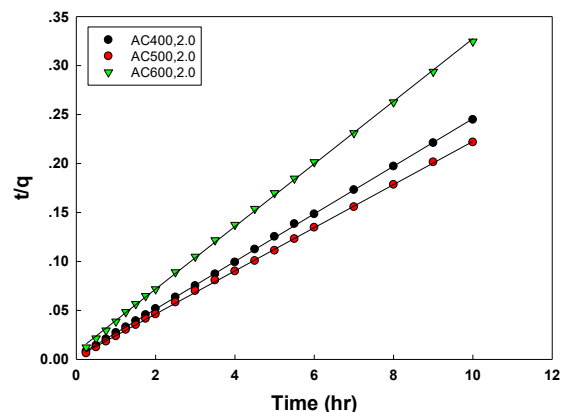
3.4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารฟีนอล

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารฟีนอลบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการใช้อุณหภูมิคาร์บอนโนเซชันต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งถูกประเมินด้วยโมเดลอันดับหนึ่งและอันดับสองเทียม ดังแสดงในรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า การดูดซับสารฟีนอลของถ่านกัมมันต์ทั้งสามเป็นไปตามโมเดลอันดับสองเทียม (ค่า R^2 เท่ากับ 0.99 ซึ่งใกล้เคียง 1.0) ดังแสดงในตารางที่ 4 นั้นแสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการดูดซับทั้งทางกายภาพและทางเคมี นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ที่ได้จากโมเดลอันดับสองเทียมพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่คาร์บอนโนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือที่ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับค่าไอโอดีนนัมเบอร์และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู นั่นคือ ความเป็นรูพรุนค่อนข้างสูง อีกทั้งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Mohd Din และคณะ [16] และ Hameed และคณะ [19] พบว่า เป็นไปตามโมเดลอันดับสองเทียมเช่นเดียวกัน โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีร่วมกัน



(ก) อันดับหนึ่งเทียม



(ข) อันดับสองเทียม

รูปที่ 5 โมเดลการดูดซับสารฟีนอลบนถ่านกัมมันต์



ตารางที่ 4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	$q_{e,exp}$	อันดับหนึ่งเทียม			อันดับสองเทียม			อ้างอิง
		$q_{e,cal}$	k_1	R^2	$q_{e,cal}$	k_2	R^2	
AC400,2.0	40.840	13.740	0.921	0.865	41.322	0.209	1.000	งานวิจัย
AC500,2.0	45.090	9.341	0.589	0.556	44.444	0.338	0.999	
AC600,2.0	30.811	12.238	0.608	0.788	30.030	0.205	1.000	
CS850A	-	29.166	0.168	0.969	133.333	0.019	0.999	[16]
Biomass	140.680	43.920	0.285	0.9710	142.860	0.018	0.999	[19]

4. สรุป

เม็ดบิวยเป็นวัสดุที่สามารถนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ ด้วยการปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางเคมีซึ่งให้ผลได้มากกว่าร้อยละ 48 จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกพบว่า อุณหภูมิคาร์บอนเซชัน และปริมาณกรดส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ อุณหภูมิคาร์บอนเซชัน 500 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของปริมาณเม็ดบิวยต่อปริมาณกรดเท่ากับ 1 : 2.0 โดยให้ค่าไอโอดีนัมเบอร์ และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู เท่ากับ 732.33 และ 123.55 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สามารถนำมาใช้ในการดูดซับสารฟีนอลได้ดี โดยความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลจะมีค่าลดลง เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะที่ค่าพีเอชมีค่ามากกว่าค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ สำหรับไอโซเทอมของการดูดซับสารฟีนอลเป็นแบบแลงเมียร์ และการดูดซับดังกล่าวเป็นไปตามโมเดลอันดับสองเทียม ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อการใช้งานจริงกับระบบบำบัดน้ำทิ้งหรืออากาศเสียของโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย ปี 2562 และบริษัท ดอยคำผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด ที่สนับสนุนวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนการศึกษา ระดับมหาบัณฑิต

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Abbas and M. Trari, "Kinetic, equilibrium and thermodynamic study on the removal of Congo red from aqueous solutions by adsorption onto apricot stone," *Process Safety and Environment Protection*, vol. 98, pp. 424–436, 2015.
- [2] Wikipedia. (2020, May). Activated carbon. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Activated_carbon
- [3] K. S. Ukanwa, K. Patchigolla, R. Sakrabani, E. Anthony, and S. Mandavgane, "A review of chemicals to produce activated carbon from agricultural waste biomass," *Sustainability*, vol. 11, pp. 6204–6239, 2019.
- [4] H. Hadoun, Z. Sadaoui, N. Souami, D. Sahel, and I. Toumert, "Characterization of mesoporous carbon prepared from date stems by H3PO4 chemical activation," *Applied Surface Science*, vol. 280, pp. 1–7, 2013.
- [5] W. C. Lim, C. Srinivasakannan, and N. Balasubramanian, "Activation of palm shells by phosphoric acid impregnation for high yielding activated carbon," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 88, pp. 181–186, 2010.
- [6] S. Chakraborty, S. De, S. DasGupta, J. K. Basu,

- “Adsorption study for the removal of basic dye: Experimental and modeling,” *Chemosphere*, vol. 58, pp. 1079–1086, 2005.
- [7] M. J. Martin, A. Artola, M. D. Balaguer, and M. Rigola, “Activated carbons developed from surplus sewage sludge for the removal of dyes from dilute aqueous solutions,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 94, no. 3, pp. 231–239, 2003.
- [8] R. Bansode, J. N. Losso, W. E. Marshall, R. M. Rao, and R. J. Portier, “Adsorption of volatile organic compounds by pecan shell- and almond shell-based granular activated carbons,” *Bioresource Technology*, vol. 90, no. 2, pp. 175–184, 2003.
- [9] S. Mopoung, P. Moonsri, W. Palas, and S. Khumpai, “Characterization and properties of activated carbon prepared from tamarind seeds by KOH activation for Fe(III) adsorption from aqueous solution,” *The Scientific World Journal*, vol. 2015, pp. 1–5, 2015.
- [10] S. Rattanapan, P. Pengjam, and P. Kongsune, “Preparation and characterization of mango-steen peel activated carbon,” *Thaksin University Journal*, vol. 17, no. 3, 2014 (in Thai).
- [11] K. Sanprasert, “Phenol,” in *The Treatment of Chemical Poisoning 1*, 1st ed. Bangkok: We Plus Group (Thailand), 2016 (in Thai).
- [12] Ministry of Industry, “Specify criteria for soil and groundwater contamination,” Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 2016.
- [13] *Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon*, ASTM D4607-14, 2014.
- [14] N. Petrov, T. Budinova, M. Razvigorova, and V. Minkova, “Preparation of activated carbons from cherry stones, apricot stones and grape seeds for removal of metal ions from water,” in *Proceedings 2nd Olle Indstorm Symposium on Renewable Energy-Bioenergy*, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 46–50.
- [15] V. Daptardar, D. Koti, and D. Rajmohan, “Adsorption of BTX vapors on activated carbon pellets prepared from waste cashew nut shell,” *JEST-M*, vol. 4, no. 4, pp. 25–29, 2015.
- [16] A. T. Mohd Din, B. H. Hameed, and A. L. Ahmad, “Batch adsorption of phenol onto physiochemical-activated coconut shell,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, no. 2–3, pp. 1522–1529, 2009.
- [17] D. H. Everett, “Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units, appendix II: Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry,” *Pure and Applied Chemistry*, vol. 31, pp. 577–638, 1972.
- [18] B. Xie, J. Qin, S. Wang, X. Li, H. Sun, and W. Chen, “Adsorption of phenol on commercial activated carbons: Modelling and interpretation,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 3, pp. 789, 2020.
- [19] B. H. Hameed and A. A. Rahman, “Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto activated carbon prepared from biomass material,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 160, no. 2–3, pp. 576–581, 2008.
- [20] M. Ahmaruzzaman and D. K. Sharma, “Adsorption of phenols from wastewater,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 287, no. 1, pp. 14–24, 2005.