

การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากผักตบชวา

วาทีณี จันมี^{1*} ทัยรัตน์ สุขเพียบพร้อม¹ ทิพย์วรรณ หงกะเชิญ² และเกศริน มีมล²

¹สาขาวิชาเคมี และ ²สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพฯ 10600

E-mail: watinee.ch@bsru.ac.th

รับบทความ: 18 พฤษภาคม 2568 แก้ไขบทความ: 17 กันยายน 2568 ยอมรับตีพิมพ์: 25 กันยายน 2568

บทคัดย่อ

การดูดซับเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยถ่านที่เตรียมจากผักตบชวา โดยศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณของตัวดูดซับ เวลาในการดูดซับ และค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสีย้อม ทำการทดลองแบบแบดช์และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ 0.25 กรัม เวลาในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 120 นาที ค่าความเป็นกรด-เบสของสีย้อมที่ดูดซับได้ดีที่สุดเท่ากับ 10 นอกจากนี้ยังศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับพบว่าไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมนี้สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9921 แสดงว่าเป็นการดูดซับชั้นเดียวบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน จากการศึกษากลศาสตร์การดูดซับพบว่าสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9990 แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับทางเคมี และถ่านจากผักตบชวามีความสามารถในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้วัสดุนี้ในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสี จะช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อม และยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ประจำท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าด้วย

คำสำคัญ: การดูดซับ สีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ถ่าน ผักตบชวา

Adsorption of Reactive Blue 19 Dye on Charcoal Prepared from Water Hyacinth

Watinee Chanmee^{1*}, Hatairat Sukpreabprom¹,
Tippavan Hongkachern² and Kedsarin Meemon²

¹Program Study of Chemistry, and ²Program Study of Physics, Faculty of Education,
Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok 10600, Thailand

E-mail: watinee.ch@bsru.ac.th

Received: 18 May 2025 Revised: 17 September 2025 Accepted: 25 September 2025

Abstract

Adsorption is a widely employed method for the treatment of dye-contaminated wastewater from textile industries due to its operational simplicity and high efficiency. This study aimed to evaluate the adsorption performance of charcoal prepared from water hyacinth for the removal of reactive blue 19 dye. Batch adsorption experiments were conducted to determine the optimal conditions, including adsorbent dosage, contact time, and pH. Dye concentrations were measured using UV-Vis spectrophotometry. The results showed that the optimal adsorbent dosage was 0.25 g, the optimal contact time was 120 min, and the most favorable pH for dye removal was 10. Adsorption isotherm analysis indicated that the experimental data were best fitted by the Langmuir isotherm model, with a correlation coefficient (R^2) of 0.9921, suggesting monolayer adsorption on a homogeneous surface. The adsorption kinetics were well described by the pseudo-second order model, with R^2 value of 0.9990, indicating that chemisorption was the dominant mechanism. The findings confirm that water hyacinth-derived charcoal is a promising and low-cost adsorbent for the effective removal of reactive blue 19 dye from aqueous solutions. Its application in treating dye-laden effluents from textile industries could provide a sustainable and eco-friendly approach to wastewater management while adding value to local biomass waste.

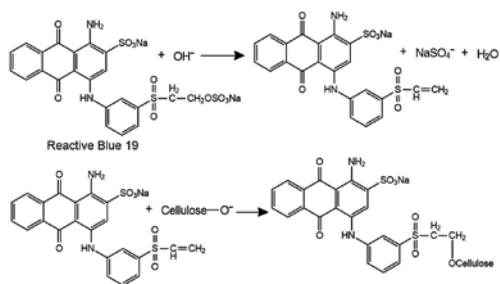
Keywords: Adsorption, Reactive blue 19 dye, Charcoal, Water hyacinth

บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศมหาศาล ในปี พ.ศ. 2567 พบว่าการส่งออกสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มมีมูลค่า 6,196.7 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และมีโรงงานย้อมสีและพิมพ์ลายผ้าอยู่ 281 แห่ง (Thailand Textile Institute, 2024) สีย้อมสังเคราะห์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีหลายชนิด ได้แก่ สีย้อมประจุลบ (anionic dye) สีย้อมประจุบวก (cationic dye) และสีย้อมที่ไม่มีประจุ (non-ionic dye) (Amalina *et al.*, 2022) โดยสีย้อมประจุลบ ประกอบด้วยสีย้อมไต่เร็ก (direct dye) สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dye) และสีย้อมกรด (acid dye) ส่วนสีย้อมประจุบวกและสีย้อมที่ไม่มีประจุประกอบด้วยสีเบส (basic dye) และสีดีสเพิร์ส (dispersed pigments) ตามลำดับ (Kadhom *et al.*, 2020)

สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dye) เป็นกลุ่มสีย้อมสังเคราะห์ที่สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสจึงเหมาะอย่างยิ่งกับเส้นใยผ้า การย้อมสีประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักคือการดูดซึมสีเข้าสู่เส้นใยในสถานะเกือบเป็นกลาง ซึ่งต้องใช้ไอเล็กโตรไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ เพื่อลดแรงผลักระหว่างประจุลบของเส้นใยกับโมเลกุลสีย้อม และขั้นตอนที่สองคือการเกิดพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นเบส ผ่านกลไก nucleophilic substitution หรือ nucleophilic addition ขึ้นกับชนิดของหมู่รีแอกทีฟ สีย้อมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ reactive blue 19 หรือที่รู้จักกันในชื่อ anthraquinone brilliant blue เนื่องจากเป็นหนึ่งในสีย้อมเชิงพาณิชย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ สีย้อมชนิดนี้มีความเสถียรสูง ทนทาน และเป็นพิษ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการก่อมะเร็งและก่อกลายพันธุ์ (Kalikeri *et al.*, 2017) สีย้อมรีแอกทีฟปบลู 19 อยู่ใน

กลุ่ม vinyl sulfone type โดยสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสได้ผ่านกลไก nucleophilic addition ดังในภาพที่ 1 ทำให้ได้พันธะที่มีความเสถียรสูงและคงทนต่อการซัก (Śmigiel-Kamińska *et al.*, 2020) หรือที่รู้จักกันในชื่อ anthraquinone brilliant blue



ภาพที่ 1 กลไก nucleophilic addition การเกิดพันธะโควาเลนต์ของสีย้อมรีแอกทีฟปบลู 19 กับเซลลูโลสในสภาวะที่เป็นเบส

ที่มา: Śmigiel-Kamińska *et al.*, 2020

สีย้อมรีแอกทีฟทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพ เช่น โรคผิวหนังอักเสบ หอบหืดจากการทำงาน โรคจมูกอักเสบ อาการแพ้อื่น ๆ แก่ผู้ใช้หรือผลิตสีย้อม (Chavan, 2011) ความคงทนของสีย้อมรีแอกทีฟเป็นคุณสมบัติที่ทำให้ได้รับความนิยมสูงในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อย่างไรก็ตามคุณสมบัตินี้เองที่เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการย่อยสลายทั้งทางเคมีและชีวภาพ สีย้อมเหล่านี้จึงย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยาก และตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้เป็นเวลานาน และเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จะลดการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ ส่งผลกระทบต่อสารสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ ยิ่งไปกว่านั้นในกระบวนการย่อยสลาย สารเหล่านี้สามารถสร้างสารประกอบอะโรมาติกเอมีน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Gholizade *et al.*, 2023; Saratale *et al.*, 2011) จึงจำเป็นต้องมีการกำจัด

สีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดสีข้อมมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอน (coagulation) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation processes: AOP) กระบวนการเมมเบรน (membrane processes) กระบวนการทางชีวภาพ (biological processes) และกระบวนการดูดซับ (adsorption processes) ซึ่งวิธีการที่เป็นที่นิยมมากที่สุดเนื่องจากสามารถกำจัดสารหลายชนิดในเวลาเดียวกัน เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถทำได้ง่าย (Srivatsav *et al.*, 2020) ตัวดูดซับที่ภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ ถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นวิธีการที่สะดวกและเหมาะสมที่สุดในการบำบัดสีข้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสี แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์ ที่ขายตามท้องตลาดมีราคาแพง อาจเป็นสาเหตุให้โรงงานบางแห่งละเลยการบำบัดน้ำทิ้งให้อยู่ในมาตรฐาน การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ผลิตถ่านสีข้อมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ตัวดูดซับที่ได้จากชีวมวลสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ตัวดูดซับจากวัสดุธรรมชาติ (raw biomass) ตัวดูดซับประเภท biochar หรือ activated carbon จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (agricultural waste-based) และตัวดูดซับชีวมวลที่ผ่านการดัดแปลงหรือเติม functionalization (modified biomass-based) (Aragaw, 2021) วัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติหลายชนิดสามารถดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟได้ เช่น ไหมข้าวโพด กากชา เมล็ดมะรุม (Reddy *et al.*, 2024; Yadav *et al.*, 2024) และถ่านชีวภาพจากกระดุกปลานิล (Bazarin *et al.*, 2024) เมล็ดของต้น *Canna indica* (Sundararaman *et al.*, 2023) นอกจากนี้ถ่านชีวภาพที่ผลิต

จากวัสดุชีวมวลหลายชนิด เช่น สาหร่าย พีช ของเสียในครัวเรือน และตะกอนน้ำเสีย เป็นวัสดุดูดซับสีข้อมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง (Srivatsav *et al.*, 2020)

ผักตบชวาเป็นวัชพืชที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโดยมีหลายรูปแบบ เช่น ราก ใบ ชีวมวล ของผักตบชวา ที่ทำให้เป็นผงแห้ง และยังมีการนำผสมกับวัสดุอื่นด้วย สารที่ใช้ในการดูดซับมีหลายชนิด ทั้งโลหะหนัก เช่น Cd Pb (Ibrahim *et al.*, 2012) Cr (Somboon and Bhavakul, 2012) Cu Zn และ Fe (Mishra and Tripathi, 2008) และสีข้อมบางชนิด เช่น methylene blue (Uddin *et al.*, 2013) Victoria blue (Low *et al.*, 1995) Congo red (Nath *et al.*, 2014) และ reactive red (Módenes *et al.*, 2013) อีกทั้งด้านชีวภาพจากผักตบชวาสามารถดูดซับและช่วยลดค่า chemical oxygen demand (COD) total dissolved solids (TDS) และ total suspended solids (TSS) ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Subashini and Saritha, 2023) แสดงให้เห็นศักยภาพในการเป็นวัสดุดูดซับจากผักตบชวาในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมผ้า (Priya and Senthamil Selvan, 2017)

งานวิจัยนี้สนใจนำถ่านจากผักตบชวา ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือใช้ซึ่งมีอยู่ในท้องถิ่น มีรูพรุน และสามารถดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด มาใช้ดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ เพื่อเป็นการส่งเสริมให้มีการนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาสร้างคุณค่าให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อสังคมและเป็นการรักษาสีสิ่งแวดล้อม โดยทำการศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม ระยะเวลาในการดูดซับ ความเป็นกรด-เบส ของการดูดซับ

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ และจลนศาสตร์การดูดซับ

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมถ่านจากผักตบชวา

นำผักตบชวาล้างให้สะอาดแล้วตากแดดให้แห้ง นำไปคาร์บอนไนเซชันด้วยเตาเผาควบคุมอุณหภูมิที่ 800°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด นำล้างด้วยน้ำกลั่น ปรับ pH ด้วยสารละลาย HCl ความเข้มข้น 1.0 M และล้างด้วยน้ำกลั่นอีกรอบจนได้ pH เท่ากับ 7 นำมากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ อบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และร้อนด้วยตะแกรงร้อนที่มีขนาด 100 เมช

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านจากผักตบชวา

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (specific surface area analyzer) ด้วยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET) วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของถ่านด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ร่วมกับการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วย (Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19

การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับถ่านจากผักตบชวาต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ซึ่งถ่านจากผักตบชวาที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 และ 0.35

กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ปิเปต เติมสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขวดละ 25 มิลลิลิตร นำมาเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองถ่านออก นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 591 nm คำนวณร้อยละการดูดซับ (%adsorption) ตามสมการที่ (1) (Amaku and Taziwa, 2024)

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

โดย C_0 และ C_e คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายรีแอกทีฟบลู 19 ตามลำดับ

การศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับซึ่งถ่านจากผักตบชวา 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิเปตสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่เวลา 10 30 90 120 180 และ 240 นาที วิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณร้อยละการดูดซับดังในสมการที่ (1)

การศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

เตรียมสารละลายรีแอกทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับ pH ของสารละลายด้วยสารละลาย NaOH และ HCl โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH meter) ให้ได้ค่า pH 2 4 6 8 และ 10 จากนั้นซึ่งถ่านจากผักตบชวา 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิเปตสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงใน

ขบวนการที่ค่า pH แตกต่างกัน เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาที่เหมาะสมคือ 120 นาที วิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ คำนวณร้อยละการดูดซับดังในสมการที่ (1)

การทดลองในแต่ละปัจจัยทำซ้ำ 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิห้อง วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ด้วย one-way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย และวิเคราะห์ความแตกต่างแต่ละคู่ของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's Honestly Significant Difference (Tukey's HSD) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อระบุค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19

เตรียมสารละลายรีแอกทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถ่านจากผักตบชวา 0.1 กรัมใส่ขบวนการดูดซับ จากนั้นบีบสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ปริมาตร 25 มิลลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละความเข้มข้นที่เตรียมไว้ เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาที่เหมาะสม วิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ที่เหลืออยู่ในสารละลาย ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ คำนวณหาความสามารถในการดูดซับ (q_e) ดังในสมการที่ (2) (Amaku and Taziwa, 2024)

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \times 100 \quad \text{--- (2)}$$

โดย C_0 C_e และ V คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเข้มข้นที่สมดุล และปริมาตรของสารละลายรีแอกทีฟบลู 19 ตามลำดับ ส่วน m คือ มวลของถ่านจากผักตบชวา

นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟตามทฤษฎี

ของแลงเมียร์และฟรุนดลิช เพื่อหาความสอดคล้องของไอโซเทอมการดูดซับสี่รีแอกทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากผักตบชวา

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

ซึ่งถ่านจากผักตบชวา 0.1 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ บีบสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ นำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่เวลา 5 10 30 60 90 120 180 และ 240 นาที วิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (q_e) ดังในสมการที่ (2) ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t (q_t) ดังในสมการที่ (3) โดย C_t คือความเข้มข้นของสารละลายรีแอกทีฟบลู 19 ที่เวลา t นาที นำค่าที่ได้ไปคำนวณ และเขียนกราฟโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first-order) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second-order) (Amaku and Taziwa, 2024)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \times 100 \quad \text{--- (3)}$$

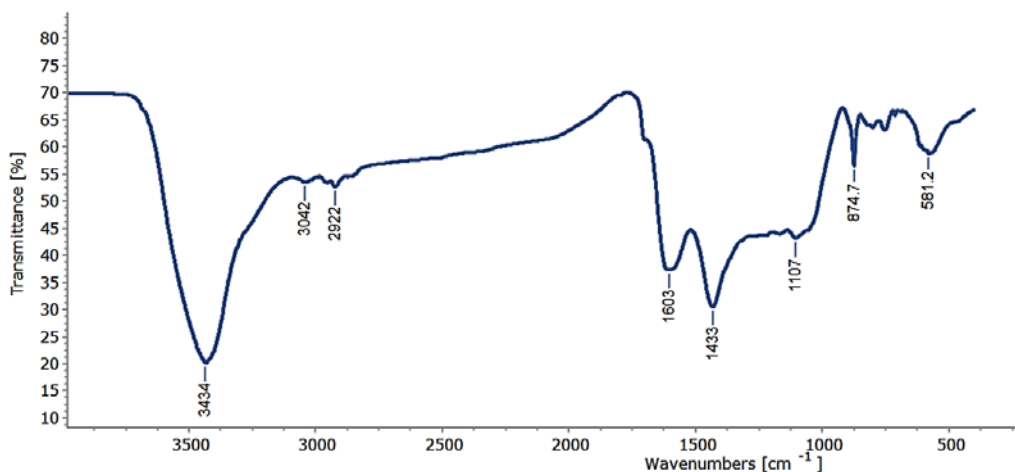
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านที่ได้จากผักตบชวา

อินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านจากผักตบชวาจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR (ภาพที่ 2) แสดงพีคสำคัญที่บ่งชี้ถึงโครงสร้างหมู่ฟังก์ชันหลัก พีคที่ 3434 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ stretching ของพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งอาจหลงเหลืออยู่จากโครงสร้างของเซลลูโลส

ดั้งเดิม ส่วนพีคที่ 1603 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบ stretching ของพันธะคู่ C=C ในวงอะโรมาติก แสดงถึงโครงสร้างคาร์บอนควบแน่นซึ่งเป็นลักษณะเด่นของถ่านชีวภาพ พีคที่ 1107 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะ C-O ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างอีเทอร์หรือแอลกอฮอล์ที่ยังไม่สลาย และพีคช่วง 874 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ out-of-plane bending

ของพันธะ C-H ในวงอะโรมาติก FTIR ของถ่านจากผักตบชวาสอดคล้องกับลักษณะทั่วไปของถ่านชีวภาพที่มีโครงสร้างคาร์บอนแบบอะโรมาติกเป็นหลัก และมีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนตกค้างด้วย (Ahmad *et al.*, 2014; Keiluweit *et al.*, 2010) และสอดคล้องกับผล SEM/EDS ที่วิเคราะห์ด้วย



ภาพที่ 2 อินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านจากผักตบชวา

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านผักตบชวาด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยวิธี BET

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านที่เตรียมได้จากผักตบชวา (ตาราง 1) พบว่ามีพื้นที่ผิว $11.72\text{ m}^2/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุน $0.03926\text{ cm}^3/\text{g}$ เมื่อพิจารณาขนาดของรูพรุนที่มีค่าเฉลี่ย 6.698 nm ซึ่งอยู่ในช่วง $2\text{--}50\text{ nm}$ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) ตามนิยามของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) นอกจากนี้กราฟไนโตรเจนแอดซอร์ปชัน-ดีซอร์ปชัน ยังแสดงลักษณะไอโซเทอมประเภทที่ IV ตามเกณฑ์ของ IUPAC โดยมี hysteresis loop ปรากฏชัดเจน และเส้น adsorption

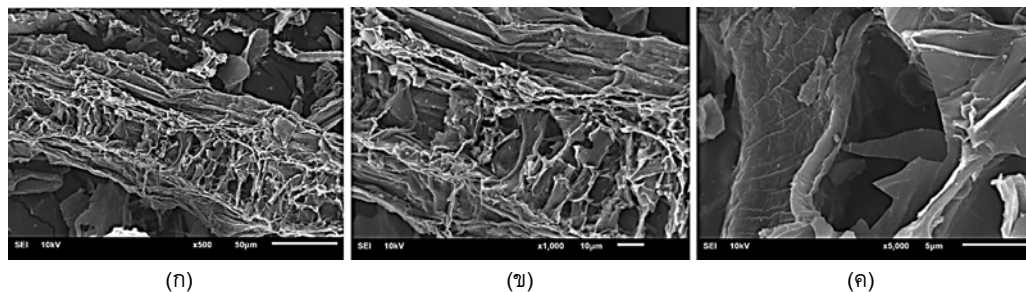
และ desorption ไม่ทับกัน บ่งชี้ถึงปรากฏการณ์ capillary condensation หรือการควบแน่นของแก๊สไนโตรเจนภายในรูพรุนขนาดกลาง วัสดุมีคุณสมบัติเป็น mesoporous material เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลมีขนาดใหญ่ (Foo and Hameed, 2010) สอดคล้องกับขนาดรูพรุนเฉลี่ย 6.698 nm และค่าพื้นที่ผิว $11.72\text{ m}^2/\text{g}$ แม้ถ่านจากผักตบชวาจะมีพื้นที่ผิวน้อยทำให้ดูดซับได้ไม่ดีเท่าถ่านกัมมันต์ แต่พื้นที่ผิวยังมากกว่าถ่านชีวมวลอื่นที่ไม่ผ่านการกระตุ้น เช่น ถ่านจาก *Bidens pilosa* ($5.21\text{ m}^2/\text{g}$) (Sangsuk *et al.*, 2023)

ตาราง 1 ผลการวิเคราะห์ด้วย BET surface area ของถ่านผัดคอปขาว

รายการ	ผลการวิเคราะห์
พื้นที่ผิว (Surface Area Data)	11.72 m ² /g
ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume)	0.03926 cm ³ /g
ขนาดของรูพรุน (Pore Size)	6.698 nm

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของถ่านด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านจากผัดคอปขาวที่เตรียมได้ (ภาพที่ 3) พบว่า



ภาพที่ 3 ภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านผัดคอปขาว

(ก) กำลังขยาย 500 เท่า (ข) กำลังขยาย 1000 เท่า และ (ค) กำลังขยาย 5000 เท่า

เมื่อวัสดุชีวมวล เช่น ผัดคอปขาว ถูกคาร์บอนไนซ์โดยให้ความร้อนภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน จะเกิดการสลายตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์ธรรมชาติอย่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ส่งผลให้คาร์บอนจัดเรียงตัวใหม่ในรูปแบบวงแหวนเบนซีนที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งเป็นการเกิดโครงสร้างอะโรมาติก (Keilweit *et al.*, 2010) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น วงแหวนเบนซีนเหล่านี้จะมีการควบแน่นเพิ่มขึ้น (aromatic condensation) ส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและมีเสถียรภาพสูง (Keilweit *et al.*, 2010) ทั้งนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับเนื่องจากเกิด

พื้นที่ผิวของถ่านมีลักษณะขรุขระและแตกเป็นชั้นแผ่นไม่สม่ำเสมอ โดยสามารถสังเกตเห็น รูพรุน และช่องว่างจำนวนมาก กระจายตัวอยู่ทั่วโครงสร้าง โดยเฉพาะลักษณะของ ช่องว่างที่มีลักษณะคล้ายท่อลำเลียง ซึ่งเป็นโครงสร้างภายในดั้งเดิมของพืชที่ยังคงอยู่หลังการเผาไหม้ (Tan *et al.*, 2015) โดยช่องว่างนี้มีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ โดยช่องว่างขนาดใหญ่มีขนาดมากกว่า 5 ไมโครเมตร โครงสร้างนี้ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่าน ทำให้เกิดการดูดซับได้มากขึ้น

การพัฒนาโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนจำนวนมาก (Ahmad *et al.*, 2014)

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของถ่านผัดคอปขาวด้วยเทคนิค SEM/EDS (ตาราง 3) พบว่าคาร์บอน (C) เป็นธาตุองค์ประกอบหลัก 78.61% โดยน้ำหนัก และ 86.95% เชิงอะตอม ซึ่งอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับรายงานของ Lippi *et al.* (2025) ที่ระบุว่าค่าคาร์บอนของถ่านชีวภาพจากวัสดุชีวมวลมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 70–80 และแสดงถึงการเกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพที่มีความเสถียรสูงและมีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการดูดซับ พบออกซิเจน

(O) เป็นธาตุองค์ประกอบรองเท่ากับร้อยละ 11.04 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 9.17 ซึ่งอะตอม แสดงว่าพื้นผิวของถ่านยังมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนหลงเหลืออยู่ ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนหรือแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิตกับโมเลกุลของสีย้อมที่มีขั้ว เช่น รีแอกทีฟบลู 19 ได้ นอกจากนี้ยังพบ Mg Si K และ Ca ปริมาณน้อย อาจเป็นแร่ธาตุที่ตกค้างมาจากโครงสร้างพืชเดิม ซึ่งธาตุเหล่านี้มีบทบาทในกระบวนการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออน และสามารถช่วยตรึงโมเลกุลของสีย้อมชนิดแอนไอออนได้ (Tan *et al.*, 2015)

ตาราง 3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค SEM/EDS

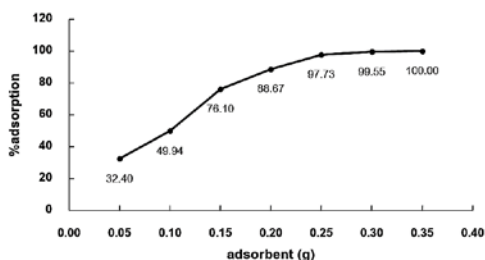
Element	%Weight	%Atomic
C	78.61	86.95
O	11.04	9.17
Mg	1.40	0.76
Si	0.78	0.37
K	4.79	1.63
Ca	3.38	1.12
Totals	100.00	

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19

การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ผลที่ได้จากการศึกษา (ภาพที่ 4) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านผัดบดขาว ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 มีค่าเพิ่มมากขึ้น (Sundararaman *et al.*, 2024) จนเมื่อปริมาณถ่านผัดบดขาวเพิ่มขึ้นเป็น 0.25 กรัม ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นไปถึง

ร้อยละ 97.73 และเริ่มคงที่ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย one-way ANOVA พบว่า ความสามารถในการดูดซับเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 0.25 0.30 กรัม และ 0.35 กรัมไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปริมาณถ่านผัดบดขาว 0.25 กรัมต่อสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เป็นค่าที่เหมาะสมภายใต้สภาวะทดลองนี้



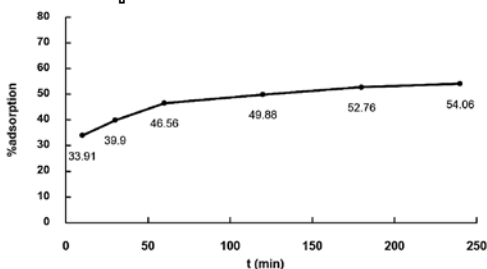
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของถ่านจากผัดบดขาวที่ใช้ในการดูดซับและร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 เท่ากับ 50 ppm เขยาที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)

การศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับ

จากการศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ของผัดบดขาว พบว่าในการเพิ่มระยะเวลาการดูดซับส่งผลให้ร้อยละการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะเริ่มคงที่เมื่อการดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล (ภาพที่ 5) ผลที่สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Sundararaman *et al.* (2024) จากกราฟในภาพที่ 5 พบว่าที่เวลา 120 นาที เป็นเวลาที่ใช้การดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อคำนวณร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากผัดบดขาวพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 49.88 เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 120 นาทีจึงเป็นเวลาที่เหมาะสม

การศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับ

จากการศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 ของผักตบชวา พบว่าในการเพิ่มระยะเวลาการดูดซับส่งผลให้ร้อยละการดูดซับสีเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเริ่มคงที่เมื่อการดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลดังในภาพที่ 5 ผลที่ได้สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Sundararaman *et al.*, 2024 จากกราฟพบว่าที่เวลา 120 นาที เป็นเวลา que การดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล เมื่อคำนวณร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 ด้วยถ่านจากผักตบชวาพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 49.88 เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 120 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสม

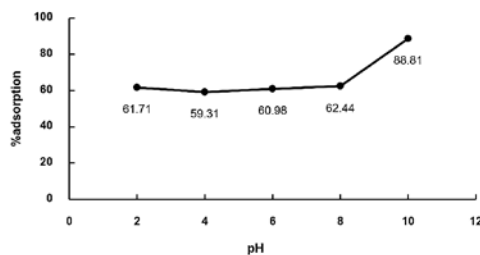


ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับและร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 (ปริมาณถ่าน 0.1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 เท่ากับ 50 ppm เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที)

การศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

จากกราฟในภาพที่ 6 พบว่า ค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 ของถ่านจากผักตบชวาในช่วง pH 2–8 มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยอยู่ระหว่างร้อยละ 59.31–62.44 แสดงว่าในช่วงนี้การเปลี่ยนแปลงของ pH ไม่ส่งผลต่อกลไกการดูดซับอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 10 พบว่าค่าการดูดซับเพิ่มขึ้น

อย่างชัดเจนเป็นร้อยละ 88.81 ซึ่งแสดงให้เห็นในสภาวะเบสอ่อนมีปัจจัยบางประการที่ส่งเสริมการดูดซับได้มากขึ้น เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) มีบทบาทน้อยกว่า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวงอะโรมาติก (π - π stacking) ที่ผิวของถ่านกับสีย้อม พันธะไฮโดรเจน และการแทรกตัวของสีย้อมเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กของถ่าน (pore entrapment) (Amaku and Taziwa, 2024; Wei *et al.*, 2022) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Radaei *et al.* (2014) ที่พบว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดทับทิมสามารถดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 ได้ดีที่สุดในที่ pH 11 และงานวิจัยของ Vojnović *et al.* (2022) ที่พบว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าสามารถดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ก 5 ได้ดีในช่วง pH 2–10 โดยที่ pH 10 แรงดึงดูดที่ไม่ใช่แรงทางไฟฟ้าสถิต (non-electrostatic) คือ π - π interaction การดูดซับผ่านรูพรุน และพันธะไฮโดรเจน มีส่วนสำคัญในกลไกการดูดซับ และที่สภาวะเบส หมู่ไฮดรอกซิลที่หลงเหลืออยู่ในถ่านสามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับสีย้อมผ่านกลไก nucleophilic addition (Śmigiel-Kamińska *et al.*, 2020) ได้เช่นเดียวกับสีย้อมและเซลล์ลูโลสในภาพที่ 1 ทำให้ที่ pH 10 มีความสามารถดูดซับสูงที่สุด



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 (ปริมาณถ่าน 0.1 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 เท่ากับ 50 ppm เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 120 นาที)

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19

ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ที่ดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ที่เหลืออยู่ ณ สภาวะสมดุลและอุณหภูมิคงที่ เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสม และใช้อธิบายลักษณะการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 จากตัวดูดซับที่เตรียมขึ้น ซึ่งไอโซเทอมที่ศึกษาในการทดลองนี้มี 2 แบบคือ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดิช (Amaku and Taziwa, 2024)

แบบจำลองไอโซเทอมสมการเส้นตรงของการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการที่ (4)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad \text{--- (4)}$$

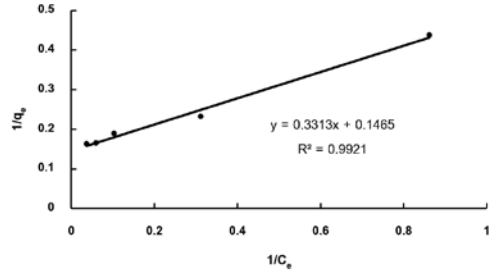
โดยที่ q_e คือปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียว K_L คือค่าคงที่แลงเมียร์ q_m คือค่าการดูดซับสูงสุด และ C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุล

แบบจำลองไอโซเทอมสมการเส้นตรงของการดูดซับแบบฟรุนดิชเขียนได้ดังสมการที่ (5)

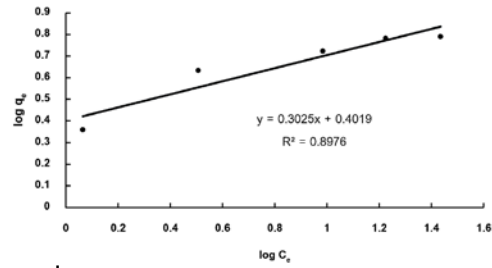
$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{--- (5)}$$

โดย K_F คือ ค่าคงที่ฟรุนดิช และ $\frac{1}{n}$ คือ ปัจจัยที่แสดงความเป็นเนื้อเดียว

เมื่อนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อศึกษาความสอดคล้องของข้อมูลสำหรับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านจากผักตบชวาเป็นตัวดูดซับสำหรับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดิชตามลำดับ แสดงดังในภาพที่ 7 และ 8



ภาพที่ 7 กราฟไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 แบบแลงเมียร์



ภาพที่ 8 กราฟไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 แบบฟรุนดิช

จากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ จากผลการทดลองพบว่ามีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 6.8259 mg/g ค่าคงที่การดูดซับ (K_L) เท่ากับ 0.4422 L/mg และมีความเป็นเส้นตรง R^2 เท่ากับ 0.9921 ดังแสดงในตาราง 3

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์อาจแสดงได้ด้วยปัจจัยการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (R_L) ดังสมการ $R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$ เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) จากผลการทดลองพบค่า R_L อยู่ในช่วง 0.0433–0.1844 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 10–50 ppm รูปร่างของไอโซเทอมสอดคล้องกับการดูดซับเนื่องจาก $0 < R_L < 1$ คือ การดูดซับดี

ตาราง 3 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านจากผักตบชวาเป็นตัวดูดซับ

Isotherm model	Isotherm parameters	
Langmuir isotherm	q_m	6.8259 mg/g
	K_L	0.4422 L/mg
	R^2	0.9921
Freundlich isotherm	K_F	2.523
	$1/n$	0.3025
	R^2	0.8976

จากไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช จากผลการทดลองพบว่าค่า $(1/n)$ เท่ากับ 0.3025 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่ใช้ในการดูดซับ ค่าคงที่การดูดซับ (K_F) เท่ากับ 2.523 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 เท่ากับ 0.8976 เมื่อพิจารณาค่า R^2 ของทั้งสองไอโซเทอมพบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดิช แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากผักตบชวาเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer sorption) และบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวมีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 6.8259 mg/g เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Dehvari *et al.* (2016) ที่ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยผงเมล็ดทับทิม ผลการทดลองพบว่ามีการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 3.6100 mg/g ค่าคงที่การดูดซับ (K_L) เท่ากับ 11.4900 L/mg ค่า R_L อยู่ในช่วง 0.0020–0.0300 ค่า $(1/n)$ เท่ากับ 0.6230 และค่าคงที่การดูดซับ (K_F) เท่ากับ 2.6900 ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) แล้ว การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากผักตบชวามีค่าการดูดซับสูงสุดที่มากกว่า และมากกว่าเปลือกพิทาชิโอด้วย (ตาราง 4)

ตาราง 4 เปรียบเทียบค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) สีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 กับวัสดุธรรมชาติในงานวิจัยอื่น

Adsorbent	q_m (mg/g)	Reference
Grapefruit peel	12.39	Abassi and Razzaghi-Asl (2009)
Pomegranate seed powder	3.61	Dehvari <i>et al.</i> (2016)
Pistachio shell	2.2	Rahdar <i>et al.</i> (2018)
Charcoal prepared from water hyacinth	6.8259	Present study

จลนศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านจากผักตบชวาเป็นวัสดุดูดซับได้ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์กลไกการดูดซับและอัตราการดูดซับโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first-order) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second-order) ตามสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ (Amaku and Taziwa, 2024)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลทำโดยเขียนกราฟแบบจำลองทั้ง 2 กราฟ ดังในภาพที่ 9 และภาพที่ 10 โดยใช้ข้อมูล q_t (ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t ในหน่วย mg/g) และ q_e (ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ในหน่วย mg/g) กับ t (เวลา (min) เพื่อคำนวณค่าคงที่การดูดซับในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (k_1 (1/min)) ค่าคงที่การดูดซับในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสองเทียม (k_2 (g/mg·min)) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 ของแต่ละแบบจำลอง

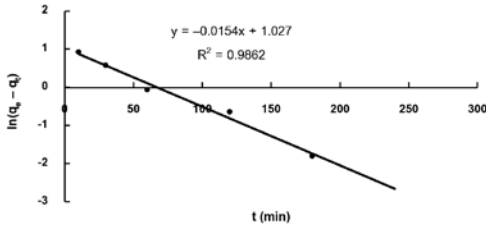
สมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad \text{--- (6)}$$

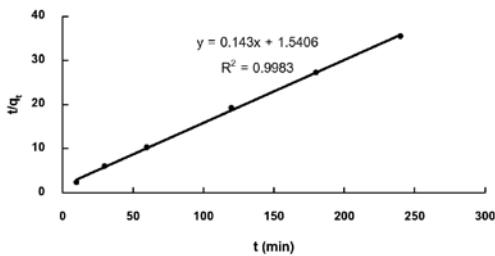
สมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง

เทียบ :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{--- (7)}$$



ภาพที่ 9 กราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 ด้วยถ่านจากผักตบชวา



ภาพที่ 10 กราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียบของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 ด้วยถ่านจากผักตบชวา

ผลการคำนวณค่าคงที่และค่าความสัมพัทธ์จากการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบให้ค่าคงที่ $k_1 = 0.0154 \text{ min}^{-1}$ และค่า $q_e = 2.79 \text{ mg/g}$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ขณะที่แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียบให้ค่าคงที่ $k_2 = 0.0133 \text{ g/mg}\cdot\text{min}$ และค่า $q_e = 6.99 \text{ mg/g}$ แสดงให้เห็นความสามารถในการดูดซับที่สมมูลที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงดังในตาราง 5

เมื่อพิจารณาค่า R^2 พบว่าแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียบมีค่า $R^2 = 0.9982$ ซึ่งใกล้เคียง 1 มากกว่าแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบที่มีค่า $R^2 = 0.9863$ แสดงว่าแบบ

จำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียบ เหมาะสมที่สุดในการอธิบายจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับในระบบนี้อธิบายได้ว่าการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 โดยใช้ถ่านจากผักตบชวานั้นเป็นการดูดซับทางเคมี สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ 19 ที่มีจลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียบโดยใช้ตัวดูดซับจากวัสดุจากธรรมชาติ เช่น ถ่านชีวภาพจากเปลือกกล้วย (Kapoor *et al.*, 2022) เปลือกเมล็ดพืชทอง (Kowalkowska and Jozwiak, 2019) กากกาแฟ (Wong *et al.*, 2020) เปลือกเมล็ดแมคคาเดเมีย (Felista *et al.*, 2020)

ตาราง 5 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบและปฏิกิริยาอันดับสองเทียบ

Model	Parameter	
Pseudo-first-order	q_e (experimental)	6.76 mg/g
	q_e (calculated)	2.79 mg/g
	k_1	0.0154 min^{-1}
	R^2	0.9863
Pseudo-second-order	q_e (calculated)	6.99 mg/g
	k_2	0.0133 $\text{g/mg}\cdot\text{min}$
	h	0.346 $\text{mg/g}\cdot\text{min}$
	R^2	0.9982

สรุปผล

การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลูด้วยถ่านจากผักตบชวา พบว่า ถ่านที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิว $11.72 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุน $0.03926 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดของรูพรุน 6.698 nm จัดว่าเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง มีขนาดอยู่ในช่วง (2–10 นาโนเมตร) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟพลู 19 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านจากผักตบชวาความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะเพิ่มขึ้น ปริ-

มาณตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ 0.25 กรัม เวลาในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 120 นาที ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสีย้อมที่ดูดซับได้ดีที่สุดเท่ากับ 10 เมื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่าการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากผักตบชวาสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช แสดงถึงการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวมีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 6.8259 mg/g จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมี จากผลการทดลองมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้วัสดุนี้ในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสี ซึ่งเป็นการช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อม และยังเป็นการนำผักตบชวาที่เป็นวัชพืชและวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าอีกทางหนึ่งด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา สำหรับความอนุเคราะห์สนับสนุนเครื่องมือและสารเคมี รวมทั้งเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ บริษัท พี.พี. คัลเลอร์ เท็กซ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 และคุณปรีชา ภัสสรศิริ บริษัทอุตสาหกรรมแมนดารินสปินนิ่ง จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการเผาถ่านจากผักตบชวาที่ใช้ในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Abassi, M., and Razzaghi-Asl, N. (2009). Removal of hazardous reactive blue 19 dye

from aqueous solutions by agricultural waste. **Journal of Iranian Chemical Research** 2: 221–230.

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., and Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. **Chemosphere** 99: 19–33.

Amaku, J. F., and Taziwa, R. (2024). Removal of reactive blue 19 from simulated wastewater using *Solanum melongena* stalk/MWCNTs: Thermodynamics, kinetic, equilibrium and regeneration potentials. **Chemical Papers** 78: 1251–1263.

Amalina, F., Abd Razak, A. S., Krishnan, S., Zularisam, A. W., and Nasrullah, M. (2022). The effects of chemical modification on adsorbent performance on water and wastewater treatment – A review. **Biore-source Technology Reports** 20: 101259.

Aragaw, T. A. (2021). Biomass-based adsorbents for dye removal from wastewater: A review. **Frontiers in Environmental Science** 9: 764958.

Bazarin, G., Módenes, A. N., Espinoza-Quilones, F. R., Borba, C. E., Trigueros, D. E. G., and Dall'Oglio, I. C. (2024). High removal performance of reactive blue 5G dye from industrial dyeing wastewater using biochar in a fixed-bed adsorption system: Approaches and insights based on modeling, isotherms, and thermody-

- namics study. **Journal of Environmental Chemical Engineering** 12(1): 111761.
- Chavan, R. B. (2011). Environmentally friendly dyes. In M. Clark (Ed.), **Handbook of Textile and Industrial Dyeing** (Vol. 1, pp. 515–561). Cambridge: Woodhead.
- Chen, Y., Guo, Y., Wang, X., Tan, W., and Yang, J. (2018). Adsorption of reactive red 195 from aqueous solution by pomelo peel-based biochar: Influence of preparation conditions and adsorption mechanism. **Water Science and Technology** 78(10): 2115–2126.
- Dehviri, M., Ghaneian, M. T., Ebrahimi, A., Jamshidi, B., and Mootab, M. (2016). Removal of reactive blue 19 dyes from textile wastewater by pomegranate seed powder: Isotherm and kinetic studies. **International Journal of Environmental Health Engineering** 5(1): 5.
- Felista, M. M., Wanyonyi, W. C., and Ongera, G. (2020). Adsorption of anionic dye (Reactive Black 5) using macadamia seed husks: Kinetics and equilibrium studies. **Scientific African** 7: e00283.
- Foo, K. Y., and Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal** 156(1): 2–10.
- Gholizade, A., Asadollahfardi, G., and Rezaei, R. (2023). Reactive blue 19 dye removal by UV–LED/chlorine advanced oxidation process. **Environmental Science and Pollution Research** 30(1): 1719.
- Ibrahim, H. S., Ammar, N. S., Soylak, M., and Ibrahim, M. (2012). Removal of Cd(II) and Pb(II) from aqueous solution using dried water hyacinth as a biosorbent. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy** 96: 413–420.
- Kadhom, M., Albayati, N., Alalwan, H., and Al-furaiji, M. (2020). Removal of dyes by agricultural waste. **Sustainable Chemistry and Pharmacy** 16: 100259.
- Kalikeri, S., Kamath, N., Gadgil, D. J., Kodialbail, V. S. (2017). Visible light induced photocatalytic degradation of reactive blue–19 over highly efficient polyaniline–TiO₂ nanocomposite: A comparative study with solar and UV photo catalysis. **Environmental Science and Pollution Research** 25: 3731–3744.
- Kapoor, R. T., Rafatullah, M., Siddiqui, M. R., Khan, M. A., and Sillanpää, M. (2022). Removal of reactive black 5 dye by banana peel biochar and evaluation of its phytotoxicity on tomato. **Sustainability** 14(7): 4176.
- Keiluweit, M., Nico, P. S., Johnson, M. G., and Kleber, M. (2010). Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental Science & Technology** 44(4): 1247–1253.

- Lippi, P., Mattii, G.B., Cataldo, E. (2025). Biochar, properties and skills with a focus on implications for vineyard land and grapevine Performance. **Phyton-International Journal of Experimental Botany** 94(1): 33–64.
- Low, K. S., Lee, C. K., and Tan, K. K. (1995). Biosorption of basic dyes by water hyacinth roots. **Bioresource Technology** 52(1): 79–83.
- Mishra, V. K., and Tripathi, B. D. (2008). Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes. **Bioresource Technology** 99(15): 7091–7097.
- Módenes, A. N., Ross, A. A., Souza, B. V., Dotto, J., Geraldi, C. Q., Espinoza–Quiñones, F. R., and Kroumov, A. D. (2013). Biosorption of BF-4B reactive red dye by using leaves of macrophytes *Eichhornia crassipes*. **International Journal of Bioautomation** 17(1): 33–44.
- Nath, A., Chakraborty, S., and Bhattacharjee, C. (2014). Bioadsorption of industrial dyes from aqueous solution onto water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): Equilibrium, kinetic, and sorption mechanism study. **Desalination and Water Treatment** 52(7–9): 1484–1494.
- Priya, E., and Selvan, P. S. (2017). Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): An efficient and economic adsorbent for textile effluent treatment: A review. **Arabian Journal of Chemistry** 10(Supplement 2): S3548–S3558.
- Radaei, E., Moghaddam, M. R. A., and Arami, M. (2014). Removal of reactive blue 19 from aqueous solution by pomegranate residual-based activated carbon: optimization by response surface methodology. **Journal of Environmental Health Science and Engineering** 12(1): 65.
- Rahdar, S., Shikhe, L., and Ahmadi, S. (2018). Removal of reactive blue 19 dye using a combined sonochemical and modified pistachio shell adsorption processes from aqueous solutions. **Iranian Journal of Health Sciences** 6(3): 8–20.
- Reddy, Y. S., Rotte, N. K., Sudhakar, B. K., Chand, N. R., Naik, R. J., Mandal, S., and Chandra, M. R. (2024). Biomass-derived sustainable mesoporous activated carbon as an efficient and recyclable adsorbent for the adsorption of hazardous dyes. **Hybrid Advances** 6: 100218.
- Sangsuk, S., Napanya, P., Tasen, S., Baiya, P., Buathong, C., Keeratisoontornwat, K., and Suebsiri, S. (2023). Production of non-activated biochar based on *Biden pilosa* and its application in removing methylene blue from aqueous solutions. **Heliyon** 9(5): e15766.
- Saratale, R. G., Saratale, G. D., Chang, J. S., and Govindwar, S. P. (2011). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review. **Journal of the Taiwan**

- Institute of Chemical Engineers** 42(1): 138–157.
- Śmigiel–Kamińska, D., Wąs–Gubała, J., Stepnowski, P., and Kumirska, J. (2020). The identification of cotton fibers dyed with reactive dyes for forensic purposes. **Molecules** 25(22): 5435.
- Somboon, W., and Bhavakul, V. (2012). Chemical modification of water hyacinth for the removal of dyestuffs. **TOJSAT: The Online Journal of Science and Technology** 2(1): 1–5.
- Srivatsav, P., Bhargav, B. S., Shanmugasundaram, V., Arun, J., Gopinath, K. P., and Bhatnagar, A. (2020). Biochar as an eco-friendly and economical adsorbent for the removal of colorants (dyes) from aqueous environment: A review. **Water** 12(12): 3561.
- Subashini, L. M., and Saritha, B. (2023). Treatability study on textile wastewater using water hyacinth bioadsorbent. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** 1280(1): 012053.
- Sundararaman, T. R., Sivalingam, S., Mabel, M. M., and Gobinath, T. (2024). Biosorption of toxic reactive blue textile dye from effluent water using immobilized biomass based adsorbent. **Environment and Natural Resources Journal** 22(1): 1–12.
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., and Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere** 125: 70–85.
- Thailand Textile Institute. (2024). **The Situation of the Thai Textile and Garment Industry in December 2024 and the Annual Summary for 2024**. Retrieved from <https://www.thaitextile.org/th/insign/detail.4427.1.0.html>, May 5, 2025. (in Thai)
- Uddin, M. N., Islam, M. T., Chakrabarti, B. K., and Islam, M. S. (2013). Adsorptive removal of methylene blue from aqueous solutions by means of HCl treated water hyacinth: Isotherms and performance studies. **Journal of Pure, Unity Reaction and Environment** 2(3): 63–84.
- Vojnović, B.; Cetina, M.; Franjković, P.; Sutlović, A. (2022). Influence of initial pH value on the adsorption of reactive black 5 dye on powdered activated carbon: Kinetics, mechanisms, and thermodynamics. **Molecules** 27(4): 1349.
- Wei, F., Zhu, Y., He, T., Zhu, S., Wang, T., Yao, C., Yu, C., Huang, P., Li, Y., Zhao, Q., and Song, W. (2022). Insights into the pH-dependent adsorption behavior of ionic dyes on phosphoric acid-activated biochar. **ACS Omega** 7(50): 46288–46302.
- Wong, S., Ghafar, N. A., Ngadi, N., Razmi, F. A., Inuwa, I. M., Mat, R., and Amin, N. A. S. (2020). Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. **Scientific Reports**

10: 2928.

Yadav, M., Singh, N., Annu, Khan, S. A., Rorane, C. J., and Shin, D. K. (2024). Recent Advances in utilizing lignocellulosic biomass materials as adsorbents for textile dye removal: A comprehensive review. **Polymers** 16(17): 2417.