

การปรับปรุงเส้นใยมะพร้าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู Modification of Coconut Coir Fibers to Enhance the Adsorption Efficiency of Methylene Blue Dye

สุธิศา สมบัติดี* ปนัดดา ผ่านสำแดง หทัยรัตน์ นาคา และ บรรณารัตน์ อินทะกนก

Suthisa Sombatdee* Panadda Phansamdang Hathairat Nakha and Bannarat Intakanok

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จ.นครราชสีมา ประเทศไทย
Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University,
Nakhon Ratchasima, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 27 สิงหาคม 2568 วันที่แก้ไขบทความ : 27 มีนาคม 2569 วันที่ตอบรับบทความ : 31 มีนาคม 2569

Received: 27 August 2025, Revised: 27 March 2026, Accepted: 31 March 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดและปรับปรุงเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยหลังการปรับปรุงได้ผลิตเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 70 ผลการปรับปรุงได้รับการยืนยันด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ลักษณะสัณฐานวิทยา และองค์ประกอบธาตุโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และเอนเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปี (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้พื้นผิวของเซลลูโลสมีความขรุขระและมีรูพรุนเพิ่มขึ้น การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่า ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.05 กรัม ระยะเวลา 60 นาที และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 73.48 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir model) แสดงถึงพฤติกรรมดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ขณะที่จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นผ่านกลไกการดูดซับทางเคมี ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุดูดซับที่มีศักยภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมอินทรีย์

คำสำคัญ : การดูดซับ การกำจัดสีย้อม สีย้อมเมทิลีนบลู เส้นใยมะพร้าว

Abstract

This study investigated the extraction and modification of cellulose from coconut coir fibers using hydrogen peroxide and sodium hydroxide for application as an adsorbent for methylene blue dye. After the modification process, the cellulose yield was 70%. The effectiveness of the modification process was confirmed through the analysis of functional groups, surface morphology, and elemental composition using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), respectively. The results indicated that lignin and hemicellulose were effectively removed, resulting in a rougher and more porous cellulose surface. The adsorption study revealed that the optimal conditions for methylene blue removal were a pH of 7, an initial dye concentration of 150 mg/L, an adsorbent dosage of 0.05 g, a contact time of 60 min, and a temperature of 30 °C, under which an adsorption capacity as high as 73.48 mg/g was achieved. The adsorption isotherm fitted well with the Langmuir model, indicating monolayer adsorption, while the adsorption kinetics followed the pseudo-second-order model, suggesting that the process occurred via a chemisorption mechanism. These results demonstrate that cellulose derived from coconut coir fibers possesses strong potential as an environmentally friendly adsorbent for the treatment of wastewater contaminated with organic dyes.

Keywords: Adsorption, Dye removal, Methylene blue dye, Coconut coir fibers

1. บทนำ

การเติบโตทางเศรษฐกิจและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรมส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการปนเปื้อนของสีย้อมสังเคราะห์จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โรงพิมพ์ เครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมพลาสติก แม้ว่าสีย้อมสังเคราะห์จะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในระดับต่ำ แต่เนื่องจากสีย้อมมีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนและมีความเสถียรสูง ทำให้ย่อยสลายได้ยากในสิ่งแวดล้อม และยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำ เช่น การบดบังแสงที่ส่องผ่านสู่ผิวน้ำ ซึ่งลดการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำและการถ่ายเทออกซิเจน ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลงจนไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดการระคายเคือง ผื่นแพ้ หรือการอักเสบทางผิวหนังในมนุษย์ (Gupta & Suhas, 2009; Khan et al., 2022)

สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue: MB) เป็นสีย้อมประเภทประจุบวก (Cationic dye) ที่มีโครงสร้างอะโรมาติกเสถียรและสามารถละลายน้ำได้ดี แม้ว่าในทางอุตสาหกรรมสิ่งทอจะไม่ได้ใช้สีย้อมชนิดนี้อย่างแพร่หลายโดยตรง แต่สีย้อมเมทิลีนบลูมักถูกเลือกใช้ในงานวิจัยด้านสิ่งแวดล้อมในฐานะ “สีย้อมตัวแทน (Model dye)” เพื่อจำลองสถานะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมอินทรีย์จากกระบวนการผลิตสิ่งทอ

เนื่องจากมีความเสถียรทางเคมีสูง สามารถตรวจวัดเชิงปริมาณได้ง่ายจากค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ($\lambda_{\max} \approx 664 \text{ nm}$) และให้ผลซ้ำได้ดีระหว่างการทดลองซ้ำภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จึงเป็นสีย้อมมาตรฐานที่นิยมใช้ สำหรับการประเมินความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ (Hameed et al., 2007; Ho, 2020; Khan et al., 2022)

การสะสมของสีย้อมเมทิลีนบลูในสิ่งแวดล้อมและร่างกายมนุษย์อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น หัวใจเต้นผิดจังหวะ ภาวะตัวเขียว และการทำลายเนื้อเยื่อ (Hameed et al., 2007; Khan et al., 2022) ดังนั้น การพัฒนากระบวนการและวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียจึงเป็นประเด็นสำคัญ กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process) กระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (Photochemical degradation process) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis process) กระบวนการแยกด้วยเยื่อเมมเบรน (Membrane separation process) และกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation process) (Miyah et al., 2018) นอกจากนี้ยังมีกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง ประหยัด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Kandisa et al., 2016; Seow & Lim, 2016) โดยเฉพาะการใช้วัสดุดูดซับจากชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีส่วนประกอบของพืชหรือวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic materials) เช่น ผักตบชวา ฟางข้าว เปลือกข้าวโพด และเปลือกผลไม้ วัสดุชีวมวลดังกล่าวประกอบด้วย ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันจำนวนมากที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุและสร้างพันธะกับสีย้อมในสารละลาย ทำให้มีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดี รวมทั้งโครงสร้างของเซลล์พืชมีลักษณะเป็นรูพรุนที่เกิดจากท่อลำเลียง ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงและเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับ (Gupta & Suhas, 2009; Yadav et al., 2024) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุลิกโนเซลลูโลสขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ วิธีการปรับสภาพ และสภาวะการทดลอง (Akindolie & Choi, 2023)

เส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุที่ได้จากส่วนของเปลือกมะพร้าว มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวสีน้ำตาล เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและหาได้ง่าย มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มักถูกใช้ประโยชน์เป็นวัสดุคลุมดินหรือวัสดุเสริมแรงในงานก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม เส้นใยมะพร้าวทะเลมะพร้าว รวมถึงขุยมะพร้าวและกากมะพร้าว ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดสารมลพิษทางน้ำ (Baunsele & Missa, 2021; Etim et al., 2016; Ghosh et al., 2024; Guar et al., 2022; Sharma et al., 2009; Wong et al., 2013) โดยเฉพาะเมื่อนำมาปรับสภาพด้วยกรดหรือด่าง ซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวและปรับปรุงกลุ่มฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการยึดเกาะสีย้อม ทำให้มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพ (Belmabrouk et al., 2023; Man et al., 2015; Omwoyo & Otieno, 2024) อย่างไรก็ตาม แม้งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุดูดซับสีย้อมจะมีจำนวนมาก แต่การสกัดเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวยังคงต้องอาศัยระยะเวลาในการเตรียมวัสดุนาน ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดสำคัญที่ทำให้การประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังไม่แพร่หลาย

ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวด้วยการสกัดและปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และศึกษาประสิทธิภาพการใช้เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ค่าพีเอชของ

สารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ระยะเวลา และอุณหภูมิ ตลอดจนศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมแลงเมียร์และฟรุนดลิช และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโดยใช้แบบจำลองสมการอัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

นำเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและอบให้แห้ง จำนวน 5 กรัม เติมน้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร นำไปต้มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที กวนสารละลายตลอดเวลา เมื่อครบกำหนดเวลาให้นำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน หลังจากนั้นเติมน้ำไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 น้ำหนักโดยปริมาตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร และต้มอีกครั้ง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนสารละลายเป็นกลาง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกว่าตัวอย่างจะแห้ง และเก็บไว้ในภาชนะที่แห้งและปิดสนิท เส้นใยที่ได้คือเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว

2.2 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของเซลลูโลส

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยมะพร้าวและเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) (FTIR รุ่น Tensor II 27 บริษัท Bruker) ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดสนามปล่อย (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคเอนเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปี (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS) (FESEM-EDS: ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7800F)

2.3 การหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge)

วิธีการนี้ถูกประยุกต์จากงานวิจัยของ Sombatsri et al. (2017) และ Tan et al. (2018) โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 2-12 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว 0.05 กรัม ใส่ลงในสารละลายที่พีเอชต่าง ๆ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าพีเอชหลังการเขย่า คำนวณค่าความเปลี่ยนแปลงของพีเอช (ΔpH) สร้างกราฟระหว่างค่าความเปลี่ยนแปลงของพีเอชกับพีเอชเริ่มต้น และหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์จากจุดตัดแกนที่ ΔpH เท่ากับศูนย์

2.4 การศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว โดยการทดลองเป็นแบบแบตช์ (Batch experiment) ใช้ตัวอย่างปริมาณ 0.05 กรัม ปริมาตรสารละลาย 25 มิลลิลิตร และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Shaker water bath รุ่น VS-8480SRN-L บริษัท

Vision) ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อนาที ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ระยะเวลา และอุณหภูมิในการดูดซับ จากนั้นวัดปริมาณสีที่เหลือจากการดูดซับด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) (UV-Vis บริษัท Thermo SCIENTIFIC รุ่น GENSYS) ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับตามสมการที่ (1) และคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ ตามสมการที่ (2)

$$\text{ร้อยละการดูดซับ} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{C_i - C_e}{W} \times V \quad (2)$$

เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_e คือ ความเข้มข้นหลังการดูดซับของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร) q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) W คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม) และ V คือ ปริมาตรของสีย้อม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

1) การศึกษาผลของพีเอชของสารละลายต่อการดูดซับสีย้อม

เตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูให้มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 3 5 6 7 และ 9 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำตัวดูดซับปริมาณ 0.05 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูปริมาตร 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ทำการเขย่าแบบต่อเนื่องโดยใช้เวลา 60 นาที เมื่อครบกำหนดเวลารองตัวอย่างด้วยตะแกรง จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร และนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ

2) การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

เตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูให้มีความเข้มข้น 20 40 50 60 80 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 จากนั้นนำตัวดูดซับปริมาณ 0.05 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูปริมาตร 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ทำการเขย่าแบบต่อเนื่องโดยใช้เวลา 60 นาที เมื่อครบกำหนดเวลารองตัวอย่างด้วยตะแกรง จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ

3) การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูให้มีความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 จากนั้นนำตัวดูดซับปริมาณ 0.05 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูปริมาตร 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ทำการเขย่าโดยใช้เวลา 3 5 7 10 30 60 90 และ 120 นาที เมื่อครบกำหนดเวลารองตัวอย่างด้วยตะแกรง นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดค่าการดูดกลืน

แสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร และนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ

2.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

นำผลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับตามแบบจำลองสมการอัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมด้วยสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที⁻¹) และอันดับที่สองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที) ตามลำดับ และ t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

2.6 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลู

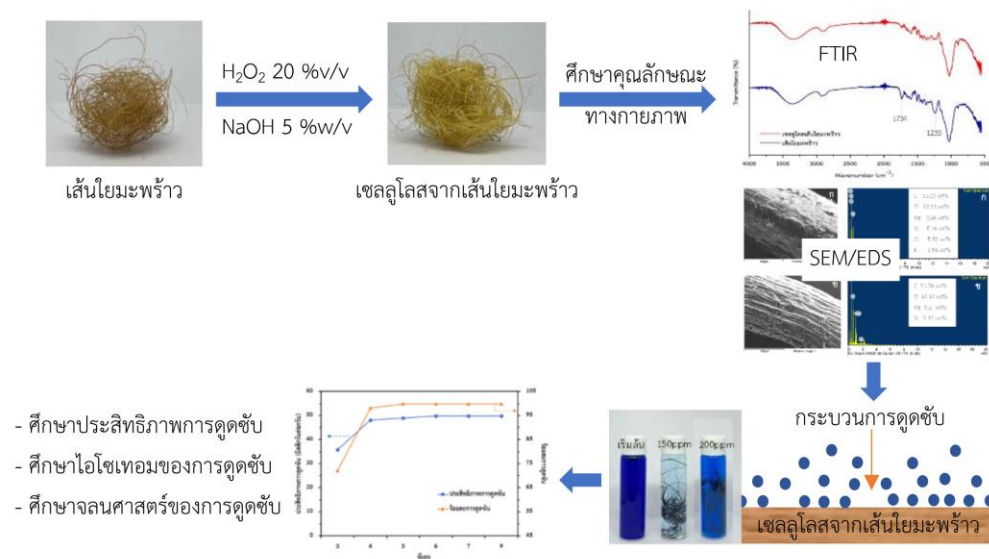
นำผลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาหาค่าไอโซเทอมที่เหมาะสมและอธิบายการดูดซับ โดยศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิชด้วยสมการที่ (5) และสมการที่ (6) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_L b C_e} \quad (5)$$

$$\ln(q_e) = \ln(k_f) + \frac{1}{n} \ln(C_e) \quad (6)$$

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) Q_L คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม) b คือ ค่าคงที่สมดุลของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) k_f คือ ค่าคงที่สมดุลของฟรุนดลิช (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ ค่า $\frac{1}{n}$ คือ ปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

แผนภาพรอบการวิจัยการศึกษาการใช้เซลล์โลสจากเส้นใยมะพร้าวสำหรับกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูแสดงดังรูปที่ 1 โดยเริ่มจากการเตรียมเซลล์โลสจากเส้นใยมะพร้าวด้วยการปรับสภาพทางเคมี จากนั้นศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของวัสดุด้วยเทคนิค FTIR และ SEM/EDS และนำวัสดุที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเมทิลินบลู รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ ตลอดจนจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของกระบวนการดูดซับ



รูปที่ 1. แผนภาพรอบการวิจัยการศึกษาการใช้เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวสำหรับกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลผลิตร้อยละของเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว

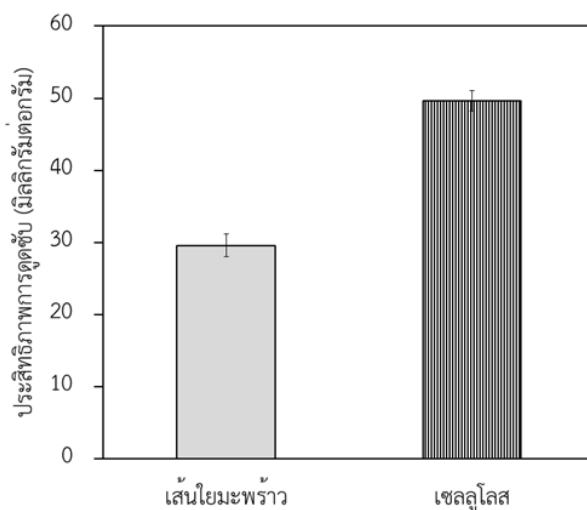
จากการสกัดและปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 น้ำหนักโดยปริมาตร ส่งผลให้มวลของเส้นใยลดลงเนื่องจากการกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส โดยหลังการปรับสภาพ พบว่า ผลผลิตของเซลลูโลสคิดเป็นร้อยละ 70 แสดงดังตารางที่ 1 ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Esmeraldo et al. (2010) และ Sultana et al. (2022) ที่รายงานว่า การสกัดจากวัสดุลิกโนเซลลูโลสโดยใช้ต่างสามารถให้ผลผลิตเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 ซึ่งการลดลงของมวลในงานวิจัยนี้สัมพันธ์กับการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากโครงสร้างเส้นใย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยปรับลักษณะของวัสดุให้มีศักยภาพต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ

ตารางที่ 1. ผลผลิตร้อยละของเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว

การทดลอง (ครั้ง)	น้ำหนักเส้นใยเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักเส้นใยสุดท้าย (กรัม)	ผลผลิตร้อยละ (%)
1	5.00	3.48	69.60
2	5.00	3.52	70.40
3	5.00	3.50	70.00
เฉลี่ย	5.00	3.50	70.00

3.2 ผลการเปรียบเทียบการดูดซับสีของเส้นไหมมะพร้าวและเซลลูโลสจากเส้นไหมมะพร้าว

การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของเส้นไหมมะพร้าวและเซลลูโลสจากเส้นไหมมะพร้าวที่ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าความสามารถในการดูดซับสีของเส้นไหมมะพร้าวโดยใช้เส้นไหมมะพร้าวเท่ากับ 29.59 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่เซลลูโลสจากเส้นไหมมะพร้าวที่สกัดได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเป็น 49.64 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่า การปรับสภาพเส้นไหมมะพร้าวก่อนการดูดซับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้สูงขึ้น เนื่องจากการปรับสภาพเส้นไหมมะพร้าวช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งเป็นผลมาจากการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากพื้นผิวของเส้นไหม ส่งผลให้โครงสร้างมีความพรุนสูงขึ้น และมีบริเวณยึดจับ (Binding sites) ที่เหมาะสมต่อการดูดซับโมเลกุลสีย้อมเพิ่มขึ้น (Aziz et al., 2022)



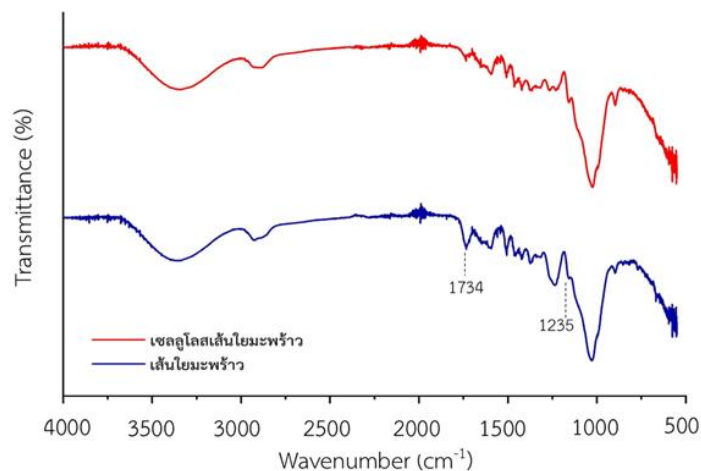
รูปที่ 2. ความสามารถในการดูดซับสีของเส้นไหมมะพร้าวและเซลลูโลสจากเส้นไหมมะพร้าว

3.3 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของเซลลูโลส

1) ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เมื่อนำตัวดูดซับเส้นไหมมะพร้าวและเซลลูโลสจากเส้นไหมมะพร้าวมาศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสาร โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3 พบว่า ปรากฏเลขคลื่นที่ตำแหน่งที่มีลักษณะคล้ายกัน ได้แก่ ที่ตำแหน่ง $3500-3000\text{ cm}^{-1}$ (O-H stretching), 2944 cm^{-1} (C-H stretching), $1500-1600\text{ cm}^{-1}$ (C=C stretching), 1235 cm^{-1} (C=O stretching) และ 1025 cm^{-1} (-O- stretching) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนิล และอีเทอร์ หรือเอสเทอร์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของผนังพืช เช่น คาร์โบไฮเดรต ประเภทเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (Baunsele & Missa, 2021; Deng et al., 2013) สำหรับเซลลูโลสจากเส้นไหมมะพร้าวไม่ปรากฏเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 1734 และ 1235 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสัน

แบบยึดของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ถูกกำจัดออกไปและเหลือเพียงเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว (Belmabrouk et al., 2023; Yu et al., 2004)



รูปที่ 3. สเปกตรัม FTIR ของเส้นใยมะพร้าวและเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว

2) ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และการหาองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDS

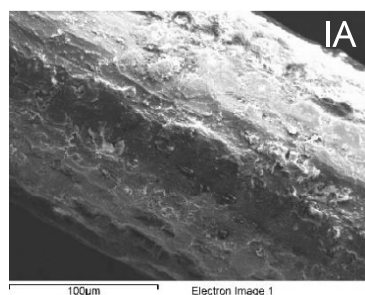
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและสเปกตรัม EDS ของตัวอย่างเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ปรับสภาพ (IA) และ (IIA) และเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว (IB) และ (IIB) แสดงดังรูปที่ 4 (ก) – 4 (ง) พบว่า ตัวอย่างเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ปรับสภาพมีขนาดประมาณ 100 ไมโครเมตร ลักษณะพื้นผิวมีลักษณะผิวเรียบกว่าเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว ซึ่งเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวผิวมีลักษณะขรุขระและเป็นร่องลึก มีโพรงและรูพรุนมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ปรับสภาพ แสดงให้เห็นว่า เฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกกำจัดออก (Esmeraldo et al., 2010) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ที่ไม่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว

จากผลของสเปกตรัม EDS พบว่าในตัวอย่างเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ปรับสภาพ (IIA) พบธาตุ C (53.13 wt%) และธาตุ O (43.63 wt%) พร้อมด้วยธาตุ Mg, Si, Cl และ K ปริมาณเล็กน้อย ในขณะที่เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว (IIB) พบธาตุ C (51.96 wt%) และธาตุ O (47.47 wt%) พร้อมด้วยธาตุ Mg และ Si ปริมาณเล็กน้อย และไม่ปรากฏธาตุ Cl และ K แสดงให้เห็นว่า กระบวนการสกัดสามารถกำจัดสิ่งเจือปนอินทรีย์เหล่านี้ออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

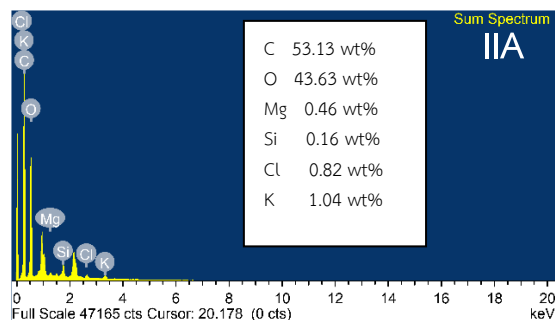
3.4 สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว

1) ผลของพีเอชของสารละลายที่มีต่อการดูดซับ

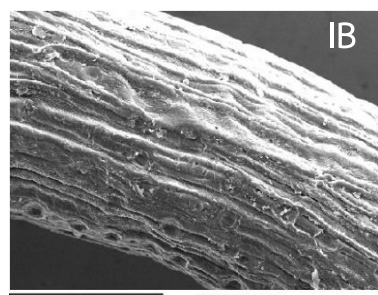
ผลของพีเอชของสารละลายที่มีต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวในช่วงค่าพีเอช 3 - 9 แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับและร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนระหว่างค่าพีเอช 3 ถึง 4 และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงค่าพีเอช 5 - 9 แสดงให้เห็นว่า การดูดซับสีย้อม เมทิลีนบลูขึ้นอยู่กับสภาพประจุของพื้นผิวตัวดูดซับ โดยเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวมีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) เท่ากับ 4.88 สามารถตีความได้ว่า เมื่อพีเอชของสารละลายต่ำกว่าค่า pH_{pzc} พื้นผิวของตัวดูดซับจะแสดงประจุบวก เนื่องจากเกิดการโปรตอนเนต (Protonation) ของหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) และหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ส่งผลให้เกิดแรงผลักกับโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลู (MB^+) ที่มีประจุบวก นอกจากนี้โปรตอน (H^+) ในสารละลายอาจเกิดการแข่งขันในการเข้าจับกับโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลู (MB^+) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าต่ำ แต่เมื่อพีเอชของสารละลายสูงกว่าค่า pH_{pzc} หมู่ฟังก์ชันดังกล่าวจะเกิดการคายโปรตอน (Deprotonation) ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับแสดงประจุลบ เช่น $-\text{O}^-$ และ $-\text{COO}^-$ และเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุลบบนพื้นผิวของวัสดุกับประจุบวกของสีย้อมเมทิลีนบลู ทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูมีแนวโน้มสูงขึ้น (Bulut & Aydin, 2006; Gupta & Suhas, 2009; Hameed et al., 2007; Mosoarca et al., 2022) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้พีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 ซึ่งอยู่ในช่วงที่พื้นผิวของวัสดุมีประจุลบสมดุลต่อแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตและปฏิสัมพันธ์ทางเคมี โดยความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 49.83 มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็นร้อยละ 99.83



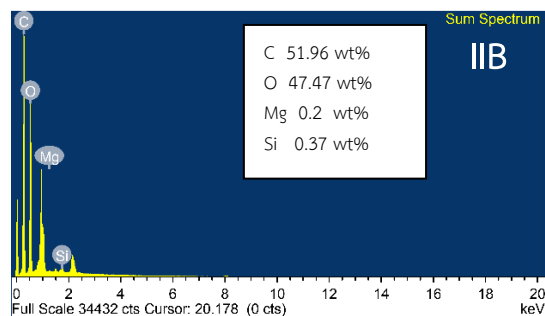
(ก) สัณฐานวิทยาของตัวอย่างเส้นใยมะพร้าว



(ข) สเปกตรัม EDS ของตัวอย่างเส้นใยมะพร้าว

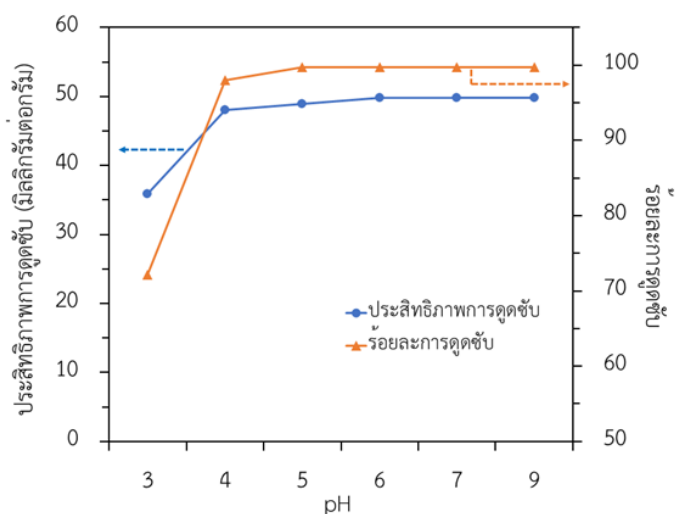


(ค) สัณฐานวิทยาของตัวอย่างเซลลูโลส



(ง) สเปกตรัม EDS ของตัวอย่างเซลลูโลส

รูปที่ 4. สัณฐานวิทยาและสเปกตรัม EDS ของตัวอย่างเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ปรับสภาพ (IA และ IIA) และเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว (IB และ IIB)



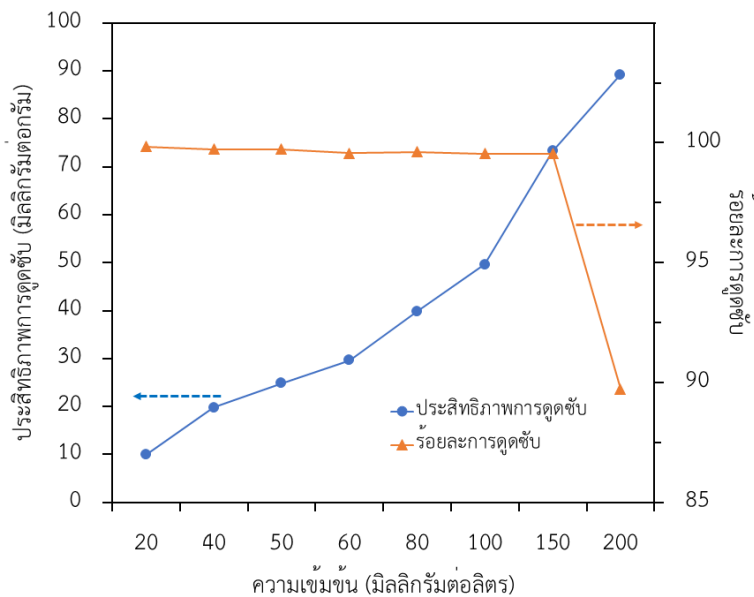
รูปที่ 5. ผลของความสามารถในการดูดซับสีย้อมของเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวที่พีเอชต่าง ๆ

2) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับ

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยใช้เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว 0.05 กรัม ต่อสารละลายปริมาตร 25 มิลลิลิตร และเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 20 ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของสารละลายเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลา 60 นาที แสดงดังรูปที่ 6 และภาพถ่ายการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จากแรงขับเคลื่อนมวลสารที่สูงขึ้น ส่งผลให้การแพร่ของโมเลกุลสีย้อมจากสารละลายเข้าสู่พื้นผิวของเซลลูโลสเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น (Mustikaningrum et al., 2022; Tan et al., 2018) อย่างไรก็ตาม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ร้อยละการดูดซับลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ถึงการอิ่มตัวของตำแหน่งดูดซับทำให้โมเลกุลสีย้อมบางส่วนไม่สามารถเข้าจับบนพื้นผิวได้ทั้งหมด (Ouengsirirawad & Ruangviriyachai, 2016; Yadav et al., 2024) ดังนั้น ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุด 73.31 มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็นร้อยละ 99.55

ตารางที่ 2. ภาพถ่ายตัวอย่างการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

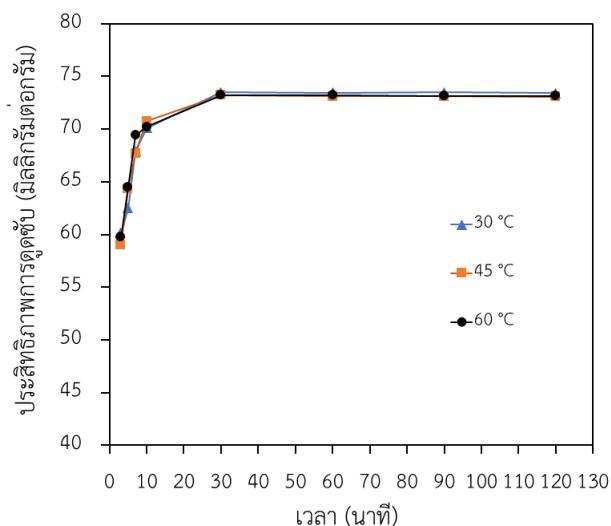
ความเข้มข้นสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
20	40	50	60	80	100	150	200



รูปที่ 6. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลูต่อการดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดูดซับและร้อยละของการดูดซับ

3) ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อการดูดซับ

ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้เซลล์โลสจากเส้นใยมะพร้าว ปริมาณ 0.05 กรัมต่อสารละลายปริมาตร 25 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช เท่ากับ 7 เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เปลี่ยนแปลงเวลาที่ 3 ถึง 120 นาที และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลแสดงดังรูปที่ 7 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเกิดอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ถึง 30 นาทีแรก โดยที่ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส เท่ากับ 73.46 73.11 และ 73.22 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ณ เวลาเข้าสู่สมดุลที่ 60 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นเนื่องจากตำแหน่งดูดซับ (Active sites) บนพื้นผิวเซลล์โลสยังว่างอยู่จำนวนมาก ส่งผลให้โมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูสามารถแพร่เข้าสู่พื้นผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้นอัตราการดูดซับลดลงเมื่อพื้นผิวถูกครอบครองมากขึ้นจนเข้าสู่ภาวะสมดุล (Ho & McKay, 1999) จากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างอุณหภูมิทั้งสามระดับด้วยสถิติ one-way ANOVA พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F = 0.007$, $p = 0.993 > 0.05$) ซึ่งบ่งชี้ว่าอุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อปริมาณการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จึงเหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป เนื่องจากเป็นอุณหภูมิต่ำที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดโดยไม่ต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนเพิ่มเติม



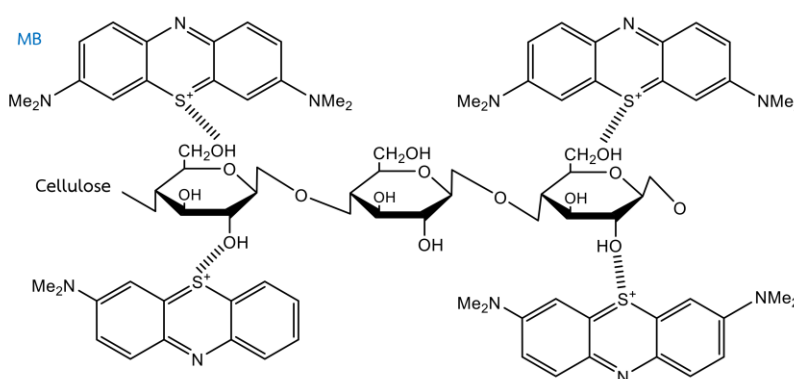
รูปที่ 7. ผลของเวลากับความสามารถในการดูดซับสีย้อมของเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 °C

3.5 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ 2 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) ดังแสดงในสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้มากที่สุด ผลแสดงดังตารางที่ 3 พบว่า จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวมีความสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ใกล้เคียงเท่ากับ 1 มากกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และมีค่าปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e,cal}$) ใกล้เคียงกับค่าปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) แสดงว่ากลไกในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวขึ้นอยู่กับทั้งตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ และการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้เป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) โดยมีการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุและการสร้างพันธะเชิงซ้อนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) หรือหมู่แอลคอกไซด์ดีพรอตเนต ($-O^-$) บนพื้นผิวเซลลูโลสกับหมู่เฮเทอโรอะตอมที่มีประจุบวก (เช่น S^+) ในโครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลู (MB^+) ส่งผลให้เกิดการยึดจับแบบเฉพาะตำแหน่งที่มีความเสถียรสูง กลไกดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงลักษณะของการเกิดพันธะเชิงซ้อน (Complexation) ระหว่างโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีประจุบวกและหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส (Kannan et al., 2009)

ตารางที่ 3. พารามิเตอร์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

อุณหภูมิ (°C)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
		$q_{e,cal}$ (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	$q_{e,cal}$ (mg/g)	k_2 (g/mg.min)	R^2
30	73.48	6.99	0.0600	0.7690	74.07	0.02307	1
45	73.22	5.99	0.0404	0.8010	73.53	0.02341	1
60	73.22	1.66	0.0415	0.1192	73.53	0.02341	1



รูปที่ 8. กลไกการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) กับเซลลูโลส (Kannan et al., 2009)

3.6 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวกับความเข้มข้นของสีย้อมมาพล็อตกราฟตามสมการเส้นตรงของแบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังแสดงในสมการที่ (5) และสมการที่ (6) ตามลำดับ ผลแสดงดังตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่า กลไกการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว สอดคล้องกับแบบจำลองแลงเมียร์ เนื่องจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากไอโซเทอมแลงเมียร์นี้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากกว่าแบบฟรุนดลิช แสดงว่าสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbed species) จะถูกยึดไว้ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนพื้นผิวเท่านั้น (หมายความว่า การดูดซับสามารถเกิดได้มากที่สุด และมีความหนาเพียงชั้นเดียว ไม่มีการซ้อนทับกัน) เมื่อพิจารณาค่า $1/n$ จากสมการฟรุนดลิช พบว่า เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณตำแหน่งที่เกิดการดูดซับมีจำกัด (Baunsele et al., 2024)

ตารางที่ 4. พารามิเตอร์ของแบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอมและฟรุนดลิชไอโซเทอม

ตัวดูดซับ	แบบจำลองแลงเมียร์			แบบจำลองฟรุนดลิช		
	Q _L (mg/g)	b (mL/mg)	R ²	lnK _f (L/g)	1/n (L/mg)	R ²
เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าว	57.14	6.731	0.9613	3.8293	0.331	0.8684

เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูสูงสุด (Q_L) ของเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้กับวัสดุชีวภาพชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า วัสดุในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า กาแฟ (Coffee residues) เส้นใยมะพร้าว (Coconut fiber) ผักตบชวา (Water hyacinth) และเปลือกหน่อไม้แห้ง (Dried shell of bamboo shoots) และอยู่ในระดับใกล้เคียงกับถ่านจากกะลามะพร้าว (Coconut shell charcoal) ดังนั้น วัสดุในงานวิจัยนี้ มีสมรรถนะการดูดซับอยู่ในช่วงปานกลางถึงค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับวัสดุชีวภาพที่มีรายงานมาก่อนหน้านี้

ตารางที่ 5. ตารางเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_L) ของวัสดุดูดซับชีวภาพชนิดต่าง ๆ

ชนิดวัสดุดูดซับ	Q _L (mg/g)	อ้างอิง
Coffee residues	4.68	Nitayaphat et al. (2015)
Dried shell of bamboo shoots	29.24	Ouengsirirawad & Ruangviriyachai (2016)
Water hyacinth	21.88	Kahapana & Phowan (2020)
Coconut shell charcoal	36.49	Prasoetsopha et al. (2023)
Coconut Fiber	2.00	Baunsele et al. (2024)
Pineapple peel waste	123.46	Sombatphutthakun et al. (2025)
Coconut coir fibers (cellulose)	57.14	งานวิจัยนี้

4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การเตรียมเซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR SEM และ EDS ยืนยันว่ากระบวนการสกัดสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระและมีรูพรุนมากขึ้น อีกทั้งยังพบว่าองค์ประกอบที่เป็นสิ่งเจือปน เช่น Cl และ K หายไปหลังการสกัด แสดงให้เห็นถึงความบริสุทธิ์ของโครงสร้างเซลลูโลสที่ได้ และภายใต้สภาวะที่เหมาะสมคือ พีเอชของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 7 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.05 กรัม ระยะเวลา 60 นาที และอุณหภูมิ 30 °C เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 73.48 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการศึกษาไอโซเทอมแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์ ซึ่งบ่งชี้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ขณะที่การศึกษาจลนศาสตร์สอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

แสดงให้เห็นว่า กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นผ่านกลไกการดูดซับทางเคมีเป็นหลัก ดังนั้น เซลลูโลสจากเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพมีศักยภาพสูงที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนอุปกรณ์การทดลอง สารเคมี สถานที่และเครื่องมือเพื่อใช้ในวิจัยและการวิเคราะห์ และงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

เอกสารอ้างอิง (References)

- Akindolie, M. S., & Choi, H. J. (2023). Acid modification of lignocellulosic derived material for dye and heavy metals removal: A review. *Environmental Engineering Research*, 28(2), Article 210574. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.574>
- Aziz, T., Farid, A., Haq, F., Kiran, M., Ullah, A., Zhang, K., Li, C., Ghazanfar, S., Sun, H., Ullah, R., Ali, A., Muzammal, M., Shah, M., Akhtar, N., Selim, S., Hagagy, N., Samy, M., & Al Jaouni, S. K. (2022). A review on the modification of cellulose and its applications. *Polymers*, 14(15), Article 3206. <https://doi.org/10.3390/polym14153206>
- Baunsele, A. B., & Missa, H. (2021). Langmuir and Freundlich equation test on methylene blue adsorption by using coconut fiber biosorbent. *Walisongo Journal of Chemistry*, 4(2), 131-138. <https://doi.org/10.21580/wjc.v4i2.8941>
- Baunsele, A. B., Kopon, A. M., Boelan, E. G., Leba, M. A. U., Komisia, F., Tukan, M. B., Taek, M. M., Tukan, G. D., Missa, H., Siswanta, D., Naat, J. N., & Rahayu, R. (2024). Adsorption of methylene blue using the biosorbent of coconut fiber activated by nitric acid. *Molekul*, 19(1), 128-142. <https://doi.org/10.20884/1.jm.2024.19.1.9443>
- Belmabrouk, H., Brahém, R. A., Jabli, M., El-Ghoul, Y., Alminderej, F. M., & Alharbi, T. (2023). Characterization of raw and treated *Calotropis gigantea* fibers: Application to the adsorption of methylene blue dye. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), Article 2160401. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2160401>
- Bulut, Y., & Aydın, H. (2006). A kinetics and thermodynamics study of methylene blue adsorption on wheat shells. *Desalination*, 194(1-3), 259-267. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.032>
- Deng, P. Y., Liu, W., Zeng, B. Q., Qiu, Y. K., & Li, L. S. (2013). Sorption of heavy metals from aqueous solution by dehydrated powders of aquatic plants. *International Journal*

- of Environmental Science and Technology*, 10, 559-566.
<https://doi.org/10.1007/s13762-013-0186-3>
- Esmeraldo, M. A., Barreto, A. C. H., Freitas, J. E. B., Fachine, P. B. A., Sombra, A. S. B., Corradini, E., Mele, G., Maffezzoli, A., & Mazzetto, S. E. (2010). Dwarf-green coconut fibers: A versatile natural renewable raw bioresource. Treatment, morphology, and physicochemical properties. *BioResources*, 5(4), 2478-2501.
<https://doi.org/10.15376/biores.5.4.2478-2501>
- Etim, U. J., Umoren, S. A., & Eduok, U. M. (2016). Coconut coir dust as a low-cost adsorbent for the removal of cationic dye from aqueous solution. *Journal of Saudi Chemical Society*, 20(1), S67-S76. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2012.09.014>
- Ghosh, I., Bar, N., & Das, S. (2024). Methylene blue dye removal by adsorption with coconut coir and acid-treated forms: Adsorption-desorption study, MPR and modeling using artificial intelligence. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 45(8), 1864-1878. <https://doi.org/10.1080/01932691.2024.2379609>
- Guar, R., Vara, D., Jha, S., & Shahabuddin, S. (2022). Use of low-cost green adsorbent for the simultaneous removal of toxic industrial dyes from the wastewater as sustainable solution to environmental remediation, part 1: Material spectroscopic and physicochemical characterization. *Proceedings of MOL2NET'21, Conference on Molecular, Biomedical & Computational Sciences and Engineering* (8th ed.). NANO BIO, MAT-08: Nanotechnology, Biomedical Engineering, & Materials Science Congress. MDPI. <https://doi.org/10.3390/mol2net-08-13942>
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal-A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2342.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- Hameed, B. H., Din, A. T. M., & Ahmad, A. L. (2007). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 819-825. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.049>
- Ho, Y. S. (2020). Removal of dyes from wastewater by adsorption onto activated carbon: Mini review. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(5), 120-131.
<https://doi.org/10.4236/gep.2020.85008>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451-465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Kahapana, C., & Phowan, N. (2020). A study on adsorption efficiency of methylene blue dye using adsorbent material prepared from water hyacinth. *SWU Engineering Journal*, 15(2), 58-70. (in Thai)

- Kandisa, R. V., Saibaba, K. V. N., Shaik, K. B., & Gopinath, R. (2016). Dye removal by adsorption: A review. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 7(6), Article 1000371. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000371>
- Kannan, C., Buvaneswari, N., & Palvannan, T. (2009). Removal of plant poisoning dyes by adsorption on tomato plant root and green carbon from aqueous solution and its recovery. *Desalination*, 249(3), 1132-1138. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.06.042>
- Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L. A., Shah, T., & Khan, I. (2022). Review on methylene blue: Its properties, uses, toxicity and photodegradation. *Water*, 14(2), Article 242. <https://doi.org/10.3390/w14020242>
- Man, H. C. B., Akinbile, C. O., & Jun, C. X. (2015). Coconut husk adsorbent for the removal of methylene blue dye from wastewater. *BioResources*, 10(2), 2859-2872. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.2859-2872>
- Miyah, Y., Lahrichi, A., Idrissi, M., Khalil, A., & Zerrouq, F. (2018). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solutions onto shells powder: Equilibrium and kinetic studies. *Surface and Interfaces*, 11, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.03.006>
- Mosoarca, G., Popa, S., Vancea, C., Dan, M., & Boran, S. (2022). Removal of methylene blue from aqueous solutions using a new natural lignocellulosic adsorbent —raspberry (*Rubus idaeus*) leaves powder. *Polymers*, 14(10), Article 1966. <https://doi.org/10.3390/polym14101966>
- Mustikaningrum, M., Cahyono, R. B., & Yuliansyah, A. T. (2022). Adsorption of methylene blue on nano-crystal cellulose of oil palm trunk: Kinetic and thermodynamic studies. *Chemical and Process Engineering Research*, 22(4), 953-964. <https://doi.org/10.22146/ijc.72156>
- Nitayaphat, W., Jintakosol, T., Engkaseth, K., & Wanrakakit, Y. (2015). Removal of methylene blue from aqueous solution by coffee residues. *Chiang Mai Journal of Science*, 42(2), 407-416. (in Thai)
- Omwoyo, F. O., & Otieno, G. (2024). Optimization of methylene blue dye adsorption onto coconut husk cellulose using response surface methodology: Adsorption kinetics, isotherms, and reusability studies. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 12(2), 1-18. <https://doi.org/10.4236/msce.2024.122001>

- Ouengsirirawad, P., & Ruangviriyachai, C. (2016). Adsorption of methylene blue dye using dried shell of bamboo shoots. *Proceedings of the Graduate Research Conference, Khon Kaen University*, 21, pp. 343-350. (in Thai)
- Prasoetsopha, N., Soonsook, I., Panyayaw, A., Nanon, P., Singsang, W., & Sittitanadol, I. (2023). Adsorption of methylene blue and ferrous metal solution by using coconut shell charcoal. *Journal of Materials Science and Applied Energy*, 12(2), Article 248672. <https://doi.org/10.55674/jmsae.v12i2.248672>
- Seow, T. W., & Lim, C. K. (2016). Removal of dye by adsorption: A review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(4), 2675-2679.
- Sharma, Y. C., Uma, S., & Upadhyay, S. N. (2009). Removal of a cationic dye from wastewaters by adsorption on activated carbon developed from coconut coir. *Energy & Fuels*, 23(6), 2983-2988. <https://doi.org/10.1021/ef9001132>
- Sombatphutthakun, A., Sinpiang, S., & Janta, S. (2025). The adsorption of methylene blue dye using pineapple peel waste. *PKRU SciTech Journal*, 9(1), 1-12. (in Thai)
- Sombatsri, S., Puttichon, C., Nernklang, S., Lisnund, S., & Boomserm, K. (2017). Biosorption of Rhodamine B dyes using modified water hyacinth roots. *RMUTP Research Journal*, 11(2), 59-68. (in Thai)
- Sultana, S., Fahmi, F. F., Ferdous, A., Pervin, M., Chowdhury, T. Z., & Maliha, M. (2022). Coir fibre—A cellulosic fibre. *International Journal of Textile Science*, 11(1), 1-5.
- Tan, C. H. C., Sabar, S., & Hussin, M. H. (2018). Development of immobilized microcrystalline cellulose as an effective adsorbent for methylene blue dye removal. *South African Journal of Chemical Engineering*, 26, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.08.001>
- Wong, Y. C., Senan, M. S. R., & Atiqah, N. A. (2013). Removal of methylene blue and malachite green dye using different form of coconut fibre as absorbent. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 9, 172-177. <https://doi.org/10.6000/1927-5129.2013.09.23>
- Yadav, M., Singh, N., Annu, Khan, S. A., Raorane, C. J., & Shin, D. K. (2024). Recent advances in utilizing lignocellulosic biomass materials as adsorbents for textile dye removal: A comprehensive review. *Polymers*, 16, Article 2417. <https://doi.org/10.3390/polym16172417>
- Yu, P., McKinnon, J. J., Christensen, C. R., & Christensen, D. A. (2004). Imaging molecular chemistry of Pioneer corn. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(24), 7345-7352. <https://doi.org/10.1021/jf049291b>