

การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยผงเปลือกงาขาว

สุปรียา กัญญาประสิทธิ์ ประยูร ประเทศ และ ศิริรัตน์ แจ่มกรณ์*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

234 ถนนเลย-เชียงคาน ตำบลเมือง อำเภอมืองเลย จังหวัดเลย 42000

รับบทความ 27 พฤศจิกายน 2566 แก้ไขบทความ 30 กันยายน 2567 ตอรับบทความ 16 ตุลาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเปลือกงาขาว ซึ่งเป็นของเสียทางการเกษตรกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาทำ ความสะอาด อบให้แห้งและบดเป็นผงละเอียด หลังจากนั้นนำมาดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ดังนี้ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลู เวลาในการดูดซับ ความเร็วรอบเขย่า ในการดูดซับ และความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้เทคนิคสเปกโตรโฟเมตรีในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ผลการศึกษาปัจจัยในการดูดซับแต่ละปัจจัย ที่ทำให้เกิดการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ได้สูงที่สุดมีดังนี้ ปริมาณตัวดูดซับ 0.2 กรัม ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลู 30 มิลลิกรัม/ลิตร เวลาในการดูดซับ 4 ชั่วโมง ความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ 150 รอบ/นาที และความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับคือ 11 ซึ่งทั้งห้าปัจจัยได้ค่า ร้อยละการดูดซับดังนี้ ร้อยละ 89.4, 93.3, 93.1, 89.8 และ 90.2 ตามลำดับ รวมถึงศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคสเปกโตรโฟเมตรีในการวิเคราะห์ตัวอย่าง พบว่าสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบ ฟรุนดริช ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.93 สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ขรุขระไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งการดูดซับบนพื้นผิวเป็นแบบหลายชั้น ดังนั้นผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเปลือกงาขาวสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ ซึ่งเป็นการนำของเสียทางการเกษตรกลับมาใช้ประโยชน์ และเป็นแนวทางการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมผ้า

คำสำคัญ : เปลือกงาขาว; ของเสียทางการเกษตร; การดูดซับ; เมทิลีนบลู

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4600 7792, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: s.jangkorn@gmail.com

Removal of Methylene Blue Dye Using White Sesame Husks Powder

Supreeya Kanyaprasit Prayoon Prathet and Sirirat Jangkorn*

Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University

234 Loei-Chiang Khan Road, Mueang Subdistrict, Mueang Loei District, Loei Province, 42000

Received 27 November 2023; Revised 30 September 2024; Accepted 16 October 2024

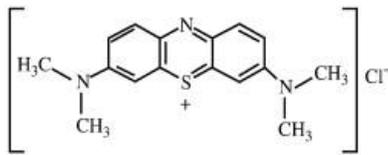
Abstract

This research involves the utilization of white sesame husks, which were agricultural waste, to create a beneficial application. The process involves cleaning, drying, and grinding the husks into a fine powder. Then, they employed methylene blue dye adsorption. Additionally, the study explored isotherm adsorption using spectroscopy techniques to analyze samples. The conditions that resulted in the maximum amount of methylene blue dye adsorption were: 0.2 g of adsorbent material; 30 mg/L of methylene blue dye; 4 hours of adsorption time; 150 rpm of shaking speed; and 11 pH. 89.4%, 93.3%, 93.1%, 89.8%, and 90.2%, respectively, were the dye adsorbed percentages for these five parameters. This research includes a study of adsorption isotherms and employs spectrophotometric techniques for sample analysis. As a result, the adsorption isotherm study, correlating to Freundlich isotherm adsorption, shown the R^2 value of 0.93, indicating that the adsorption occurs on a non-uniform and multilayer surface. The results of this study show that white sesame husks can efficiently absorb methylene blue dye, which presents an opportunity to recycle agricultural waste and possibly even give a treatment option for wastewater tainted by dye.

Keywords : White Sesame Husks; Agricultural Waste; Adsorption; Methylene Blue

1. บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้เจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว สารเคมีหลายชนิดถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมดังกล่าว โดยเฉพาะสีย้อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ทำให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะแหล่งน้ำ มักพบการเจือปนของสารพิษและเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข [1] สีย้อมเมทิลีนบลูมีโครงสร้างทางเคมี [2] แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู

ซึ่งเป็นสีที่นิยมนำมาใช้ย้อมผ้า เช่น ผ้าคอตตอน ผ้าฝ้าย และผ้าขนสัตว์ เป็นต้น [3] และเป็นสีย้อมประเภทประจุบวก (Cationic dye) [4], [5] เมื่อถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำ จะเป็นอันตรายต่อระบบนิเวศและสัตว์น้ำ [6] และยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย [7] สำหรับวิธีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมย้อมผ้ามีหลายวิธี เช่น กระบวนการดูดซับ การตกตะกอน และการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นต้น [8]-[10] จากวิธีที่กล่าวมาพบว่ากระบวนการดูดซับ เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสม เนื่องจากมีประสิทธิภาพและประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดน้ำเสีย ตัวดูดซับที่นำมาใช้ได้แก่ ป่าลัม [11] เปลือกส้มโอ [12] และเปลือกหน่อไม้ [13] เป็นต้น สำหรับตัวดูดซับที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเปลือกงาขาว (*Sesamum indicum* Linn.) ซึ่งเป็นงาพันธุ์เมืองเลย หรือเรียกอีกชื่อว่า งาไข่ปลา เนื่องจากมีเมล็ดเล็ก นิยมปลูกมากในจังหวัดเลย เป็นที่ต้องการของตลาด เพราะสามารถนำมาสกัดน้ำมันได้และมีกลิ่นหอม หลังจากที่จะเพาะเปลือก แล้วนำเมล็ดงาขาวออกมาเพื่อสกัดน้ำมันเปลือกจะถูกนำไปทั้งกลายเป็นขยะและของเสียตามที่

ต่าง ๆ เปลือกงาขาวมีองค์ประกอบของโพลีแซ็กคาไรด์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมด้วย [14] ทางผู้วิจัยจึงได้นำแนวทางการจัดการของเสียจากกระบวนการผลิตให้เกิดน้อยที่สุด (Zero-Waste) และแปรสภาพเพื่อนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) จึงได้นำเปลือกงาขาวกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อเป็นตัวดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งทำให้ได้ตัวดูดซับที่ราคาถูก หาง่าย และมีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ตัวอย่างเปลือกงาขาวพันธุ์เมืองเลย เป็นพืชที่นิยมปลูกในจังหวัดเลย มีประโยชน์ด้านโภชนาการ จึงเป็นพันธุ์ที่ตลาดต้องการ [15] ซึ่งงานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างจากสาขาวิชาเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

2.1 การเตรียมเปลือกงาขาว

นำเปลือกงาขาวล้างด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ และทำแห้งในตู้อบร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยเครื่องบดแห้งไฟฟ้าให้ละเอียด แล้วร่อนคัดขนาดด้วยตะแกรงความละเอียด 40 เมช (Mesh) ให้ได้ผงเปลือกงาขาว ตักใส่ถุงซิปล็อคแล้วเก็บรักษาในโถแก้วดูความชื้น เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

2.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของดูดซับ

ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเปลือกงาขาว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: FE- SEM) รุ่น X-Max 50 บริษัท FEI Quanta 450 FEG/EDS Oxford Instruments และศึกษาลักษณะทางเคมีของหมู่ฟังก์ชันเปลือกงาขาวด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) รุ่น Id7 ATR Accessory บริษัท Thermo Scientific

2.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ จะทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch) เพื่อศึกษา 5 ปัจจัย ดังนี้ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลู เวลาในการดูดซับ ความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ และความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับ ซึ่งแต่ละปัจจัยทดลองอย่างละ 3 ซ้ำ หลังการดูดซับ แยกสารละลายออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Z206A, Hermle ใช้ความเร็วรอบ 3,600 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) รุ่น Lambda 35, Perkin Elmer ด้วยความยาวคลื่นแสง 663 นาโนเมตร เพื่อคำนวณร้อยละการดูดซับ และคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$R\% = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_1)V}{w} \quad (2)$$

โดยที่

R = ร้อยละการดูดซับ (%)

q_e = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

C_0 = ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูก่อนการดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_1 = ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูหลังการดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร)

V = ปริมาตรของสีย้อมเมทิลีนบลู (ลิตร)

w = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

2.3.1 การศึกษาปริมาณตัวดูดซับ

ปริมาณตัวดูดซับที่ศึกษา มีดังนี้ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 กรัม นำแต่ละตัวอย่างใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด

125 มิลลิลิตร แต่ละขวดควบคุมปัจจัยคือ ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณตัวดูดซับที่กำจัดเมทิลีนบลูได้สูงสุด

2.3.2 การศึกษาความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลู

ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่ทำการศึกษามีดังนี้ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเตรียมปริมาตรละ 100 มิลลิลิตร นำแต่ละตัวอย่างใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร แต่ละขวดควบคุมปัจจัยดังนี้ ปรับสารละลายให้มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 แล้วใส่ปริมาณผงเปลือกงาขาวที่ศึกษาได้จากข้อ 2.3.1 นำเข้าเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อหาตัวดูดซับที่กำจัดความเข้มข้นได้สูงสุด

2.3.3 การศึกษาเวลาในการดูดซับ

เวลาในการดูดซับที่ศึกษามีดังนี้ 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง แต่ละตัวอย่างควบคุมปัจจัยดังนี้ ซึ่งปริมาณผงเปลือกงาขาวที่ศึกษาได้จากข้อ 2.2.1 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ที่มีสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นที่ได้จากการศึกษาในข้อ 2.3.2 ปริมาตรละ 100 มิลลิลิตร แล้วปรับสารละลายให้มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 นำเข้าเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อหาเวลาในการดูดซับที่กำจัดเมทิลีนบลูได้สูงสุด

2.3.4 การศึกษาความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ

ความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับที่ศึกษามีดังนี้ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบ/นาที แต่ละตัวอย่างควบคุมปัจจัยดังนี้ ซึ่งปริมาณผงเปลือกงาขาวที่ศึกษาได้จากข้อ 2.3.1 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ที่มีสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นที่ได้จากการศึกษาในข้อ 2.3.2 ปริมาตรละ 100 มิลลิลิตร แล้ว

ปรับสารละลายให้มีความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 5 นำเข้าเครื่องเขย่าตามเวลาในการดูดซับที่ศึกษาได้จากข้อ 2.3.3 เพื่อหาความเร็วรอบเขย่าที่ตัวดูดซับกำจัดเมทิลีนบลูได้สูงสุด

2.3.5 การศึกษาความเป็นกรด-ต่างในการดูดซับ

ความเป็นกรด-ต่างในการดูดซับที่ศึกษามีดังนี้ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 แต่ละตัวอย่างควบคุมปัจจัยดังนี้ ซึ่งปริมาณผงเปลือกงาขาวที่ศึกษาได้จากข้อ 2.3.1 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ที่มีสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นที่ได้จากการศึกษาในข้อ 2.3.2 ปริมาตรละ 100 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเขย่าตามเวลาในการดูดซับที่ศึกษาได้จากข้อ 2.3.3 ด้วยความเร็วรอบเขย่าที่ได้จากการศึกษาในข้อ 2.3.4 เพื่อหาความเป็นกรด-ต่างของสารละลาย ที่ตัวดูดซับกำจัดเมทิลีนบลูได้สูงสุด

2.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

นำขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จำนวน 8 ขวด ใส่ผงเปลือกงาขาวขวดละ 0.2 กรัม นำแต่ละขวดใส่สีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตรละ 100 มิลลิลิตร ปรับสารละลายให้มีความเป็นกรด-ต่างที่ 11 แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลายหลังการดูดซับมาคำนวณหาไอโซเทอม ซึ่งการศึกษานี้ใช้ 2 ไอโซเทอมคือแลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir isotherm) และฟรุนดลิชไอโซเทอม (Freundlich isotherm) ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่สมดุลกับปริมาณผงเปลือกงาขาว ณ อุณหภูมิคงที่

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \tag{3}$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \tag{4}$$

โดยที่

C_e = ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับในสถานะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

q_m = ปริมาณสูงสุดของสีย้อมเมทิลีนบลูที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียวต่อปริมาณผงเปลือกงาขาว (มิลลิกรัม/กรัม)

K_L = ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตร/มิลลิกรัม)

K_F = ค่าคงที่ฟรุนดลิช (มิลลิกรัม/กรัม)

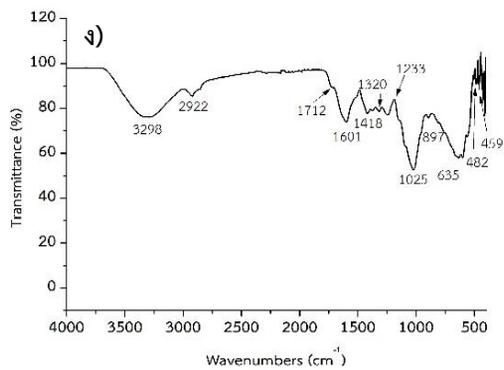
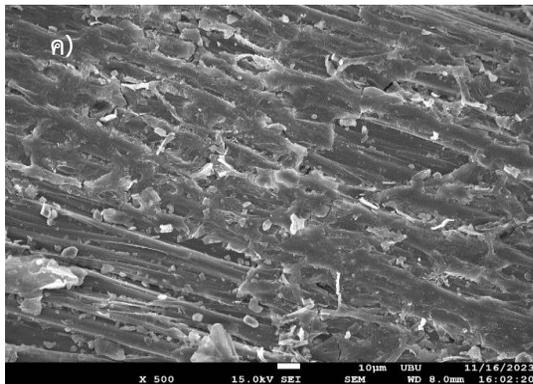
$\frac{1}{n}$ = ปัจจัยแสดงถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

เปลือกงาขาวที่แกะเมล็ดงาออกแล้ว ล้างทำความสะอาดและอบแห้งจะได้ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2 ก) เมื่อนำมาบดละเอียดและคัดขนาดด้วยตะแกรงความละเอียด 40 เมส จะได้ผงเปลือกงาขาวเนื้อละเอียดสีน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 2 ข) ส่วนลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวของตัวดูดซับ ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าพื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบและขรุขระ แสดงในรูปที่ 2 ค) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ทำให้เปลือกงาขาว สามารถเป็นตัวดูดซับที่ดี เพราะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ สามารถกักจับและกักเก็บอนุภาคของสีย้อมผ้าได้ดีกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเรียบ [16] ส่วนผลการศึกษาลักษณะทางเคมีประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน ดังนี้ ช่วงแถบที่ 3,200-3,600 ซม.⁻¹ คือหมู่ -OH สามารถกักเก็บความชื้นได้ดี [17] และสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของเมทิลีนบลู อีกทั้งมีประจุลบซึ่งสามารถจับกับเป็นสีย้อมที่มีประจุบวกอย่างเมทิลีนบลูได้ [4], [18] ส่วนแถบที่ 2,922 ซม.⁻¹ คือหมู่ -CH₃ แถบที่ 1,712 ซม.⁻¹ คือหมู่ C=O ซึ่งสามารถจับกับไอออนของสีย้อมผ่านแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตได้ [19] แถบที่ 1,601 ซม.⁻¹ แสดงถึงสารประกอบอโรมาติกต่อต้านอนุมูลอิสระ [20] สำหรับแถบที่ 1,418, 1,320 และ 1,233 ซม.⁻¹ คือหมู่ -CH₂ ขององค์ประกอบไขมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในเปลือกงา [21] แถบที่

1,025 และ 897 cm^{-1} คือหมู่ $-\text{CH}$ ของอัลเคนและกลุ่มเมทิล ตามลำดับ ขณะที่แถบ 482 และ 452 cm^{-1} คือองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ง)



รูปที่ 2 ก) เปลือกงาขาว ข) ผงเปลือกงาขาว
ค) ลักษณะพื้นผิว และ ง) องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันกทางเคมีของเปลือกงาขาว

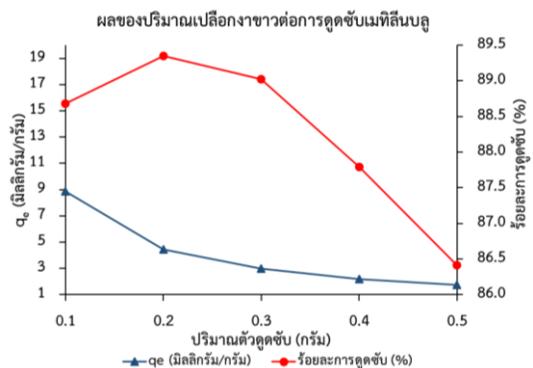
3.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

เมื่อนำเปลือกงาขาว มาทดสอบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับสี

ย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายมีทั้งหมด 5 ปัจจัย ดังนี้ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู เวลาในการดูดซับ ความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ และความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับ ซึ่งผลการทดสอบได้ปัจจัยที่เหมาะสม ดังนี้

3.2.1 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับ

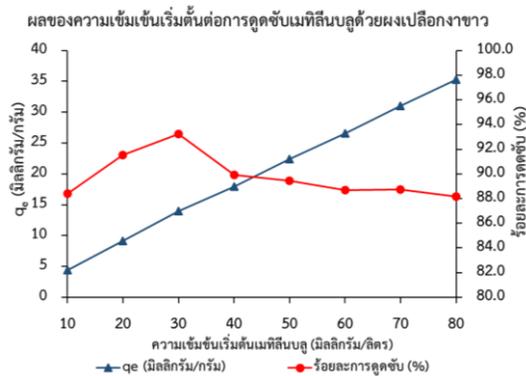
จากการศึกษาพบว่า ตัวดูดซับปริมาณ 0.1 กรัม มีค่าการดูดซับ 88.7% และค่า q_e เท่ากับ 8.87 มิลลิกรัม/กรัม เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 0.2 กรัม ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 89.4% ส่วนค่า q_e เท่ากับ 4.47 มิลลิกรัม/กรัม เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย [22] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 0.3, 0.4 และ 0.5 กรัม กลับพบว่าค่าการดูดซับลดลงเป็น 89.0%, 87.8% และ 86.4% และมีค่า q_e เท่ากับ 89.0, 87.8 และ 86.4 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งตัวดูดซับจะมีพื้นผิวจำเพาะ (Active site) ที่ทำให้ประสิทธิภาพดูดซับมากขึ้น เมื่อดูดซับสีจนอิ่มตัวจะเกิดสภาวะสมดุลระหว่างอนุภาคสีที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับ และอนุภาคสีที่อยู่ในสารละลาย จึงทำให้การดูดซับลดลงถึงแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นก็ตาม [23] อีกทั้งการเพิ่มปริมาณ อาจทำให้เกิดความหนาแน่นจนอนุภาคของตัวดูดซับเกิดการเกาะตัวกัน ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงลดลง [24] ดังนั้นปริมาณตัวดูดซับที่ดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงที่สุดคือ 0.2 กรัม



รูปที่ 3 ปัจจัยปริมาณเปลือกงาขาวต่อการดูดซับ

3.2.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นของเมทิลีนบลู

จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ 10 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร มีการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเป็น 88.4% และ 91.5% และมีค่า q_e เท่ากับ 4.42 และ 9.15 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ และดูดซับเพิ่มสูงสุดที่ความเข้มข้นเมทิลีนบลู 30 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่า 93.3% และค่า q_e เท่ากับ 13.99 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งเมื่อความเข้มข้นเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอนุภาคของสีย้อมในสารละลาย และพื้นผิวของตัวดูดซับ จึงเกิดแรงขับเคลื่อนการถ่ายเทมวลของอนุภาคสีย้อมเพื่อเข้าจับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Binding site) ได้มากขึ้น [25] แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีการดูดซับลดลงที่ 89.95%, 89.4%, 88.7%, 88.7% และ 88.2% ซึ่งมีค่า q_e เท่ากับ 17.98, 22.35, 26.60, 31.05 และ 35.26 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากอนุภาคของสีย้อมเมื่อเข้าจับกับพื้นผิวของตัวดูดซับจนเต็ม จึงทำให้อนุภาคของสีไม่สามารถเข้าจับได้อีก การดูดซับจึงลดลง [26] ดังนั้นความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่เลือกงานาดูดซับได้สูงสุดคือ 30 มิลลิกรัม/ลิตร

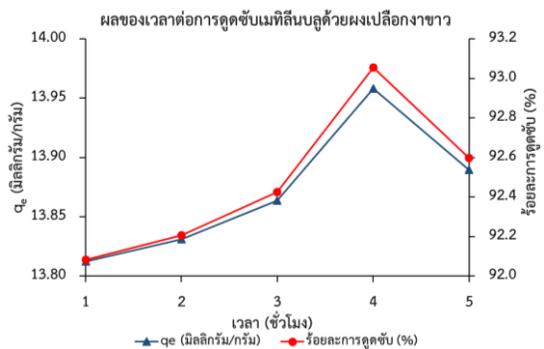


รูปที่ 4 ปัจจัยความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูต่อการดูดซับ

3.2.3 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับ

ผลการศึกษาพบว่าเวลาในการดูดซับที่ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง มีการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 92.7%, 92.2%,

92.4% และ 93.1% มีค่า q_e เท่ากับ 13.81, 13.83, 13.86 และ 13.96 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มเวลาดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับสัมผัสกับอนุภาคสีได้มากขึ้น เป็นผลให้การดูดซับมีค่าเพิ่มตามไปด้วย ซึ่งช่วงแรกการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะมีแรงขับเคลื่อน [25] แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 5 ชั่วโมง พบว่ามีการดูดซับลดลงเป็น 92.6% และมีค่า q_e เท่ากับ 13.89 มิลลิกรัม/กรัม ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากการดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวตัวดูดซับแล้ว จึงเข้าสู่ภาวะสมดุลซึ่งอนุภาคสีย้อมจะมีการเกาะหรือหลุดออกจากตัวดูดซับเท่า ๆ กัน ถึงแม้ว่าจะเพิ่มเวลาในการดูดซับให้มากขึ้นก็ตาม [27] ดังนั้นเวลาในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกงาขาว ที่สามารถดูดซับได้สูงสุดคือ 4 ชั่วโมง

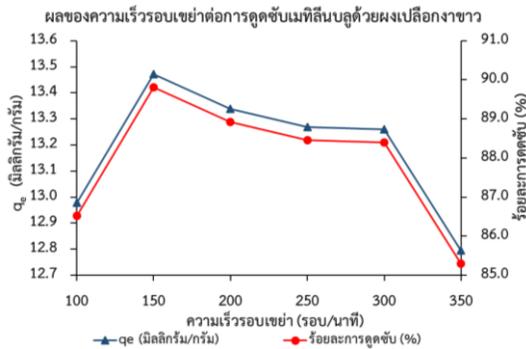


รูปที่ 5 ปัจจัยเวลาในการดูดซับ

3.2.4 ผลการศึกษาความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ

ผลการศึกษาพบว่า ที่ความเร็วรอบเขย่า 100 และ 150 รอบ/นาที มีการดูดซับ 86.5% และ 89.8% มีค่า q_e เท่ากับ 12.98 และ 13.47 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ เมื่อความเร็วรอบเขย่าเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคสีย้อมสามารถสัมผัสกับตัวดูดซับได้มากขึ้น จึงทำให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [13] เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเขย่าเป็น 200, 250, 300 และ 350 รอบ/นาที มีการดูดซับลดลงเป็น 88.9%, 88.5%, 88.4% และ 85.3% มีค่า q_e เท่ากับ 13.34, 13.27, 13.26 และ 12.80 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 การเพิ่มความเร็ว

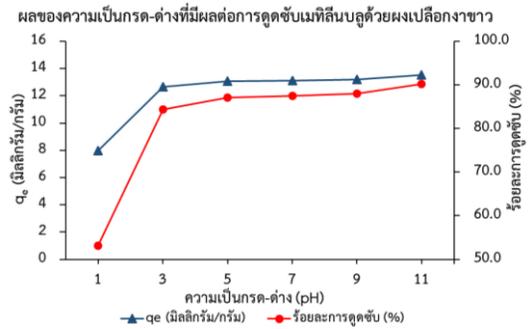
รอบเขย่าที่มากเกินไป จะทำให้เกิดแรงเฉือน ซึ่งทำให้การสัมผัสกันระหว่างอนุภาคสีและพื้นผิวของตัวดูดซับลดลงจึงขัดขวางการดูดซับด้วย [28] ดังนั้นความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่เปลือกองขาวสามารถดูดซับได้สูงสุดคือ 150 รอบ/นาที



รูปที่ 6 ปัจจัยความเร็วรอบเขย่าต่อการดูดซับ

3.2.5 ผลการศึกษาความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับ

ผลการศึกษาพบว่า ความเป็นกรด-ด่างที่ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 มีการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 53.1%, 84.4%, 87.1%, 87.4%, 88.0%, และ 89.8% มีค่า q_e เท่ากับ 7.96, 12.66, 13.07, 13.12, 13.21 และ 13.53 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมประจุบวก ถูกดูดซับได้ดีที่ความเป็นกรด-ด่างสูง [29] เพราะที่สภาวะนี้มีไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งมีประจุบวกลดลง [30] รวมทั้งความเป็นกรด-ด่างที่สูง พื้นผิวของตัวดูดซับอาจเป็นประจุลบ ซึ่งจับกับประจุบวกของสีย้อมได้ดีขึ้นด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) และสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่พบว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวดูดซับต่าง ๆ เช่น เปลือกถั่ว และเปลือกกระเทียม มีการดูดซับได้สูงสุดที่ความเป็นกรด-ด่าง 11 [31], [33] ดังนั้นความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับที่เปลือกองขาวสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้สูงสุดคือ 11

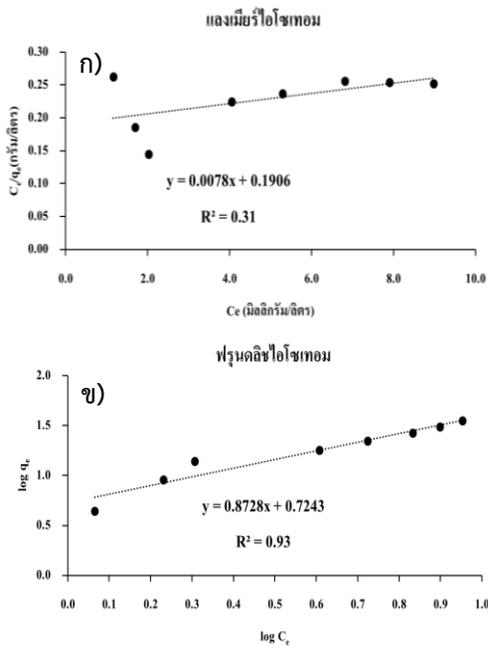


รูปที่ 7 ปัจจัยความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับ

3.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษาผลของไอโซเทอมในการดูดซับ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยเปลือกองขาวกับความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ในสภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ เพื่อหาความสัมพันธ์สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมการดูดซับที่ทำการศึกษามี 2 สมการคือ แลงเมียร์ไอโซเทอมและฟรุนดริชไอโซเทอม ซึ่งได้กราฟไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกองขาวของแลงเมียร์ไอโซเทอมและฟรุนดริชไอโซเทอม ดังแสดงในรูปที่ 8 ก) และ ข) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของทั้งสองสมการ พบว่า ค่า R^2 จากสมการแลงเมียร์ไอโซเทอมและฟรุนดริชไอโซเทอมมีค่า 0.31 และ 0.93 ตามลำดับ ซึ่ง R^2 ของสมการฟรุนดริชไอโซเทอมมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกองขาว สอดคล้องกับสมการแบบฟรุนดริชไอโซเทอม จึงสามารถอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือตัวดูดซับมีพื้นผิวขรุขระ และการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวดูดซับอื่น ๆ แสดงในตารางที่ 1 เช่น ซีเลอีย [36] ใบสะเดา [37] และเปลือกหน่อไม้ [13] ส่วนค่า $1/n$ และค่า K_F ของเปลือกองขาวเท่ากับ 1.38 และ 7.46 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดย n มีค่า

เท่ากับ 0.72 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า เปลือกงาขาวเป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมาก [35] เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับต่าง ๆ แล้วพบว่า การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกงาขาวมีค่าการดูดซับสูงสุดที่ 128.21 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งกลไกการดูดซับของเปลือกงาขาว อาจเกิดจากปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีของโครงสร้างของตัวดูดซับ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบ เช่น หมู่ -OH และหมู่ C=O ที่สามารถพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของเมทิลีนบลูซึ่งเป็นประจุบวกได้ อีกทั้งยังมีแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตจึงดูดซับสีย้อมได้ดี [18], [19], [38], [39]



รูปที่ 8 ก) แลงเมียร์ไอโซเทอม และ ข) ฟรุนดลิชไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเปลือกงาขาว

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแลงเมียร์ไอโซเทอมและฟรุนดริชไอโซเทอม ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวดูดซับต่าง ๆ

ตัวดูดซับ	แลงเมียร์ไอโซเทอม			ฟรุนดลิชไอโซเทอม			อ้างอิง
	q _m (mg/g)	K _L (L/mg)	R ²	K _F (mg/g)	1/n	R ²	
ซีลีออย	9.78	1.60	0.98	6.05	0.63	0.99	[36]
โบสะเดา	3.76	0.18	0.96	2.42	1.79	0.99	[37]
เปลือกหน่อไม้	29.24	0.05	0.92	1.55	0.72	0.99	[13]
เปลือกงาขาว	128.2	0.04	0.31	7.46	1.38	0.93	การศึกษานี้

4. สรุป

เปลือกงาขาวที่ได้จากของเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ โดยมีปัจจัยการดูดซับที่ทำให้ได้การดูดซับมากที่สุดในแต่ละปัจจัย ดังนี้ ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.2 กรัม (89.4%) ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลู 30 มิลลิกรัม/ลิตร (93.3%) เวลาในการดูดซับ 4 ชั่วโมง (ร้อยละ 93.1) ความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ 150 รอบ/นาที (ร้อยละ 89.8) และความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับที่ 11 (ร้อยละ 90.2) และผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเปลือกงาขาว พบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดริช โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.93 ซึ่งสามารถอธิบายรูปแบบการดูดซับได้ว่าเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเปลือกงาขาว ซึ่งพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีความขรุขระ และการดูดซับเกิดขึ้นแบบหลายชั้น โดยหลังการดูดซับสามารถนำเปลือกงาขาวไปกำจัดด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเผาที่ควบคุมอุณหภูมิสูง (Thermal treatment) เพื่อทำลายโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม หรือนำไปฝังกลบในพื้นที่ควบคุม (Controlled landfilling) เพื่อป้องกันการรั่วไหลของสีย้อม และกำจัดด้วยวิธีฟื้นฟูตัวดูดซับ (Adsorbent regeneration) โดยการขับสีย้อมออกจากตัวดูดซับแล้วฟื้นฟูกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นข้อเสนอแนะที่จะทำการศึกษาต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำวิจัย เครื่องมือ และอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Y. R. Smith, D. Bhattacharyya, T. Willhard, and M. Misra, "Adsorption of aqueous rare earth elements using carbon black derived

- from recycled tires,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 296, pp. 102–111, Jul. 2016.
- [2] M. M. E. Halwany, “Study of adsorption isotherms and kinetic models for methylene blue adsorption on activated carbon developed from Egyptian rice hull (Part II),” *Desalination*, vol. 250, no. 1, pp. 208–213, Jan. 2010.
- [3] O. Hamdaoui, “Dynamic sorption of methylene blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed columns,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 138, no. 2, pp. 293–303, Nov. 2006.
- [4] C. Deng, J. Liu, W. Zhou, Y. K. Zhang, K. F. Du, and Z. M. Zhao, “Fabrication of spherical cellulose/ carbon tubes hybrid adsorbent anchored with welan gum polysaccharide and its potential in adsorbing methylene blue,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 200–202, pp. 452–458, Aug. 2012.
- [5] F. Liu, H. Zou, J. Hu, H. Liu, J. Peng, Y. Chen, F. Lu, and Y. Huo “Fast removal of methylene blue from aqueous solution using porous soy protein isolate based composite beads,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 287, pp. 410–418, Mar. 2016.
- [6] P. O. Oladoye, T. O. Ajiboye, E. O. Omotola, and O. J. Oyewola, “Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater,” *Results in Engineering*, vol. 16, pp. 100678, Dec. 2022.
- [7] I. Khan, K. Saeed, I. Zekker, B. Zhang, A. H. Hendi, A. Ahmad, S. Ahmad, N. Zada, H. Ahmad, L. A. Shah, T. Shah, and I. Khan, “Review on methylene blue: Its properties, uses, toxicity and photodegradation,” *Water*, vol. 14, no. 2, p. 242, Jan. 2022.
- [8] B. Qiu, Y. Dang, X. Cheng, and D. Sun, “Decolorization and degradation of cationic red X- GRL by upflow blanket filter,” *Water Science and Technology*, vol. 67, no. 5, pp. 976–982, Mar. 2013.
- [9] M. R. Gadekar and M. M. Ahammed, “Coagulation/flocculation process for dye removal using water treatment residuals: modelling through artificial neural networks,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, no. 55, pp. 26392–26400, Nov. 2016.
- [10] Z. Jia, Z. Li, S. Li, Y. Li, and R. Zhu, “Adsorption performance and mechanism of methylene blue on chemically activated carbon spheres derived from hydrothermally- prepared poly (vinyl alcohol) microspheres,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 220, pp. 56–62, Aug. 2016.
- [11] A. A. Ahmad, B. H. Hameed, and N. Aziz, “Adsorption of direct dye on palm ash: Kinetic and equilibrium modeling,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 141, no. 1, pp. 70–76, Mar. 2007.
- [12] B. H. Hameed, D. K. Mahmoud, and A. L. Ahmad, “ Sorption of basic dye from aqueous solution by pomelo (*Citrus grandis*) peel in a batch system,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and*

- Engineering Aspects*, vol. 316, no. 1–3, pp. 78–84, Mar. 2008.
- [13] P. Ouengsirirawad and C. Ruangviriyachai, “Adsorption of methylene blue dye using dried shell of bamboo shoot,” in *Proceeding of The National and International Graduate Research Conference*, Khon Kaen University, Thailand, 2016, pp. 343–350.
- [14] Q. Guo, S. Xu, X. Zhao, H. Liu, Z. Qin, and X. Wang, “Physicochemical and functional properties of pectic polysaccharides extracted with four different chelators from sesame hull,” *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 58, no. 5, pp. 2289–2303, May 2023.
- [15] G. Yaseen, M. Ahmad, M. Zafar, A. Akram, S. Sultana, S. N. Ahmed, and O. Kilic, “Sesame (*Sesamum indicum* L.),” in *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science*, Elsevier, 2021, pp. 253–269.
- [16] P. J. Cruz, P. P. De Breuck, G. M. Rignanese, K. Glinel, and A. M. Jonas, “Influence of roughness and coating on the rebound of droplets on fabrics,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 36, p. 102524, Feb. 2023.
- [17] M. A. C. Ortega, O. G. Barradas, M. R. M. López, K. M. Vásquez, and M. J. Fernández, “Chemical modification of sesame protein by acylation reactions: characterization and evaluation of functional properties,” *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 59, no. 7, pp. 5083–5095, Jul. 2024.
- [18] A. A. Aryee, R. Han, and L. Qu, “Investigation into the adsorption of methylene blue and trimethoprim onto modified peanut husk in single and binary systems,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 317, p. 100248, Jan. 2024.
- [19] Y. Cao, L. Yang, F. Liu, and Q. Yu, “Adsorption experiments and mechanisms of methylene blue on activated carbon from garden waste via deep eutectic solvents coupling KOH activation,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 182, p. 107074, Mar. 2024.
- [20] N. Bouhadi, C. Boualem, and L. Boudriche, “Sesame Seeds and Flax Food Oils: Extraction and Physicochemical Characterizations,” *International Invention of Scientific Journal*, vol. 3 no. 6, pp. 597–604, Aug. 2019.
- [21] A. Ferrer, C. Alciaturi, A. Faneite, and J. Ríos, “Analyses of Biomass Fibers by XRD, FT-IR, and NIR,” in *Analytical Techniques and Methods for Biomass*, Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 45–83.
- [22] A. E. Ofomaja, “Sorbptive removal of Methylene blue from aqueous solution using palm kernel fibre: Effect of fibre dose,” *Biochemical Engineering Journal*, vol. 40, no. 1, pp. 8–18, May 2008.
- [23] E. Forgacs, T. Cserhádi, and G. Oros, “Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review,” *Environment*

- International*, vol. 30, no. 7, pp. 953–971, Sep. 2004.
- [24] S. Parvin, A. Hossen, W. Rahman, I. Hossen, A. Halim, B. K. Biswas, and A. S. Khan, “Uptake hazardous dye from wastewater using water hyacinth as bio-adsorbent,” *European Journal of Sustainable Development Research*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [25] Ü. Geçgel, O. Üner, G. Gökara, and Y. Bayrak, “Adsorption of cationic dyes on activated carbon obtained from waste *Elaeagnus* stone,” *Adsorption Science & Technology*, vol. 34, no. 9–10, pp. 512–525, Dec. 2016.
- [26] Z. Eren and F. N. Acar, “Adsorption of Reactive Black 5 from an aqueous solution: equilibrium and kinetic studies,” *Desalination*, vol. 194, no. 1–3, pp. 1–10, Jun. 2006.
- [27] C. Umpuch and S. Sakaew, “Removal of methyl orange from aqueous solutions by adsorption using chitosan intercalated montmorillonite,” *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 35, no. 4, 2013.
- [28] K. S. Baig, “Interaction of enzymes with lignocellulosic materials: causes, mechanism and influencing factors,” *Bioresources and Bioprocessing*, vol. 7, no. 1, p. 21, Dec. 2020.
- [29] M. A. M. Salleh, D. K. Mahmoud, W. A. W. A. Karim, and A. Idris, “Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review,” *Desalination*, vol. 280, no. 1–3, pp. 1–13, Oct. 2011.
- [30] A. Özcan, Ç. Ömeroğlu, Y. Erdoğan, and A. S. Özcan, “Modification of bentonite with a cationic surfactant: An adsorption study of textile dye Reactive Blue 19,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 140, no. 1–2, pp. 173–179, Feb. 2007.
- [31] B. H. Hameed and A. A. Ahmad, “Batch adsorption of methylene blue from aqueous solution by garlic peel, an agricultural waste biomass,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 164, no. 2–3, pp. 870–875, May 2009.
- [32] B. H. Hameed, D. K. Mahmoud, and A. L. Ahmad, “Sorption equilibrium and kinetics of basic dye from aqueous solution using banana stalk waste,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 158, no. 2–3, pp. 499–506, Oct. 2008.
- [33] C. Namasivayam, M. D. Kumar, K. Selvi, R. A. Begum, T. Vanathi, and R. Yamuna, “Waste coir pith—a potential biomass for the treatment of dyeing wastewaters,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 21, no. 6, pp. 477–483, Dec. 2001.
- [34] Z. Huang, T. Wang, H. Yi, and X. Li, “Study on the adsorption of methylene blue from dye wastewater by humulus japonicus leaves,” *E3S Web of Conferences*, vol. 236, p. 03028, Feb. 2021.
- [35] P. Boonthawee and W. Chooaksorn, “Comparison of The fluoride adsorption performance of adsorbent,” *Journal of Science and Technology RMUTSB*, vol. 5, no. 1, pp. 95–105, Jul.-Dec. 2017.

- [36] F. Batzias and D. Sidoras, "Dye adsorption by calcium chloride treated beech sawdust in batch and fixed-bed systems," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 114, no. 1–3, pp. 167–174, Oct. 2004.
- [37] K. Bhattacharyya and A. Sharma, "Kinetics and thermodynamics of methylene blue adsorption on Neem (*Azadirachta indica*) leaf powder," *Dyes and Pigments*, vol. 65, no. 1, pp. 51–59, Apr. 2005.
- [38] A. A. Aryee, C. Gao, R. Han, and L. Qu, "Functionalized magnetic biocomposite based on peanut husk for the efficient sequestration of basic dyes in single and binary systems: Adsorption mechanism and antibacterial study," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, no. 4, p. 108205, Aug. 2022.
- [39] D. M. N. H. Jayasuriya and K. Nadarajah, "Understanding association between methylene blue dye and biosorbent: Palmyrah sprout casing in adsorption process in aqueous phase," *Water Science and Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 154–164, Jun. 2023.