

การดูดซับเมทิลีนบลูจากสารละลายโดยใช้ตัวดูดซับจากเปลือกถั่วเหลือง Adsorption of Methylene Blue from Solution Using Soybean Shells as a Sorbent

ศิริรัตน์ แจ้งกรณ์^{1,*}, สุปรียา กันยาประสิทธิ์¹, ประยูร ประเทศ²,
ศิริประภา แจ้งกรณ์³, กานดา ปุ่มสิน¹

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย เลข 42000

²สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย เลข 42000

³สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สระแก้ว 27160

Sirirat Jangkorn^{1,*}, Supreya Kunyaprasit¹, Prayoon Prathet²,
Siriprapha Jangkorn³, Kanda Pumsin¹

¹Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University, Loei 42000

²Agriculture, Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University, Loei 42000

³Natural Resource and Environment, Faculty of Science and Social Sciences,
Burapha University, Sa-Kaeo 27160

Received 22 October 2023; Received in revised 15 March 2024; Accepted 17 June 2024

บทคัดย่อ

ปัญหาหลังการเก็บเกี่ยวเมล็ดถั่วเหลือง มักพบเปลือกถั่วเหลืองที่เหลือทิ้งจำนวนมาก ซึ่งทำให้เกิดปัญหาล้างแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการจัดการของเสียเหล่านี้ โดยนำมาเป็นตัวดูดซับเมทิลีนบลู ซึ่งเป็นสีย้อมผ้าที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม และเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำ พร้อมทั้งศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการดูดซับและรูปแบบการดูดซับ โดยใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตรีด้วยความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร โดยนำเปลือกถั่วเหลืองมาทำความสะอาด ตากให้แห้งแล้วบดเป็นผงละเอียด และนำมาดูดซับเมทิลีนบลูในสารละลาย ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด ดังนี้ ปริมาณตัวดูดซับ 0.2 กรัม ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 80 มิลลิกรัม/ลิตร ระยะเวลาในการดูดซับ 5 ชั่วโมง ความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ 200 รอบ/นาที และความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 11 นอกจากนี้ยังพบว่ารูปแบบการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกถั่วเหลืองสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยมีค่า R^2 0.994 ซึ่งพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แสดงว่าเปลือกถั่วเหลืองสามารถใช้ดูดซับเมทิลีนบลูได้ดี

คำสำคัญ: การดูดซับ; เปลือกถั่วเหลือง; เมทิลีนบลู; การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้า; ฟรุนดลิชไอโซเทอม

Abstract

The issue of post-harvest soybean shell residue often leads to significant environmental problems due to its large volume. This research proposes a solution by utilizing these residues as a sorbent for methylene blue, a dye commonly used in the textile industry and known for its toxicity to aquatic life when released into water bodies. The study further investigates the factors affecting the sorption of methylene blue, using spectroscopic techniques at a wavelength of 663 nm. The soybean shells were cleaned, dried, ground into a fine powder, and subsequently used for sorption experiments. The optimal conditions for methylene blue sorption were determined as follows: a sorbent dosage of 0.2 g, a methylene blue concentration of 80 mg/L, a contact time of 5 hours, a shaking speed of 200 rpm, and a pH of 11. Moreover, the adsorption pattern of methylene blue onto soybean shells followed the Freundlich isotherm with an R^2 value of 0.994, indicating multilayer adsorption on a heterogeneous sorbent surface. This finding suggests that soybean shells have significant potential to effectively sorb methylene blue from aqueous solutions.

Keywords: Adsorption; Soybean shells; Methylene blue; Treatment of wastewater from fabric dye; Freundlich isotherm

1. บทนำ

การพัฒนาอุตสาหกรรมฟอกย้อม ทำให้สารพิษจำนวนมากรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวใช้สารเคมีและน้ำปริมาณมากถึง 1,300 ลูกบาศก์เมตร/วัน [1] โดยอุตสาหกรรมนี้ปล่อยน้ำเสียมากเป็นอันดับ 3 รองจากอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอาหาร โดยลักษณะของน้ำเสียจะมีความเข้มข้นของสี ย้อมที่สูงมากซึ่งมองเห็นได้อย่างชัดเจน [2] จึงทำให้สารพิษปนเปื้อน และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะแหล่งน้ำ จึงทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียและส่งกลิ่นเหม็นอย่างต่อเนื่อง [3]

ซึ่งปัญหาน้ำเน่าเสียจากกระบวนการย้อมผ้า มักใช้สีย้อมผ้าที่มีองค์ประกอบทางเคมี เมื่อปนเปื้อนในแหล่งน้ำ สารพิษเหล่านี้จะถูกถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหาร และส่งผลกระทบต่อมนุษย์ในที่สุด [4] ซึ่งอุตสาหกรรมฟอกย้อมในปัจจุบันมีค่าการปนเปื้อนสีย้อมผ้าเฉลี่ยอยู่ที่

400-700 ADMI [5] ซึ่งตามมาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดว่าสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องไม่เกิน 300 ADMI [6]

สีย้อมเมทิลีนบลู (methylene blue stain) เป็นหนึ่งในสีที่นิยมใช้ย้อมผ้า ยกตัวอย่างเช่น ผ้าฝ้าย ผ้าขนสัตว์ และผ้าไหม [7] เมื่อปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำเพียงแค่ 1 มิลลิกรัม/ลิตร จะสามารถส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำได้เนื่องจากมีความคงตัว ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยแสงและความร้อน สามารถปิดกั้นการส่องผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำได้ อีกทั้งยังสร้างความรำรังเกียจและทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำอีกด้วย [8] ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดน้ำเสียหลังกระบวนการย้อมผ้า สำหรับการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น กระบวนการดูดซับ การตกตะกอนด้วยสารเคมี การกรองด้วยวัสดุนาโน การย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ การแลกเปลี่ยนไอออน และการรีเวอร์สออสโมซิส เป็นต้น ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป (Table 1)

Table 1 Comparison the advantages and disadvantages of wastewater treatment processes.

Wastewater treatment processes	Comparison		References
	Advantages	Disadvantages	
Adsorption	Simple technique, inexpensive	Management of sediment	[9, 10]
Nanofiltration	High efficiency	Complicated, high investment, and toxic to the environment	[11]
Microbial degradation	Decompose organic	Takes a long period	[12]
Ion exchange	The absorbent is reusable	High investment	[13]
Reverse osmosis	Eliminate microorganisms	Complex and high investment	[14]

จากวิธีการบำบัดน้ำเสียที่กล่าวมานี้ พบว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ เป็นวิธีที่ประหยัดไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพอีกด้วย [15] ซึ่งการดูดซับเป็นกระบวนการที่ไม่เลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ [16] โดยตัวดูดซับที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีหลายชนิด ได้แก่ ตัวดูดซับทางการค้า เช่น ถ่านกัมมันต์ [17] ตัวดูดซับจากหินแร่ธาตุ เช่น โคลนดินขาว และถ่านหิน ตัวดูดซับจากของเสียทางการเกษตร เช่น เปลือกถั่วลิสง เปลือกอัลมอนต์ และเมล็ดฝ้าย [18] จากตัวดูดซับเหล่านี้พบว่า การใช้ตัวดูดซับที่มาจากของ

เสียทางการเกษตรเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากหาง่ายและราคาถูก [19] โดยการศึกษานี้จะใช้เปลือกถั่วเหลือง ซึ่งเป็นผลพลอยได้หลังการเก็บเกี่ยวเมล็ดถั่วเหลืองแล้วเปลือกเหล่านี้จะนำไปทิ้งหรือเผาทำลาย จึงกลายเป็นขยะและควันทoxic ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามเปลือกถั่วเหลืองเป็นวัสดุที่มีเส้นใยสูง จึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาเป็นตัวดูดซับที่ดี อีกทั้งยังเป็นการนำของเสียกลับมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย โดยงานวิจัยนี้ได้นำเปลือกถั่วเหลืองมาดูดซับเมทิลีนบลูในสารละลาย และได้ทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิว

หมู่ฟังก์ชัน พื้นผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเมทิลีนบลู ระยะเวลาในการดูดซับ ความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ และความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับ นอกจากนี้ยังได้ศึกษารูปแบบการดูดซับเมทิลีนบลูของเปลือกถั่วเหลืองอีกด้วย

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมสารละลายด้วยสีย้อมเมทิลีนบลู

เตรียมสีย้อมเมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) เกรดการวิเคราะห์ จากบริษัท QR eC^{TM} ประเทศนิวซีแลนด์ ละลายในน้ำกลั่น (distilled water) โดยเตรียมให้เป็นสารละลายความเข้มข้นเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร แล้วทำการเจือจางความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลู ดังนี้ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตรละ 200 มิลลิลิตร เพื่อใช้ทดลองปัจจัยในการดูดซับต่อไป

2.2 การเตรียมตัวดูดซับ

นำเปลือกถั่วเหลืองปริมาณ 2 กิโลกรัม จากสาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย นำมาล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง หลังจากนั้นอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน (บริษัท Memmert รุ่น UN110) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดแห้งไฟฟ้า (บริษัท Spring Green Evolution รุ่น PG2500) แล้วนำไปร่อนคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาดรูตาข่าย 0.45 มิลลิเมตร ซึ่งมีความละเอียด 40 เมส (mesh) จากนั้นนำผงที่ได้ใส่ถุงซิปล็อคและเก็บไว้ในโถสุญญากาศเพื่อป้องกันความชื้นเพื่อนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเปลือกถั่วเหลือง

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

Accessory และวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and pore size analyzer) บริษัท Quanata Chrome รุ่น Autosorb IQ โดยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET)

2.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

ใช้วิธีทดลองแบบกะ (batch adsorption test) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ซึ่งประกอบด้วย 5 ปัจจัย ดังนี้ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเมทิลีนบลู ระยะเวลาในการดูดซับ ความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ และความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับ โดยมีขั้นตอนดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

2.4.1 ปริมาณตัวดูดซับ

นำเปลือกถั่วเหลืองซึ่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งเทคนิค 2 ตำแหน่ง (บริษัท Sartorius รุ่น BSA3202S-CW) ปริมาณดังนี้ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 กรัม แต่ละปริมาณใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งแต่ละขวดบรรจุสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่าง 5 แล้วนำเข้าเครื่องเขย่าสาร (บริษัท IKA รุ่น KS 3000 I control) เขย่าด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้น กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 (บริษัท Whatman รุ่น CAT No. 1001-090) เก็บเฉพาะสารละลายลงในขวดปริมาตร 120 มิลลิลิตร เพื่อหาปริมาณตัวดูดซับที่ดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุด

2.4.2 ความเข้มข้นเมทิลีนบลู

เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น ดังนี้ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตรละ 200 มิลลิลิตร ที่ความเป็นกรด-ด่าง 5 แต่ละความเข้มข้นใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมตัวดูดซับปริมาณตามข้อ 2.4.1 แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วเก็บเฉพาะสารละลายในขวดปริมาตร 120 มิลลิลิตร เพื่อหาความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่ดูดซับได้สูงสุด

2.4.3 ระยะเวลาในการดูดซับ

ชั่งน้ำหนักตัวดูดซับที่ได้จากข้อ 2.4.1 ใส่ในสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นที่ได้จากข้อ 2.4.2 ปริมาตร

ละ 200 มิลลิลิตร ที่ความเป็นกรดต่าง 5 จำนวน 5 ขวด แล้วเขย่าด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที โดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองแล้วเก็บเฉพาะสารละลายในขวดปริมาตร 120 มิลลิลิตร เพื่อหาระยะเวลาในการดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุด

2.4.4 ความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ

ชั่งน้ำหนักตัวดูดซับที่ได้จากข้อ 2.4.1 ใส่ในสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นที่ได้จากข้อ 2.4.2 ที่ความเป็นกรดต่าง 5 จำนวน 6 ขวด แล้วเขย่าโดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับที่ได้จากข้อ 2.4.3 ด้วยความเร็วรอบ 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 รอบ/นาที จากนั้นนำมากรองแล้วเก็บเฉพาะสารละลายในขวดปริมาตร 120 มิลลิลิตร เพื่อหาความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุด

2.4.5 ความเป็นกรดต่างในการดูดซับ

ชั่งน้ำหนักตัวดูดซับที่ได้จากข้อ 2.4.1 ใส่ในสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นที่ได้จากข้อ 2.4.2 จำนวน 6 ขวด ซึ่งแต่ละขวดปรับความเป็นกรดต่างแตกต่างกัน

คือ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 จากนั้นเขย่าสารโดยใช้ระยะเวลาในการดูดซับที่ได้จากข้อ 2.4.3 โดยใช้ความเร็วรอบเขย่าที่ได้จากข้อ 2.4.4 แล้วนำมากรองเก็บเฉพาะสารละลายในขวดปริมาตร 120 มิลลิลิตร เพื่อหาความเป็นกรดต่างที่ดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุด

สารละลายเมทิลีนบลูหลังการดูดซับที่ได้จากการทดลองทั้ง 5 ปัจจัย นำมาวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือ ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (บริษัท Perkin Elmer รุ่น Lambda 35 UV/VIS Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร [20] โดยการสร้างกราฟมาตรฐานของเมทิลีนบลูในความเข้มข้นแตกต่างกันเป็นลำดับ จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละความเข้มข้นมาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน ซึ่งจะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน (slope) และจุดตัดแกน y เมื่อวิเคราะห์ได้ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างหลังการดูดซับเมทิลีนบลูทั้ง 5 ปัจจัย จึงนำมาแทนค่าในสมการเส้นตรงที่สร้างจากกราฟมาตรฐาน ซึ่งจะได้ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูหลังการดูดซับ แล้วนำมาคำนวณหาค่าร้อยละการดูดซับดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละการดูดซับ (\%)} = ((C_0 - C_e) / C_0) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 หมายถึง ความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูก่อนการดูดซับ
 C_e หมายถึง ความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูหลังการดูดซับ

2.5 การศึกษาแบบการดูดซับ

รูปแบบการดูดซับเมทิลีนบลูของเปลือกถั่วเหลืองนี้จะใช้ 2 สมการ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สมดุลกับปริมาณเปลือกถั่วเหลือง ณ อุณหภูมิคงที่ คือแลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir isotherm) [21] และฟรอนด์ลิชไอโซเทอม (Freundlich isotherm) [22] ซึ่งสมการแลงเมียร์ไอโซเทอม เขียนได้ดังสมการที่ (2)

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

เมื่อจัดรูปเป็นสมการเส้นตรงจะได้ดังสมการที่ (3) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e

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

ส่วนและฟรอนด์ลิชไอโซเทอมเขียนได้ดังสมการที่ (4) และเมื่อจัดรูปเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (5) ตามลำดับ และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$

$$q_e = k_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

$$\log q_e = \log k_f + \frac{1}{n} C_e \quad (5)$$

เมื่อ q_e หมายถึง ปริมาณเมทิลีนบลู (มิลลิกรัม) ต่อ ปริมาณเปลือกถั่วเหลือง (กรัม) ที่ภาวะสมดุล

q_m หมายถึง ปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับที่มากที่สุด (มิลลิกรัม/กรัม)

b หมายถึง ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตร/มิลลิกรัม)

C_e หมายถึง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

K_f หมายถึง ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (มิลลิกรัม/กรัม)

n หมายถึง ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับและความเข้มข้นของเมทิลีนบลู

หาค่าไคสแควร์ (Chi-square; x^2) ได้จากสมการที่ (6)

$$x^2 = \sum \frac{(q_{e,e} - q_{e,m})^2}{q_{e,m}} \quad (6)$$

เมื่อ $q_{e,e}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูจากการทดลองที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

$q_{e,m}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูจากการคำนวณที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ

ตัวอย่างเปลือกถั่วเหลืองที่ทำความสะอาดและทำให้แห้งแล้ว (Figure 1(A)) นำมาบดละเอียดแล้วและร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาด จะได้ผงเปลือกถั่วเหลืองสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับ (Figure 1(B)) สำหรับผลการศึกษาพื้นที่ผิวที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่ามีลักษณะขรุขระ และมีรูพรุนทั่วทั้งพื้นผิว (Figure 1(C)) ซึ่งลักษณะนี้อาจทำให้สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vinicius et al. (2021) และ Wei et al. (2014) ที่พบว่าพื้นผิวของเปลือกถั่วเหลืองที่ดูดซับสี 5G บลูรีแอคทีฟและตะกั่ว มีความขรุขระและมีรูพรุน [23, 24] ส่วนผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน พบว่ามีแถบการสั่นที่ $3,412 \text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ -OH แถบที่ $2,925 \text{ cm}^{-1}$ และ $2,855 \text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ -CH แถบที่ $1,744 \text{ cm}^{-1}$, $1,647 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,417 \text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ -CO ของคาร์บอกซิล ส่วนแถบที่ $1,061 \text{ cm}^{-1}$ และ 794 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C-O-C และ -CH ของเซลลูโลส (Figure 1(D)) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alemdar and Sain (2008) [25] ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะได้ 0.632 ตารางเมตร/กรัม ปริมาตรรูพรุน 0.005 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม และขนาดรูพรุนของเปลือกถั่วเหลือง มีค่าเท่ากับ 1.80 นาโนเมตร จากการจำแนกของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) [26] พบว่าขนาดรูพรุนที่ได้มีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร จึงจำแนกเป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous) และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า เปลือกถั่วเหลืองมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนมากกว่าตัวดูดซับที่ทำจาก เปลือกกระเทียม และถ่านดินเสม็ดขาว [27, 28] (Table 2)

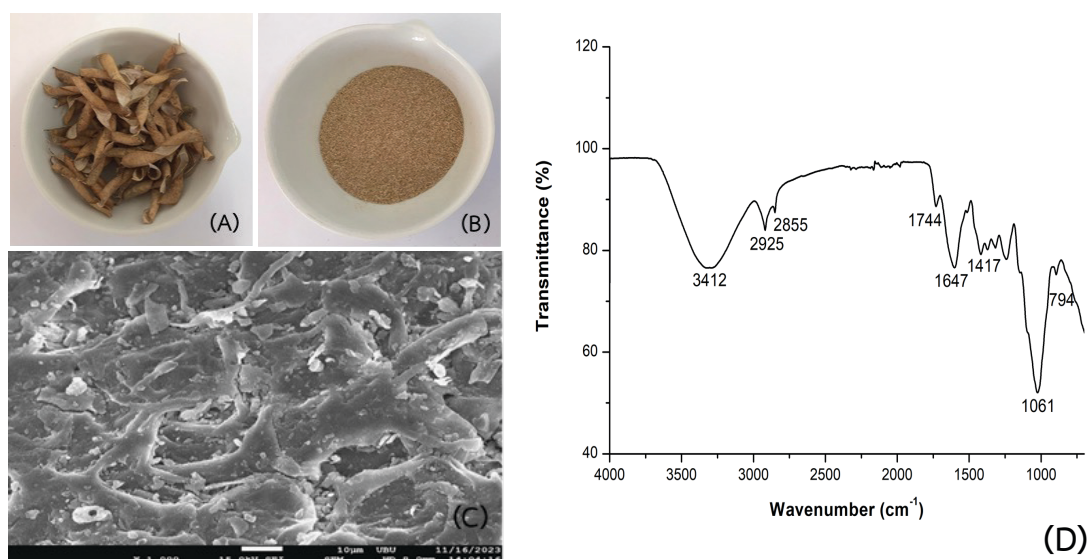


Figure 1 The pictures of (A) soybean shells (B) soybean shell powder (C) SEM image, and (D) FTIR spectra of soybean shells

Table 2 Comparison of specific surface area, pore volume, and pore size of the adsorbents.

Samples	Specific surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size (nm)	References
Garlic peel	0.56	1.12x10 ⁻⁶	7.96	[27]
Cajuputi charcoal	0.56	3.59x10 ⁻³	25.82	[28]
Soybean shells	0.63	5.00x10 ⁻³	1.80	This study

3.2 ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

3.2.1 ผลการทดลองปริมาณตัวดูดซับ

หลังการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยปริมาณตัวดูดซับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 กรัม มีความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ดังนี้ 2.53, 1.89, 1.64, 1.52 และ 1.46 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีค่าร้อยละการดูดซับที่ 74.67, 81.13, 83.65, 84.78 และ 85.40 ตามลำดับ ดังนั้น ปริมาณตัวดูดซับของเปลือกถั่วเหลืองที่ดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุดคือ 0.5 กรัม ซึ่งมีร้อยละการดูดซับ 85.40 (Figure 2(A)) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและตำแหน่งการดูดซับให้มากขึ้น [29] จึงทำให้เปลือกถั่วเหลืองดูดซับเมทิลีนบลูได้มากขึ้นด้วย

3.2.2 ผลการทดลองความเข้มข้นเมทิลีนบลู

ผลการดูดซับด้วยความเข้มข้นเมทิลีนบลู 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร หลังการดูดซับมีความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเหลืออยู่ ดังนี้ 1.59, 2.48, 3.63, 4.81, 6.00, 6.97, 8.07 และ 9.16 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีค่าร้อยละการดูดซับ 84.08, 87.59, 87.91, 87.99, 88.01, 88.38, 88.47 และ 88.55 ตามลำดับ ดังนั้น ความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่ดูดซับได้ดี จากความเข้มข้นเริ่มต้นสูงสุดคือ 80 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีร้อยละการดูดซับ 88.55 (Figure 2(B)) เนื่องจากความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่สูงขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างเมทิลีนบลูที่อยู่ในสารละลาย และเมทิลีนบลูที่อยู่บนพื้นผิวตัวดูดซับ จึงเกิดแรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวลสารระหว่างโมเลกุลเมทิลีนบลู และตำแหน่งดูดซับให้มากขึ้น [30]

3.2.3 ผลการทดลองระยะเวลาในการดูดซับ

การดูดซับด้วยระยะเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง พบว่าหลังการดูดซับมีความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ดังนี้ 9.29, 9.10, 9.05, 8.99 และ 8.82 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีค่าร้อยละการดูดซับ 88.39, 88.63, 88.69, 88.77 และ 88.97 ตามลำดับ ดังนั้น ระยะเวลาที่เปลือกล้วนเหลืองสามารถดูดซับได้สูงสุดคือ 5 ชั่วโมง ซึ่งมีร้อยละการดูดซับ 88.97 (Figure 2(C)) เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาทำให้สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้มากขึ้น และเกิดการแพร่ไปยังตำแหน่งที่ดูดซับ (adsorbed sites) ของตัวดูดซับได้ดีขึ้น [31]

3.2.4 ผลการทดลองความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ

ผลของความเร็วรอบเขย่าในการดูดซับ มีดังนี้ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบ/นาที หลังการดูดซับมีความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ดังนี้ 6.64, 5.40, 4.69, 7.18, 9.78 และ 9.96 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีค่าร้อยละการดูดซับที่ 91.70, 93.25, 94.14, 91.02, 87.78 และ 87.55 ตามลำดับ ดังนั้นความเร็วรอบเขย่าที่สามารถดูดซับได้สูงสุดคือ 200 รอบ/นาที มีร้อยละการดูดซับ 94.14 (Figure 2(D)) ซึ่งการเพิ่มความเร็วรอบเขย่าจาก 100-200 รอบ/นาที มีแนวโน้มการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างตัวดูดซับกับโมเลกุลของเมทิลีนบลู [32] แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 250-350 รอบ/นาที กลับพบว่ามีการ

ดูดซับลดลง เนื่องจากความเร็วรอบเขย่าที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดแรงเฉือน (shear forces) ซึ่งขัดขวางกระบวนการดูดซับ และทำให้โมเลกุลเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับไว้หลุดออก จึงทำให้การดูดซับลดลง [33]

3.2.5 ผลการทดลองความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับ

ผลความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเมทิลีนบลู 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 พบว่า หลังการดูดซับมีความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ดังนี้ 13.75, 12.23, 11.80, 11.24, 11.08 และ 8.52 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีค่าร้อยละการดูดซับ 82.81, 84.71, 85.25, 85.94, 86.15 และ 89.34 ตามลำดับ ดังนั้นความเป็นกรด-ด่างที่สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุดคือ 11 มีร้อยละการดูดซับ 89.34 (Figure 2(E)) เนื่องจากเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมประจุบวก มีค่าพีเคเอ (pK_a) 3.8 [34] และพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (point of zero charge) ของตัวดูดซับ เมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่ามากกว่าความเป็นกรด-ด่างที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ จึงทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุเป็นลบ ดังนั้น จึงสามารถดูดซับกับโมเลกุลเมทิลีนบลูซึ่งมีประจุเป็นบวกได้ดี ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) ซึ่งสอดคล้องกับการดูดซับกับเปลือกเสาวรสมและเปลือกเมล็ดทานตะวัน [35, 36]

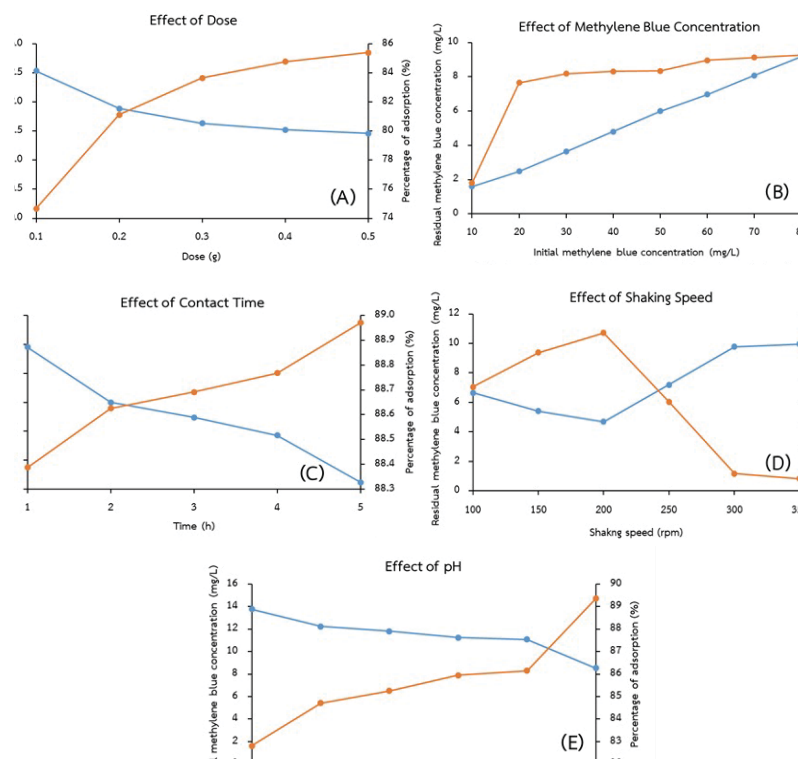


Figure 2 Effects of (A) dose (B) methylene blue concentration (C) contact time (D) shaking speed and (E) pH on the adsorption of soybean shells.

3.3 ผลการศึกษาแบบการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกถั่วเหลือง

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R^2) ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์เท่ากับ 0.526 (Figure 3 (A)) และแบบฟรุนดลิชเท่ากับ 0.994 (Figure 3 (B)) ซึ่งมีค่าโคสแควร์ (χ^2) เท่ากับ 0.003 และ 0.005 ตามลำดับ พบว่า R^2 ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบแลงเมียร์ ดังนั้น การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเปลือกถั่วเหลืองมีรูปแบบสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และมีค่า K_f และค่า $1/n$ เท่ากับ 16.49 และ 0.87 ตามลำดับ โดยค่า $1/n$ จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง แสดงว่าการดูดซับเป็นไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ [37] ซึ่งอธิบายได้ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) และการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น ซึ่งใช้ทั้งการดูดซับทางเคมีและกายภาพ [38] ซึ่งสอดคล้อง

กับงานวิจัยอื่น ๆ ที่พบว่ามีการดูดซับเป็นแบบฟรุนดลิช เช่น เปลือกหน่อไม้ [32] ถ่านดินเสม็ดขาว [28] ใบเจแปนนิสฮอบส์ [29] และเปลือกกระเทียม [27] (Table 3) เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการบำบัดน้ำจากการย้อมผ้าของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งนิยมใช้การตกตะกอนด้วยสารเคมี เช่น Anionic Polymer Polyelectrolyte โดยใช้ในการบำบัดน้ำเสียปริมาณ 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตร [39] มีค่าใช้จ่ายโดยประมาณ 1,000 บาท แต่หากใช้เปลือกถั่วเหลืองในการบำบัดน้ำเสีย จะใช้ปริมาณ 1,000 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งไม่มีค่าใช้จ่ายในการซื้อตัวดูดซับ อีกทั้งยังเป็นการกำจัดของเสียทางการเกษตร และไม่มีส่วนประกอบของสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้วัสดุจากธรรมชาติ

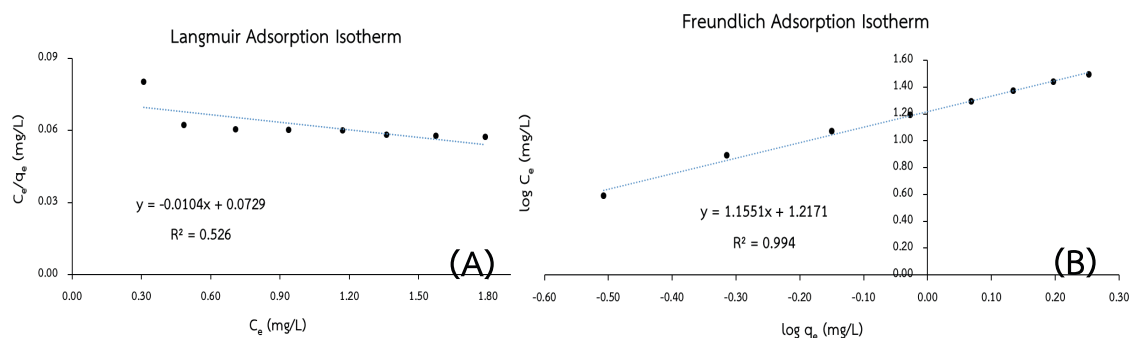


Figure 3 Figure 3 (A) Langmuir adsorption isotherms of methylene blue by soybean shells and (B) Freundlich adsorption isotherms of methylene blue by soybean shells.

Table 3 Constants of Langmuir and Freundlich adsorption isotherms of methylene blue on soybean shells.

Samples	Langmuir Adsorption Isotherms				Freundlich Adsorption Isotherms				References
	q_m (mg/L)	K_L (L/mg)	R^2	x^2	K_f (L/mg)	$1/n$	R^2	x^2	
Bamboo shoot shell	29.24	0.05	0.923	-	1.55	0.72	0.988	-	[29]
Japanese hobbs leaves	145.56	0.09	0.950	-	30.58	0.32	0.991	-	[26]
Garlic peel	82.64	0.09	0.980	-	7.88	1.57	0.990	-	[24]
Soybean shell	-96.15	-0.14	0.526	0.003	16.49	0.87	0.994	0.005	This study

4. สรุป

ตัวอย่างเปลือกถั่วเหลือง ซึ่งเป็นของเสียหลังการเก็บเกี่ยวเมล็ดถั่วเหลือง สามารถนำมาเป็นตัวดูดซับเมทิลีนบลู ผลการวิเคราะห์พื้นผิวพบว่า มีลักษณะพื้นผิวขรุขระ เมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน มีแถบการสั่นที่ $3,412\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ -OH, แถบที่ $2,925$ และ $2,855\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ -CH, แถบที่ $1,744$, $1,647$ และ $1,417\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ -CO, แถบที่ $1,061$ และ 794 cm^{-1} ของหมู่ C-O-C และ -CH ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.63 ตารางเมตร/กรัม ปริมาตรรูพรุน 5.00×10^3 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม และขนาดรูพรุน 1.80 นาโนเมตร ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

เมทิลีนบลูได้ดีที่สุด พบว่า ต้องใช้เปลือกถั่วเหลืองที่ปริมาณ 0.2 กรัม ดูดซับความเข้มข้นของเมทิลีนบลูได้สูงสุดที่ 80 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้ระยะเวลา 5 ชั่วโมงด้วยความเร็วรอบเขย่า 200 รอบ/นาที ที่ความเป็นกรด-ด่าง 11 และมีรูปแบบการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช โดยมีค่า R^2 0.994 ซึ่งแสดงถึงการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น และพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้น เปลือกถั่วเหลืองจึงสามารถดูดซับเมทิลีนบลูในสารละลายได้ และเป็นการจัดการของเสียหลังการเก็บเกี่ยวถั่วเหลืองโดยการนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ. ดร. ธัญชัย บุญหนัก ที่ให้คำปรึกษา และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. References

- [1] Theeravechayan, P., 2006. Removal of reactive dyes in wastewater from textile bleaching factories using agricultural waste and waste from various industrial plants, News Letter MTEC. 3(30): 21-24. (in Thai)
- [2] Ritthichai, A., Sasithorn, M., 2014. Dye removal of textile wastewaters using crab shell activated carbon, Burapha Sci. J. 19(1): 131- 140. (in Thai)
- [3] Awan, A.G., 2013. Relationship between environment and sustainable economic development: A theoretical approach to environmental problems, Int. J. of Asian Soc. Sci. 3: 741-761.
- [4] Munir, M., Nazar, M.F., Zafar, M.N., Zubair, M., Ashfaq, M., Hosseini-Bandegharai, A., Khan, S.U.-D., Ahmad, A., 2020. Effective adsorptive removal of methylene blue from water by didodecyldimethylammonium bromide-modified brown clay, ACS Omega. 5: 16711-16721.
- [5] Thammongkol, P., Application of biotechnology to remove color in wastewater from dyeing factories, Available Source: https://www.atdp-textiles.org/blog_biotech_environment, March 1, 2024. (in Thai)
- [6] Department of Industrial Works, Announcement of the Ministry of Industry on Set standards for controlling wastewater drainage from factories that engage in businesses related to the tanning, polishing, or coating of animal leather, 2018, Available Source: <https://www.diw.go.th/webdiw/wp-content/uploads/2021/07/law-fac-env-12022562.pdf>, March 1, 2024. (in Thai)
- [7] Kasinathan, M., Thiripuranthagan, S., Sivakumar, A., 2020. Fabrication of sphere-like Bi₂MoO₆/ZnO composite catalyst with strong photocatalytic behavior for the detoxification of harmful organic dyes, Opt. Mater. 109: 110218.
- [8] Phasukphan, N., 2016. Treatment of fabric dyes from dyeing factory wastewater with microorganisms. Environ. J. 19(1): 17-24. (in Thai)
- [9] Ariffin, N., Abdullah, M.M.A.B., Mohd Arif Zainol, M.R.R., Murshed, M.F., Hariz-Zain, Faris, M.A., Bayuaji, R., 2017. Review on adsorption of heavy metal in wastewater by using geopolymer. MATEC Web of Conferences 97: 01023.
- [10] Liu, L., Luo, X.-B., Ding, L., Luo, S.-L., 2019. Application of nanotechnology in the removal of heavy metal from water, in: Nanomaterials for the removal of pollutants and resource reutilization. Elsevier, pp. 83-147.
- [11] Aghababai Beni, A., Jabbari, H., 2022, Nanomaterials for environmental applications, Results in Eng. 15: 100467.

- [12] Crini, G., Lichtfouse, E., 2019, Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment, *Environ. Chem. Lett.* 17: 145-155.
- [13] Pan, Z.F., An, L., 2019. Removal of heavy metal from wastewater using ion exchange membranes, in: applications of ion exchange materials in the environment. Springer International Publishing, Cham, pp. 25-46.
- [14] Popova, A., Boivin, S., Shintani, T., Fujioka, T., 2024. Development of high-integrity reverse osmosis membranes for enhanced removal of microorganisms, *Desalination*. 572: 117155.
- [15] Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., 2003. Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry, *Environ. Pollut.* 122: 435-445.
- [16] Rashed, M.N., 2013. Adsorption technique for the removal of organic pollutants from water and wastewater, *Organic pollutants-monitoring, risk and treatment*. Intech Open Rijeka, Croatia.
- [17] Marsh, H., Rodríguez-Reinoso, F., 2006. Activated carbon (origins), in: *Activated Carbon*. Elsevier, pp. 13-86.
- [18] Marshall, W.E., Wartelle, L.H., Boler, D.E., Toles, C.A., 2000. Metal ion adsorption by soybean hulls modified with citric acid: A comparative study, *Environ. Technol.* 21: 601-607.
- [19] Bharathi, K.S., Ramesh, S.T., 2013, Removal of dyes using agricultural waste as low-cost adsorbents: a review, *Appl. Water Sci.* 3, 773-790.
- [20] Suttanan, R., Piyamongkala, K., 2008. Kinetics and thermodynamics of adsorption methylene blue by groundnut shell, *KMUTT R&D J.* 4: 751-763. (in Thai)
- [21] Langmuir, I., 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, *J. Am. Chem. Soc.* 40: 1361-1403.
- [22] Freundlich, H.M.F., 1906. Over the adsorption in solution, *J. Phys. Chem.* 57: 385-471.
- [23] Riguetto, C.V.T., Harala, S.C., Rosseto, M., Ostwald, B.E.P., Massuda, L.Á., Nazari, M.T., Dettmer, A., Loss, R.A., Geraldi, C.A.Q., 2021. Soybean hull as an alternative biosorbent to uptake a reactive textile dye from aqueous solutions, *Matéria (Rio de Janeiro)*. 26.
- [24] Wei, X., Li, H.-R., Wang, L., He, Y.-F., Wang, R.-M., 2014. Soybean hulls residue adsorbent for rapid removal of lead ions, *Pure Appl. Chem.* 86: 711-720.
- [25] Alemdar, A., Sain, M., 2008, Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues - wheat straw and soy hulls, *Bioresour Technol.* 99: 1664-1671.
- [26] Mays, T.J., 2007. A new classification of pore sizes. pp. 57-62.

- [27] Hameed, B.H., Ahmad, A.A., 2009. Batch adsorption of methylene blue from aqueous solution by garlic peel, an agricultural waste biomass, *J. Hazard. Mater.* 164: 870-875.
- [28] Sukpreabprom, H., Chanmee, W., Komkonsu, A., Intalai, A., 2020. Removal of methylene blue by cajuput tree charcoal, *Adv. Sci. J.* 20.
- [29] Huang, Z., Wang, T., Yi, H., Li, X., 2021. Study on the adsorption of methylene blue from dye wastewater by *Humulus japonicus* leaves, in: Anpo, M., Song, F. (Eds.), *E3S Web of Conferences*. p. 03028.
- [30] Fatiha, M., Belkacem, B., 2013. Adsorption of methylene blue from aqueous solutions using natural clay, *J. Mater. Environ. Sci.* 35: 451-459.
- [31] Umpuch, C., Sakaew, S., 2013. Removal of methyl orange from aqueous solutions by adsorption using chitosan intercalated montmorillonite, *SJST.* 35: 451-459.
- [32] Ouengsirirawad, P., Ruangviriyachai, C., 2016. Adsorption of methylene blue dye using dried shell of bamboo shoot, pp. 343-350. (in Thai)
- [33] Baig, K.S., 2020. Interaction of enzymes with lignocellulosic materials: causes, mechanism and influencing factors, *Bioresour. and Bioprocess.* 7: 21.
- [34] Kim, J.R., Santiano, B., Kim, H., Kan, E., 2013. Heterogeneous oxidation of methylene Blue with Surface-Modified Iron-Amended Activated Carbon, *Am. J. Anal. Chemi.* 04: 115-122.
- [35] Pavan, F.A., Mazzocato, A.C., Gushikem, Y., 2008. Removal of methylene blue dye from aqueous solutions by adsorption using yellow passion fruit peel as adsorbent, *Bioresour. Technol.* 99: 3162-3165.
- [36] Hameed, B.H., 2008. Equilibrium and kinetic studies of methyl violet sorption by agricultural waste, *J. Hazard. Mater.* 154: 204-212.
- [37] Alkan, M., Çelikçapa, S., Demirbaş, Ö., Doğan, M., 2005, Removal of reactive blue 221 and acid blue 62 anionic dyes from aqueous solutions by sepiolite, *Dyes Pigm.* 65: 251-259.
- [38] Vadi, M., Zakeri, M., Yazdi, B., 2010. Application of the Freundlich Langmuir Temkin and Harkins-Jura adsorption isotherms for some amino acids and amino acids complexation with manganese ion (II) on carbon nanotube, *JPTC.* 7.
- [39] Green Water Treat, Chemical Waste Water Treatment, Available Source: <https://www.greenwatertreat.com>, March 1, 2024. (in Thai)