

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากน้ำตาลโดยวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมีและไม่โครเวฟ

อดิศักดิ์ จตุรพิริย์* ตฤณ ปฐมนิธิภิญโญ เอกราชนันย์ ไชยชนะ และ ธัญญา เสาวภาคย์

ศูนย์วิจัยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
85 ถนนมาลัยแมน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

รับบทความ 13 สิงหาคม 2563 แก้ไขบทความ 2 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 28 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากน้ำตาลโดยวิธีการกระตุ้นด้วย KOH และการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งใช้พลังงานต่ำกว่ารวมทั้งความร้อนที่เกิดขึ้นยังเกิดอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอว่าการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยเทคนิค BET, SEM และ FTIR พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีพื้นที่ผิวที่มีรูพรุนสูงโดยมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 1,631 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนรวม 1.124 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม โดยมีทั้งรูพรุนขนาดใหญ่และรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ด้วยกัน นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีหมู่ฟังก์ชันเหลืออยู่ หลังจากนั้นจึงนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่าการดูดซับเพิ่มขึ้นตามเวลาและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 8 ชั่วโมง ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ที่มีการดูดซับสูงสุด 370.37 มิลลิกรัมต่อกรัม จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นการดูดซับทางเคมี และจากอุณหพลศาสตร์การดูดซับพบว่าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาดูดความร้อนที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์; กากน้ำตาล; เมทิลีนบลู; การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ

* ผู้มีพันธบัตรประสานงาน โทร: +668 6541 9105, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: adisak_ja@hotmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Adsorption of Methylene Blue Dye on Activated Carbon Prepared from Molasses by Using Chemical and Microwave Activation

Adisak Jaturapiree* Trin Pathomnithipinyo Ekrachan Chaichana and Thanunya Saowapark

Research Center of Agriculture Residue Products and Biomaterials, Faculty of science and technology, Nakhon Pathom Rajabhat
85 Malaiman Road, Muang, Nakhon Pathom 73000

Received 13 August 2020; Revised 2 November 2020; Accepted 28 December 2020

Abstract

This research aims to produce activated carbon from molasses via a chemical activation process with potassium hydroxide (KOH) and a microwave heating process, which consumes less energy and provides more rapid and uniform heat distribution than a conventional heating. The obtained activated carbon was then characterized with BET, SEM and FTIR. It exhibited a large specific surface area of 1,631 m²/g, and a total pore volume of 1.124 cm³/g consisting of mesopore and micropore. In addition, the active functional groups were also found on the surface of the activated carbon. Thus, it was brought for the adsorption test with methylene blue. It was found that the adsorption capacity of the activated carbon increased with time and reached the equilibrium within 8 hours. The adsorption data of the activated carbon were corresponded to Langmuir isotherm with the highest adsorption capacity of 370.37 mg/g. The adsorption kinetic of the activated carbon exhibited pseudo-second order reaction suggesting to the chemisorption phenomenon. From the thermodynamic study, it revealed that the adsorption process were endothermic and spontaneous reactions.

Keywords : Activated Carbon; Molasses; Methylene Blue; Microwave Activation

* *Corresponding Author. Tel.: +668 6541 9105, E-mail Address: adisak_ja@hotmail.com*

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีปัญหาด้านน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นจำนวนมากซึ่งจำเป็นต้องได้รับการแก้ไข เทคนิคการดูดซับเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการบำบัดสีในน้ำทิ้งเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ง่ายและประหยัดโดยวัสดุที่ใช้ดูดซับได้ดี ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งสีดำ มีรูพรุนและพื้นผิวสูง โดยในปัจจุบันนักวิจัยหันมาให้ความสนใจในการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและในอุตสาหกรรมมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ ยกตัวอย่างเช่น ชานอ้อย ชี้อ้อย แกลบ เป็นต้น [1]-[3] เนื่องจากวัสดุดังกล่าวราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งนั้นจำเป็นต้องมีการกระตุ้นเพื่อให้ได้พื้นที่ผิวและจำนวนรูพรุนสูง โดยการกระตุ้นที่สำคัญจะเป็นการกระตุ้นด้วยสารเคมี กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารเคมีนั้นจะเริ่มจากการนำวัตถุดิบมาคลุกเคล้ากับสารเคมีที่อยู่ในสถานะสารละลายตั้งทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นนำไปอบเพื่อให้แห้ง ต่อจากนั้นจะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 500-900 องศาเซลเซียส สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ KOH, $ZnCl_2$, H_3PO_4 เป็นต้น [4], [5]

นอกจากนี้ในปัจจุบันเทคนิคการให้ความร้อนเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์นั้นได้มีการพยายามที่จะใช้คลื่นไมโครเวฟ มาให้ความร้อนแทนกระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมซึ่งเป็นการให้ความร้อนด้วยเตาอบ เนื่องจากการใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อนนั้นจะใช้พลังงานต่ำกว่า ความร้อนเกิดขึ้นจะเกิดจากด้านในและอุณหภูมิสม่ำเสมอมากกว่าแบบดั้งเดิมที่ให้ความร้อนจากภายนอกแพร่เข้าสู่ด้านในเนื้อวัสดุ ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความร้อนภายนอกและภายในเนื้อวัสดุ การให้ความร้อนแบบไมโครเวฟนี้ส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวที่สูงและปริมาตรรูพรุนสูง [6]

งานวิจัยนี้ได้นำกากน้ำตาลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทราย มีลักษณะเป็น

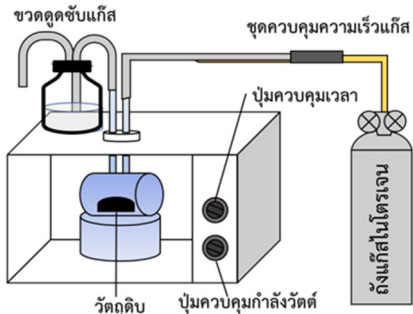
ของเหลวที่มีสีน้ำตาลดำ มีความหนืด เข้มข้นสูงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลาย ใช้ผลิตเป็นปุ๋ย และใช้เป็นอาหารสัตว์แต่อย่างไรก็ตามในองค์ประกอบของกากน้ำตาลจะประกอบด้วยน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ โดยน้ำตาลในโครงสร้างทางเคมีจะมีธาตุคาร์บอนองค์ประกอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการเปลี่ยนสภาพกากน้ำตาลให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วย KOH ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ หลังจากนั้นถ่านกัมมันต์จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นพร้อมทั้งถูกนำไปประยุกต์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งข้อมูลจากการวิจัยจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นแก่ทางอุตสาหกรรมในการนำผลพลอยได้จากการผลิตมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์และการนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อม

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์

นำกากน้ำตาลที่ซื้อมาจากชุมชนปทุมอโศก อ.เมือง จ.นครปฐม ไปเตรียมให้เป็นผงกากน้ำตาล โดยการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำผงกากน้ำตาลมาเปลี่ยนเป็นผงคาร์บอนโดยการนำมาเผาภายใต้สถานะไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ที่ 400 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการเผา 4 ชั่วโมง ปล่องทิ้งให้เย็นในเตาเผา หลังจากนั้นนำผงคาร์บอนที่ได้มาผสมกับ KOH ในอัตราส่วนระหว่างผงคาร์บอนกับสารเคมีเป็นหนึ่งต่อสาม โดยนำถ่าน 4 กรัม มาผสมกับกับสารเคมีจำนวน 12 กรัม แล้วเติมน้ำ 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารทั้งหมดมาควนที่ 750 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟในสถานะไนโตรเจนดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ เป็นเวลา 12 นาที รอจนกระทั่งเย็นหลังจากนั้นล้างด้วย สารละลาย 0.1 M HCl ตามด้วยน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่ง pH ของสารละลาย

เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบจนแห้งแล้วนำไปเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อทำการทดลองดูดซับต่อไป



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Nicolet iS5 FTIR Spectrometer, Thermo Scientific, USA) ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ในโหมด transmittance ที่อุณหภูมิห้องในช่วงคลื่นตั้งแต่ $4,000-400\text{ cm}^{-1}$ ที่ความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 1 cm^{-1} วิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนบนพื้นผิวโดยใช้หลักการการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77K ด้วยเครื่อง Surface Area and Pore Size Analyzer (Autosorb-1, Quantachrome Instruments, USA) สมบัติรูพรุนที่พิจารณา ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) คำนวณโดยใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) พื้นที่ของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore Surface Area) และ ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore Volume) คำนวณจาก t-plot method พื้นที่ผิวภายนอก (External Surface Area) คำนวณจากผลต่างระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับพื้นที่ผิวภายในรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนรวม (Total Pore Volume) คำนวณจากปริมาณการดูดซับไนโตรเจนที่ $p/p_0 = 0.996$ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Diameter) คำนวณจากสมการ $[(4 \times \text{ปริมาตรรูพรุน$

รวม)/พื้นที่ผิวจำเพาะ] ส่วนการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยานั้นจะเริ่มจากนำโดยนำชิ้นงานไปเคลือบด้วยแพลตินัมผสมทอง หลังจากนั้นจึงนำไปศึกษาด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Mira 3, Tescan Orsay Holding, a.s., Czech Republic)

2.3 การศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์

2.3.1 เวลาที่สมดุลในการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมที่สีนบลูที่มีความเข้มข้น 250 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นชั่งถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 0.05 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายสีย้อมที่สีนบลูปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงไป นำมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaking Incubator) ด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ตั้งแต่ 1-24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำสารละลายสีย้อมที่ได้มาแยกออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ด้วยความเร็วรอบ 3,600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนของสารละลายสีที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยใช้เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (T80 UV-Vis Spectrophotometer, PG Instruments, United Kingdom) เพื่อหาความเข้มข้นที่เหลือ ต่อจากนั้นนำความเข้มข้นที่ได้มาค่าความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ที่เวลาต่าง ๆ จากสมการที่ (1)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times \frac{V}{m} \quad (1)$$

$$q_c = \frac{(C_0 - C_c)}{C_0} \times \frac{V}{m} \quad (2)$$

โดยที่

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสีย้อม (มิลลิลิตร)

m คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม)

2.3.2 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ

การทดลองเพื่อศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับของเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ทำเช่นเดียวกับการทดลองหาเวลาที่สมดุลในการดูดซับ แต่เปลี่ยนเวลาในการดูดซับครั้งที่ 8 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่สมดุล และเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเริ่มต้น (C_0) เป็น 100-500 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นนำความเข้มข้นที่เหลือ (C_e) และ ค่าความสามารถดูดซับที่สมดุลซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) มาพลอตกราฟเส้นตรงเพื่อหาค่าคงที่ต่างๆตามสมการแบบจำลองของแลงเมียร์และสมการแบบจำลองของฟรุนดิช ดังสมการ (3) และสมการ (4) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (3)$$

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ความสามารถของการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่สมดุลของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_f คือ ค่าคงที่สมดุลของฟรุนดิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดิช

2.3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ทำเช่นเดียวกับการทดลองหาเวลาที่สมดุลในการดูดซับ แต่เปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการดูดซับเป็น 10-100 นาที หลังจากนั้นนำค่าความเข้มข้นที่เหลือ (C_e) และ ค่าความสามารถดูดซับที่สมดุลที่เวลาต่างๆ (q_t) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) มาพลอตกราฟเส้นตรงเพื่อหาค่าคงที่ต่างๆ ตามสมการแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo First-order) สมการแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo Second-order) ดังสมการ (5) และสมการ (6) ตามลำดับ

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2.303} \right) t \quad (5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที⁻¹)

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

2.3.4 การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ทำเช่นเดียวกับการทดลองหาเวลาที่สมดุล แต่เปลี่ยนเวลาในการดูดซับครั้งที่ 8

ชั่วโมง และเปลี่ยนอุณหภูมิในการดูดซับเป็น 25-55 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำค่าความเข้มข้นที่เหลือ (C_c) และค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_c) ที่ได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาพลอตกราฟเส้นตรงเพื่อหาค่าคงที่ต่างๆจากสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (7) หลังจากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการเส้นตรงได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH^0) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) มาหาค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) จากสมการที่ (8)

$$\log \frac{q_c}{C_c} = \frac{\Delta S^0}{2.303} - \frac{\Delta H^0}{2.303RT} \quad (7)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (8)$$

โดยที่

q_c คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_c คือ ความเข้มข้นสมดุลของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ΔS^0 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (จูลต่อโมล-เคลวิน)

ΔH^0 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (กิโลจูลต่อโมล)

ΔG^0 คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (กิโลจูลต่อโมล)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

3.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์

ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

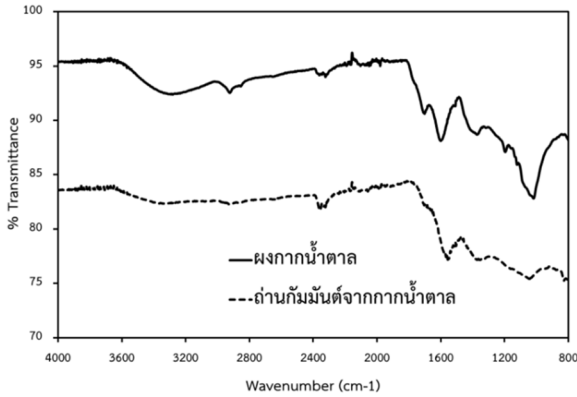
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงถ่านน้ำตาลและถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม

อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) แสดงดังรูปที่ 2 จากรูปจะเห็นได้ว่าผงถ่านน้ำตาลจะพบการสั่นแบบยืดของหมู่ -OH ที่ตำแหน่ง $3300-3400 \text{ cm}^{-1}$ การสั่นแบบยืดของหมู่ -C=O ที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1} การสั่นแบบงอของหมู่ C-O และการยืดของหมู่ C-OH ที่ตำแหน่ง 1010 และ 1370 cm^{-1} ตามลำดับ พิกที่ปรากฏดังกล่าวน่าจะเป็นพิกของน้ำตาลซูโครสที่เป็นองค์ประกอบในถ่านน้ำตาลซึ่งจะสอดคล้องกับหลายๆงานวิจัย [7], [8] แต่หลังจากนำผงถ่านน้ำตาลไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์แล้วพบว่าความเข้มของพิกบางพิกลดลงเช่น พิกการสั่นของหมู่ -OH หมู่ -C=O หมู่ C-O ซึ่งอาจเนื่องมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่อยู่ในถ่านน้ำตาลเมื่อได้รับความร้อนและกระตุ้นด้วยสารเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างในกระบวนการเปลี่ยนผงถ่านน้ำตาลให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งการลดลงดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นทั้งในกระบวนการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟและการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม [9], [10] แต่อย่างไรก็ตามพิกที่ปรากฏอยู่ทำให้ทราบว่ายังมีหมู่ฟังก์ชันปรากฏบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้อาจจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการดูดซับของสีย้อมได้ โดยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์กับหมู่ฟังก์ชันของสีย้อมเมทิลีนบลู [11]

3.1.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุน

ในการทดลองนี้จะวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยการนำไปวิเคราะห์การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K โดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าพื้นที่ของจำเพาะ (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าประมาณ 1,631 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงมากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีพื้นที่ผิวตั้งแต่ 400-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม [12] ส่วนเมื่อพิจารณารูพรุนพบว่าบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ จะมีทั้งรูพรุนขนาดใหญ่ที่ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.472 และขนาดเล็กปริมาตรรู

พรมเท่ากับ 0.652 โดยพบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ย (The Average Pore Diameter) มีค่าเท่ากับ 2.757 นาโนเมตร ซึ่งจัดเป็นขนาดระดับ Mesopore ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเป็น 2-50 นาโนเมตร [13]



รูปที่ 2 สเปกตรัมของผงถ่านคาร์บอนและถ่านกัมมันต์

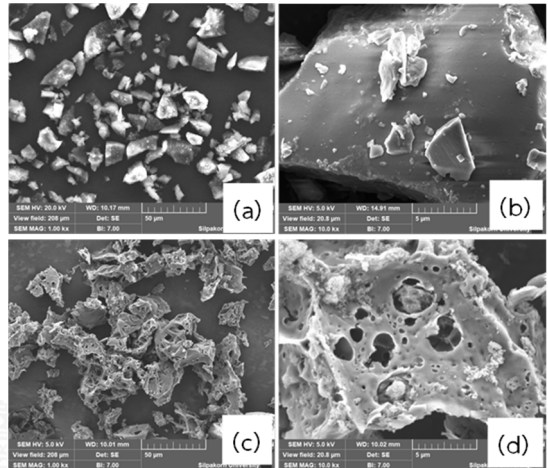
ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	1631
พื้นที่ผิวภายในรูพรุนขนาดเล็ก(m ² /g)	1321
พื้นที่ผิวภายนอก (m ² /g)	310
ปริมาตรรวมของรูพรุน(cm ³ /g)	1.124
ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก(cm ³ /g)	0.652
ปริมาตรรูพรุนภายนอก(cm ³ /g)	0.472
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย(nm)	2.757

3.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

ในการทดลองนี้จะวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนและถ่านกัมมันต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งผลการทดลองแสดงเป็นภาพถ่ายตามรูปที่ 3 จากรูปเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผงถ่านน้ำตาล (รูป a, b) กับถ่านกัมมันต์ (รูป c, d) จะเห็นได้ว่าเมื่อนำผงถ่านน้ำตาลไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์แล้ว รูปร่างลักษณะของผงถ่านน้ำตาลจะเปลี่ยนวัสดุที่ไม่มีรูพรุนกลายเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงขึ้น โดยบนพื้นผิวจะมีรูพรุนที่มีทั้งขนาด

ใหญ่และขนาดเล็กกระจายทั่วพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง BET ซึ่งจากรูป SEM และผลการวิเคราะห์ BET ทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้น่าจะมีสมบัติที่ดีในการประยุกต์เป็นสารดูดซับได้



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของ a) ผงถ่านน้ำตาลที่

กำลังขยาย 1000 เท่า b) ผงถ่านน้ำตาลที่กำลังขยาย 10,000 เท่า c) ถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า d) ถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

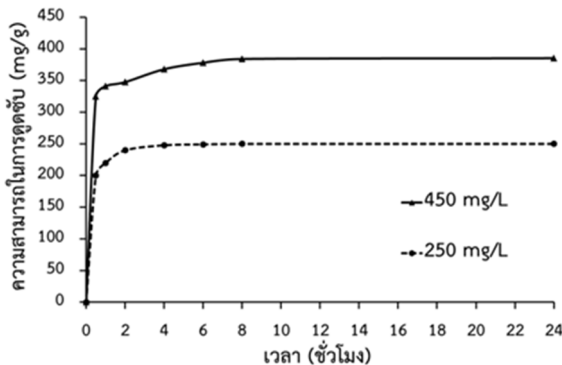
3.2 การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

ในการทดลองนี้จะนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยจะศึกษาปัจจัยของเวลาในการดูดซับ รวมทั้งศึกษาผลของการดูดซับได้แก่การศึกษาไอโซเทอม จลนพลศาสตร์ อุณหพลศาสตร์ในการดูดซับ แสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.1 เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทดลองนี้จะนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับแสดงดังรูป 4 ซึ่งความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูเริ่มต้นที่ใช้ได้แก่ 250 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้นอย่าง

ต่อเนื่อง หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งการดูดซับจะเข้าสู่ภาวะสมดุลหรือความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะคงที่ พบว่าเวลาสมดุล (Equilibrium Time) ของทั้งสองความเข้มข้นจะใกล้เคียงประมาณ 8 ชั่วโมง โดยในช่วงแรกจะเกิดการดูดซับได้รวดเร็วเนื่องจากในช่วงแรกถ่านกัมมันต์ที่พื้นผิวที่ว่างมากในการดูดซับแต่หลังจากเกิดการดูดซับขึ้นพื้นผิวที่ว่างที่ใช้ในการดูดซับจะลดน้อยลงจึงทำให้การดูดซับลดลง จนกระทั่งไม่เหลือพื้นที่ให้เกิดการดูดซับ การดูดซับจึงคงที่ซึ่งก็คือการดูดซับเข้าสู่สมดุลนั่นเอง [14]



รูปที่ 4 ผลของเวลาที่มีต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

3.2.2 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับนั้นเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุล ในสถานะที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมนี้จะใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับรวมทั้งสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งไอโซเทอมที่ศึกษาในการทดลองนี้มี 2 แบบคือ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดิช โดยไอโซเทอมแบบแลงเมียร์จะมีสมมุติฐานว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวของตัวดูดซับในตำแหน่งที่แน่นอนเพียงชั้นเดียว (Monolayer Sorption) บนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว

และระหว่างการดูดซับตัวถูกดูดซับจะไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน ส่วนไอโซเทอมแบบฟรุนดิชจะมีสมมุติฐานว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและการดูดซับจะเกิดเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer Sorption) [15]

ค่าคงที่ต่าง ๆ ของไอโซเทอมทั้งสองแบบที่เกิดจากการถูกดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของทั้งสองไอโซเทอมพบว่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดิช แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จะเป็นแบบชั้นเดียว และความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) ของสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าเท่ากับ 370.37 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับการทดลองอื่น ๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ที่ได้จากไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์		
q_m (mg/g)	K_L (min ⁻¹)	R^2
370.37	27	0.966
ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช		
K_F (mg/g)	n	R^2
290.80	16.03	0.743

3.2.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการทดลองหาความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เพื่อศึกษากลไกการดูดซับของสีย้อมบนผิวของถ่านกัมมันต์ ในการทดลองนี้จะศึกษาจากแบบจำลองแบบหนึ่งเทียม (Pseudo-first Order) และแบบสองเทียม (Pseudo-second Order) สมมุติฐานแบบหนึ่งเทียมเป็นแบบจำลองที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ยังไม่ได้รับการครอบครองจากตัวถูกดูดซับและขั้นตอนการซึมผ่าน

ของตัวถูกดูดซับผ่านชั้น Boundary Layer ที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ เป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of Limiting Step) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับมีแนวโน้มที่จะเป็นแบบแรงดึงดูดทางกายภาพมากกว่าแรงดึงดูดทางเคมี ส่วนสมมติฐานแบบจำลองแบบสองเทียมนั้นเป็นแบบจำลองที่อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของของตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ถูกครอบครองจากตัวถูกดูดซับ และขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of Limiting Step) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับมีแนวโน้มที่จะเป็นแบบแรงดึงดูดทางเคมีมากกว่าทางกายภาพ

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูสูงสุด (q_m) ของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ

วัตถุดิบ	วิธีการให้ความร้อน ขณะ กระตุ้น	ความสามารถ ในการดูดซับ สูงสุด (mg/g)	ที่มา
กากน้ำตาล	ไมโครเวฟ	370.37	งานวิจัยนี้
เปลือกมังคุด	ดั้งเดิม	99.00	[16]
แกลบ	ดั้งเดิม	111.48	[17]
กากตะกอน น้ำเสีย	ดั้งเดิม	131.8	[18]
เปลือกทุเรียน	ดั้งเดิม	289.26	[19]
ก้านฝ้าย	ไมโครเวฟ	315.45	[20]
เส้นใยจากผล ปาล์มน้ำมัน ซีเลื้อย	ไมโครเวฟ	382.32	[21]
	ไมโครเวฟ	462.10	[10]

ผลการทดลองแสดงค่าคงที่ต่างๆ ของจลนพลศาสตร์ทั้งสองแบบที่เกิดจากการดูดซับของสีย้อมบนถ่านกัมมันต์ ดังตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของทั้งแบบจำลอง

จลนพลศาสตร์ทั้งสองแบบพบว่าจลนพลศาสตร์แบบสองเทียมนั้นมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าจลนพลศาสตร์แบบหนึ่งเทียมนอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับที่ได้มาจากการคำนวณตามสมการแบบจำลองต่างๆ ($q_{e,cal}$) กับค่าการดูดซับจากการทดลอง ($q_{e,exp}$) พบว่าค่าการดูดซับจากการคำนวณด้วยแบบจำลองแบบสองเทียมนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าการดูดซับจากการทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากแบบหนึ่งเทียมนั้น แสดงให้เห็นว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมที่ลิบลูของถ่านกัมมันต์จะเป็นแบบสองเทียมนั้นซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลไกการดูดซับน่าจะเป็นการดูดซับทางเคมี

ตารางที่ 4 ค่าคงที่จากจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมน				
C_0 mg/L	$q_e(exp)$ (mg/g)	$q_e(cal)$ (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2
250	246.28	57.56	0.011	0.976
450	357.30	72.62	0.012	0.985
ปฏิกิริยาอันดับสองเทียมน				
C_0 mg/L	$q_e(exp)$ (mg/g)	$q_e(cal)$ (mg/g)	k_2 (g/mg.min)	R^2
250	246.28	233.34	0.0010	0.997
450	357.30	416.60	0.0005	0.995

3.2.4 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

ในการทดลองนี้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH^0) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ได้ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าคงที่จากอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

ΔH^0 (kJ/mol)	ΔS^0 J/(mol. K)	ΔG^0 (kJ/mol)			
		298K	308K	318K	320K
23.74	0.091	-3.38	-4.28	-5.20	-6.11

เมื่อนำผลของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส หรือ 298 ถึง 328 เคลวิน พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับมีค่าเป็นบวกแสดงว่าการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาดูดความร้อน การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับมีค่าเป็นบวกชี้ให้เห็นว่า กระบวนการดูดซับบริเวณผิวของตัวดูดซับ การสลายตัวของสีย้อมที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม มีความไม่เป็นระเบียบ ส่วนการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาการดูดซับสามารถเกิดได้เอง

4. สรุป

จากงานวิจัยพบว่ากากน้ำตาลสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วย KOH และให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้ยังมีหมู่ฟังก์ชันเหลืออยู่ มีพื้นที่ผิวที่สูง มีรูพรุนทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กกระจาย จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้เหมาะสำหรับประยุกต์เป็นตัวดูดซับได้ ดังนั้นต่อมาจึงได้นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่าการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 370.37 มิลลิกรัมต่อกรัม จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาแบบสองเทียม ปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแบบดูดความร้อนและสามารถเกิดขึ้นได้เอง จากผลการทดลองทั้งหมดจึงสรุปได้ว่าการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟจะเป็นทางเลือกวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์ซึ่งวิธีนี้จะใช้พลังงานน้อยกว่า ทำให้มีคุ่มค่าทางการลงทุนมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏ

นครปฐมในการสนับสนุนงบประมาณในการวิจัย สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ในการสนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. P. Singh, D. Mohan, S. Sinha, G. S. Tondon and D. Gosh, "Color removal from wastewater using low-cost activated carbon derived from agricultural waste material," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, pp. 1965–1976, 2003.
- [2] K. Kadirvelu, M. Kavipriya, C. Karthika, M. Radhika, N. Vennilamani and S. Pattabhi, "Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application for the removal of dyes and metal ions from aqueous solutions," *Bioresource Technology*, vol. 87, pp. 129–132, 2003.
- [3] A. Demirbas, "Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: A review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, pp. 1-9, 2009.
- [4] P. González-García, "Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1393-1414, 2018
- [5] M. A. Tadda, A. Ahsan, A. Shitu, M. ElSergany, T. Arunkumar, B. Jose, M. A. Razzaque and N. N. NikDaud, "A review on

- activated carbon: process, application and prospects,” *Journal of Advanced Civil Engineering Practice and Research*, vol. 2, pp. 7-13, 2016.
- [6] M. J. Ahmed, “Application of agricultural based activated carbons by microwave and conventional activations for basic dye adsorption: Review,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, pp. 89-99, 2016.
- [7] K. Legrouri, E. Khouya, M. Oumam, H. Hannache, M. Ezzine, S. Fakhi and N. Hanafi, “Preparation and characterization of activated carbons obtained from molasses by phosphoric acid activation,” *Applied Journal of Environmental Engineering Science*, vol. 4, pp. 352-366, 2018.
- [8] M. Moosavi-Nasab, M. Gavahian, A. R. Yousefi and H. Askari, “Fermentative production of dextran using food industry wastes,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 68, pp. 875-877, 2010.
- [9] E. Pehlivan, “Production and characterization of activated carbon from pomegranate pulp by phosphoric acid,” *Journal of the Turkish Chemical Society Section A*, vol. 5, pp. 1-8, 2018.
- [10] K. Y. Foo and B. H. Hameed, “Mesoporous activated carbon from wood sawdust by K_2CO_3 activation using microwave heating,” *Bioresource Technology*, vol. 111, pp. 425-432, 2012.
- [11] S. Joshi and B. P. Pokharel, “Preparation and characterization of activated carbon from Lapsi (*Choerospondias axillaris*) seed stone by chemical activation with potassium hydroxide,” *Journal of the Institute of Engineering*, vol. 9, pp. 79-88, 2014.
- [12] S. Choojit and C. Sangwichien, “preparation of activated carbon production from oil palm empty fruit bunch and its application,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 8, pp. 48-67, 2018.
- [13] X. Wang , X. Liang, Y. Wang, X. Wang, M. Liu, D. Yin, S. Xia, J. Zhao and Y. Zhang, “Adsorption of copper (II) onto activated carbons from sewage sludge by microwave-induced phosphoric acid and zinc chloride activation,” *Desalination*, vol. 278, pp. 231-237, 2011.
- [14] M. J. Ahmed and S. K. Dhedan, “Equilibrium isotherms and kinetics modeling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated carbons,” *Fluid Phase Equilibria*, vol. 317, pp. 9-14, 2012.
- [15] B. H. Hameed, A. L. Ahmad and K. N. A. Latiff, “Adsorption of basic dye (methylene blue) onto activated carbon prepared from rattan sawdust,” *Dyes and Pigments*, vol. 75, pp. 143-149, 2007.
- [16] Y. Chen, B. Huang, M. Huang and B. Cai, “On the preparation and characterization of activated carbon from mangosteen shell,” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 42, pp. 837-842, 2011.

- [17] V. Fierro, G. Müniza, A. H. Basta, H. El-Saied and A. Celzard, "Rice straw as precursor of activated carbons: activation with ortho-phosphoric acid," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 181, pp. 27-34, 2010.
- [18] T. C. Chandra, M. M. Mirna, Y. Sudaryanto and S. Ismadji, "Adsorption of basic dye onto activated carbon prepared from durian shell: Studies of adsorption equilibrium and kinetics," *Chemical Engineering Journal*, vol. 127, pp. 121-129, 2007.
- [19] L. Liu, Y. Lin, Y. Liu, H. Zhu and Q. He, "Removal of methylene blue from aqueous solutions by sewage sludge based granular activated carbon: adsorption equilibrium, kinetics, and thermodynamics," *The Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 58, pp. 2248-2253, 2013.
- [20] H. Deng, L. Yang, G. Tao and J. Dai, "Preparation and characterization of activated carbon from cotton stalk by microwave assisted chemical activation—application in methylene blue adsorption from aqueous solution," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 166, pp. 1514-1521, 2009.
- [21] K. Y. Foo and B. H. Hameed, "Adsorption characteristics of industrial solid waste derived activated carbon prepared by microwave heating for methylene blue," *Fuel Processing Technology*, vol. 99, pp. 103-109, 2012.
- [22] S. Lagergren and B. K. Svenska, "For the so-called theory of adsorption of dissolved substances," *Kung. Svenska Vetenskapsakad Handlingar*, vol. 24, pp. 1-39, 1898.
- [23] Y. S. Ho, "Review of second-order models for adsorption systems," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 136, pp. 681-689, 2006.
- [24] T. A. Khana, E. A. Khanb and S. Shahjahan, "Adsorptive uptake of basic dyes from aqueous solution by novel brown linseed deoiled cake activated carbon: Equilibrium isotherms and dynamics," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, pp. 3084-3095, 2016.