

การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรง

Adsorption of Reactive Blue 19 Dye Using Charcoal Derived from *Sterculia foetida* Fruit Rind

วาทีณี จันมี* หทัยรัตน์ สุขเพริยบพร้อม และอารี แจ้งเรือง

Watinee Chanmee* Hatairat Sukpreabprom and Aree Jangruang

Received: June 17, 2024; Revised: September 11, 2025; Accepted: September 12, 2025

บทคัดย่อ

การดูดซับเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านที่เตรียมจากเปลือกผลลำโรงเป็นวัสดุดูดซับ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านที่เตรียมได้ สภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ พฤติกรรมการดูดซับผ่านไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับในระบบแบตช์ ผลการทดลองพบว่าถ่านที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 12.74 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 2.111 นาโนเมตร จัดเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง ลักษณะสัณฐานมีพื้นผิวขรุขระมีช่องว่างและรูพรุน ธาตุองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน และออกซิเจนผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณถ่าน 0.30 กรัม เวลาในการดูดซับ 180 นาที และค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสีย้อมไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับ ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช จัดเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว มีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 3.7764 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการศึกษาจลนศาสตร์ การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมซึ่งชี้ให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมี จากผลศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของถ่านที่ผลิตจากเปลือกผลลำโรงในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม ช่วยลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นอย่างมีคุณค่าและยั่งยืน

คำสำคัญ: การดูดซับ; สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19; ถ่าน; ลำโรง

คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel 08 9164 7329, E-mail: watinee.ch@bsru.ac.th

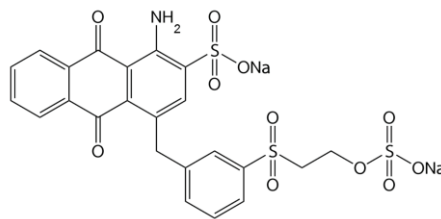
Abstract

Adsorption is a simple and effective method for treating wastewater contaminated with dyes from the textile industry. This study aimed to investigate the adsorption capacity of Reactive Blue 19 dye using charcoal prepared from *Sterculia foetida* fruit rind as the adsorbent. The physical properties of the prepared charcoal, the optimal conditions for adsorption, and the adsorption behavior based on isotherm and kinetic studies were examined under batch conditions. The results showed that the charcoal had a specific surface area of $12.74 \text{ m}^2/\text{g}$ and an average pore diameter of 2.111 nm , classifying it as mesoporous. Its morphology exhibited a rough surface with voids and pores, and the principal elemental components were carbon and oxygen. The optimal conditions for Reactive Blue 19 adsorption were an adsorbent dose of 0.30 g and an adsorption time of 180 min , while the pH of the dye solution did not significantly affect the adsorption. The adsorption isotherm data fitted the Langmuir isotherm better than the Freundlich isotherm, indicating monolayer, homogeneous adsorption, with a maximum adsorption capacity (q_m) of 3.7764 mg/g . The adsorption kinetics followed the pseudo-second-order model, suggesting that the process was governed by chemisorption. These findings demonstrate the potential of charcoal derived from *Sterculia foetida* fruit rind as an adsorbent for removing Reactive Blue 19 from dyeing wastewater, thereby helping to reduce environmental pollution and promoting the valuable and sustainable utilization of locally available agricultural residues.

Keywords: Adsorption; Reactive Blue 19 Dye; Charcoal; *Sterculia foetida*

บทนำ

สีย้อมผ้าสังเคราะห์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยสามารถจำแนกได้เป็นหลายประเภท เช่น สีย้อมแอโซ (Azo Dyes) สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) สีย้อมไดเรกต์ (Direct Dyes) และสีย้อมแอนไอออนิก (Anionic Dyes) แต่ละประเภทมีโครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับชนิดของเส้นใยผ้า (Benkhaya et al., 2020) สีย้อมรีแอคทีฟ เช่น สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 เป็นสีย้อมที่นิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอฝ้าย เนื่องจากสีย้อมรีแอคทีฟสามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับเส้นใย ทำให้ได้สีที่คงทนต่อการซักและแสง (Śmigiel-Kamińska et al., 2020) อย่างไรก็ตามพบปัญหาจากความคงทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ จึงมักพบการปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนในน้ำ ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศน้ำจืด (Gholizade et al., 2023) อีกทั้งยังมีการศึกษาพบว่า สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์และพิษ ต่อจุลินทรีย์และสัตว์น้ำ (Saratale et al., 2011) สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 มีสูตรโมเลกุล $\text{C}_{22}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_{11}\text{S}_3$ มวลโมเลกุล $626.53 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ มีโครงสร้างดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

กระบวนการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes-AOPs) ซึ่งรวมถึงการใช้โอโซนร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ที่สามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกวิธีหนึ่งคือการใช้กระบวนการเฟนตัน (Fenton Process) ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไอออนเหล็กในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลที่สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ (Abrile et al., 2020) และวิธีที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่งคือ การดูดซับ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ประหยัดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุดูดซับจากธรรมชาติหลายชนิดที่สามารถดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ได้ดี ตัวอย่างเช่น กากชา และเมล็ดมะรุม (Yadav et al., 2024; Reddy et al., 2024) ชิงช้าโพล (Rahmoun et al., 2025) และยังมีรายงานว่าผงเมล็ดทับทิม สามารถดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ได้ดี (Dehvari et al., 2016)

การใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติ หรือของเสียทางการเกษตรมาให้ความร้อนสูงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัดหรือไม่มีเลยจะได้ ถ่าน (Charcoal) หรือเรียกว่า ถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นวัสดุที่มีรูพรุน ซึ่งได้จากการคาร์บอนไนเซชันของวัสดุชีวมวล (Lehmann and Joseph, 2015) การมีรูพรุนสูงทำให้ถ่านสามารถดูดซับได้ดีขึ้น ตัวอย่างของถ่านจากชีวมวลที่ใช้ดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ได้ดี เช่น ถ่านจากกากกาแฟ (Hyeon et al., 2025) ถ่านจากชิงช้าโพล (Adejumo et al., 2020) ถ่านจากเปลือกเมล็ดแมคาเดเมีย (Fernandes et al., 2025) ถ่านเปลือกลำไย (Hoa et al., 2025) และถ่านจากไม้ไผ่ (Ahmad and Hameed, 2010) เป็นต้น การใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติเหล่านี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียเท่านั้น แต่ยังส่งเสริมการใช้ทรัพยากรในท้องถิ่นและลดปริมาณของเสียจากการเกษตรอีกด้วย

ลำโรง (*Sterculia foetida*) เป็นไม้ยืนต้นที่พบในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะในอินเดีย ศรีลังกา อินโดนีเซีย และบางพื้นที่ของประเทศไทย (Yennam et al., 2024) เปลือก ผล และเมล็ดของต้นลำโรงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น เมล็ดมีน้ำมันที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสบู่ เชื้อเพลิง และยา (Sridharan et al., 2024) เปลือกผลลำโรงเมื่อแก่จัดจนแห้งจะแข็งเหมือนไม้ เปลือกหนาแต่เบา แสดงว่ามีช่องอากาศแทรกอยู่ภายในจำนวนมาก งานวิจัยนี้สนใจที่จะนำเปลือกผลลำโรงซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาทำให้เป็นถ่านเพื่อเพิ่มรูพรุนให้มากขึ้น ใช้เป็นวัสดุดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่เตรียมได้ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ไอโซเทอมการดูดซับ และจลนศาสตร์การดูดซับ ซึ่งผลการศึกษารั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ในชุมชน

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุดูดซับ ถ่านจากเปลือกผลลำโรง

นำเปลือกผลลำโรงมาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อลดสิ่งสกปรก ตากให้แห้ง จากนั้นนำไปคาร์บอนไนเซชันด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ภายใต้สภาวะที่มีการจำกัดออกซิเจน เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำวัสดุที่ได้มาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ แล้วนำไปอบที่ 70 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านจากเปลือกผลสำโรง

2.1. วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Specific Surface Area Analyzer) บริษัท Quantachrome รุ่น Quadrasorb SI ด้วยวิธี BET (Brunauer Emmett-Teller)

2.2. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาถ่านจากเปลือกผลสำโรง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6610LV และต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์วัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) บริษัท Oxford รุ่น INCA x-act

2.3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Spectrum One โดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance (ATR) ที่มีการวัดในช่วงคลื่น 400 - 4000 cm^{-1}

3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

ทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch Experiments) โดยชั่งถ่านจากเปลือกผลสำโรงใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 mL ปิดเตาสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 50.00 ppm ปริมาตร 25.00 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Digital Precise Shaking Water Bath; บริษัท DAIHAN Scientific รุ่น Maxturdy-45) ความเร็ว 150 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการกรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 และนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer; บริษัท Metash รุ่น UV5100) ที่ความยาวคลื่น 591 nm คำนวณค่าร้อยละการดูดซับ (%Adsorption) ดังสมการที่ (1) และความสามารถในการดูดซับ (q_e) ดังสมการที่ (2)

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับดังนี้:

3.1. ปริมาณวัสดุดูดซับ: เปรียบเทียบค่าร้อยละการดูดซับ เมื่อใช้ถ่านจากเปลือกผลสำโรงมวล 0.0500 0.1000 0.1500 0.2000 0.2500 0.3000 และ 0.3500 กรัม โดยควบคุมเวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง

3.2. เวลาในการดูดซับ: ใช้ถ่านจากเปลือกผลสำโรง 0.2000 กรัม เปรียบเทียบค่าร้อยละการดูดซับเมื่อกำหนดเวลาในการดูดซับที่ 10 30 60 120 180 และ 240 นาที

3.3. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH): เปรียบเทียบค่าร้อยละการดูดซับเมื่อใช้สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีค่า pH เป็น 2 4 6 7 8 และ 10 โดยใช้วัสดุดูดซับ 0.2000 กรัม และเวลาในการดูดซับ 180 นาที

การทดลองในแต่ละปัจจัยดำเนินการซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างคู่ค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Tukey's HSD (Honestly Significant Difference) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 (กำหนดให้ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ) โดยแสดงผลการทดลองในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (El-Naggar et al., 2016)

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

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

โดย C_0 C_e และ V คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) ความเข้มข้นที่สมดุล (ppm) และปริมาตรของสารละลายรีแอคทีฟบลู 19 (mL) ตามลำดับ และ m คือมวลของถ่านจากเปลือกผลสำโรง (g)

4. การศึกษาสมการไอโซเทอมการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่ความเข้มข้น 20.00 25.00 30.00 40.00 และ 50.00 ppm ทำการดูดซับด้วยถ่านจากเปลือกผลสำโรง 0.2000 กรัม เป็นเวลา 180 นาที แล้ววัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นคำนวณค่า q_e และนำผลลัพธ์ไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich เพื่อหากลไกการดูดซับ

5. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

ชั่งถ่านจากเปลือกผลสำโรง 0.2000 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิเปตสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 50.00 ppm ปริมาตร 25.00 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เวลา 10 30 60 120 180 และ 240 นาที กรองแยกสารละลายนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (q_e) ตามสมการที่ (2) ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t (q_t) ตามสมการที่ (3) โดย C_t คือความเข้มข้นของสารละลายรีแอคทีฟบลู 19 ที่เวลา t นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการดูดซับโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First-Order) และ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second-Order)

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

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านจากเปลือกผลสำโรง

1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Specific Surface Area Analyzer) ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller)

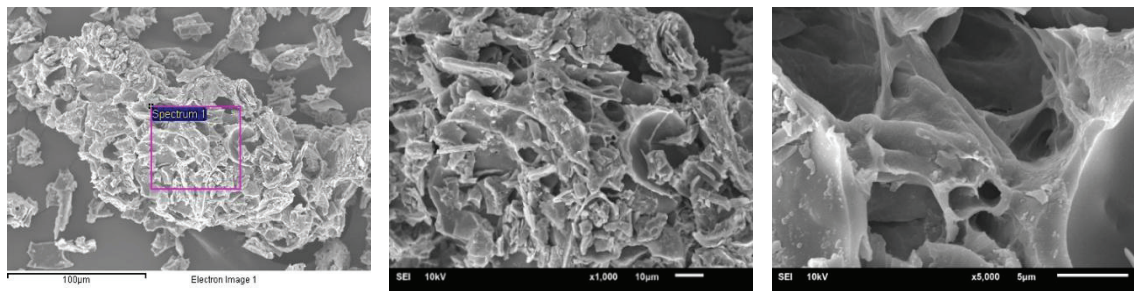
ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วย BET Surface Area ของถ่านจากเปลือกผลสำโรง

รายการ	ผลการวิเคราะห์
พื้นที่ผิว (Surface Area Data)	12.74 m ² /g
ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume)	0.01344 cm ³ /g
ขนาดของรูพรุน (Pore Size)	2.111 nm

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านที่เตรียมได้จากเปลือกผลสำโรง พบว่ามีปริมาตรรูพรุน 0.01344 cm³/g มีพื้นที่ผิว 12.74 m²/g พื้นที่ผิวมีค่าไม่สูงมาก แต่มีค่าสูงกว่าถ่านจากวัสดุชีวมวลอื่นที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้น เช่น ถ่านจากก้นข้าว (*Biden pilosa*) ที่มีพื้นที่ผิว 5.21 m²/g (Sangsuk et al., 2023) และถ่านจากพืชหน่อกิม (Suaeda Altissima) ที่มีพื้นที่ผิว 3.5 m²/g (Xiao et al., 2022) เมื่อพิจารณาขนาดของรูพรุนของถ่านจากเปลือกผลสำโรงที่มีขนาด 2.111 nm ตามนิยามของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) วัสดุที่มีรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 - 50 nm จัดอยู่ในกลุ่มรูพรุนขนาดกลาง หรือ เมโซพอร์ (Mesopores) (Galán et al., 2013; Thommes et al., 2015) นอกจากนี้จากกราฟไนโตรเจนแอดซอร์ปชัน-ดีซอร์ปชัน แสดงลักษณะไอโซเทอมประเภทที่ IV ตามเกณฑ์ของ IUPAC โดยมี Hysteresis Loop ปรากฏชัดในช่วง P/Po ประมาณ 0.4 - 0.9 ซึ่งเป็นช่วงที่สัมพันธ์กับการเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนในรูพรุนขนาดกลาง

บ่งชี้ว่าถ่านจากเปลือกผลส้มมีลักษณะเป็นวัสดุประเภทเมโซพอร์ (Sing, 1985; Thommes et al., 2015) ทำให้โมเลกุลสีย้อมสามารถแพร่กระจายและเข้าสู่ภายในโครงสร้างรูพรุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่เกิดข้อจำกัดจากผลกระทบการกีดกันขนาด (Size Exclusion Effect) โมเลกุลสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ผ่านเข้ารูพรุนขนาด Micropore ได้ยาก ส่วนรูพรุนขนาด Macropore แม้จะมีขนาดใหญ่จนโมเลกุลของสีย้อมผ่านเข้าไปได้ แต่จะมีพื้นที่ผิวน้อยลงทำให้ดูดซับได้ไม่ดี (Foo and Hameed, 2010; Iwuozor et al., 2021)

1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาถ่านจากเปลือกผลส้ม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM/EDS)



(ก) กำลังขยาย 500 เท่า

(ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า

และบริเวณที่วิเคราะห์ธาตุ
องค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS

รูปที่ 2 ภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของถ่านจากเปลือกผลส้ม

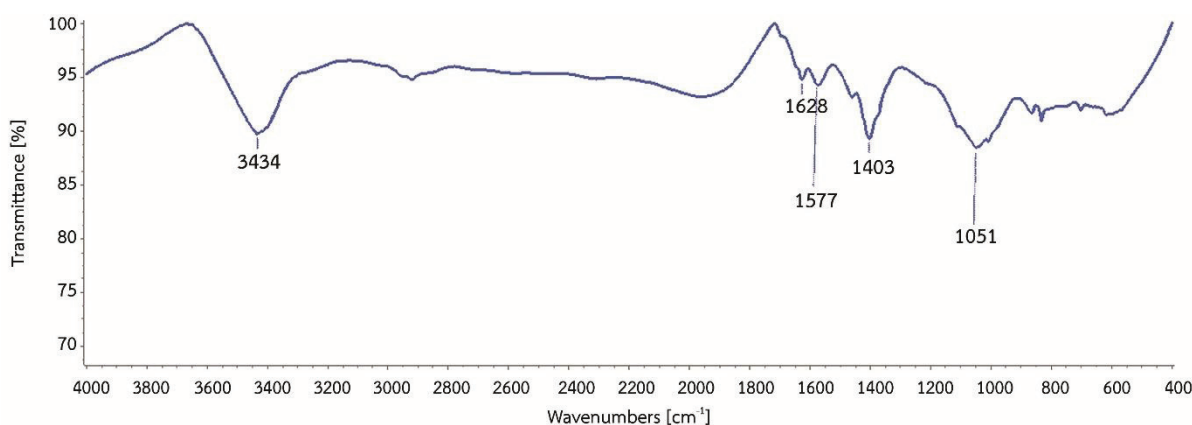
ตารางที่ 2 ธาตุองค์ประกอบของถ่านจากเปลือกผลส้มที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM/EDS

Element	Weight %	Atomic %
C	67.54	79.27
O	17.06	15.03
Mg	0.47	0.28
Cl	1.40	0.55
K	12.07	4.35
Ca	1.46	0.52
Totals	100.00	-

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านจากเปลือกผลส้มที่เตรียมได้ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะขรุขระมีช่องว่าง และรูในถ่าน ดังรูปที่ 2(ก) (ข) และ (ค) โดยช่องว่างนี้มีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ โดยช่องว่างขนาดใหญ่มีขนาดมากกว่า 5 ไมโครเมตร การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านจากเปลือกผลส้มด้วยเทคนิค SEM/EDS ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า มีคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบหลัก 67.54 % โดยน้ำหนัก หรือ 79.27 % เชิงอะตอม ซึ่งเป็นคุณสมบัติทั่วไปของถ่านจากวัสดุธรรมชาติที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชัน ปริมาณคาร์บอนที่สูงนี้ ประกอบกับโครงสร้างที่มีรูพรุน ทำให้เกิดอันตรกิริยากับสีย้อมได้ดี (Keiluweit et al., 2010) π - π stacking โดยเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวงแหวนอะโรมาติกของถ่านกับวงแหวนอะโรมาติกของโมเลกุลสีย้อม (Laishram et al., 2025) นอกจากนี้ยังพบออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบ 17.06 % โดยน้ำหนัก หรือ 15.03 % เชิงอะตอม แสดงว่ายังมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนหลงเหลืออยู่บนพื้นผิวถ่าน ซึ่งช่วยในการเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิต หรือ

พันธะไฮโดรเจนกับสีย้อมที่มีขั้วอย่างสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 (Xue et al., 2012) ส่วนธาตุรองได้แก่ โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นสิ่งตกค้างจากพืช มีส่วนช่วยในการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อโลหะเหล่านี้แตกตัวเป็นไอออนบวกจะช่วยในการดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบได้ (Ahmad et al., 2014) องค์ประกอบธาตุที่หลากหลายและสัดส่วนของธาตุคาร์บอนที่สูง แสดงถึงศักยภาพของถ่านจากเปลือกผลสำโรง ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Chen et al., 2011)

1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)



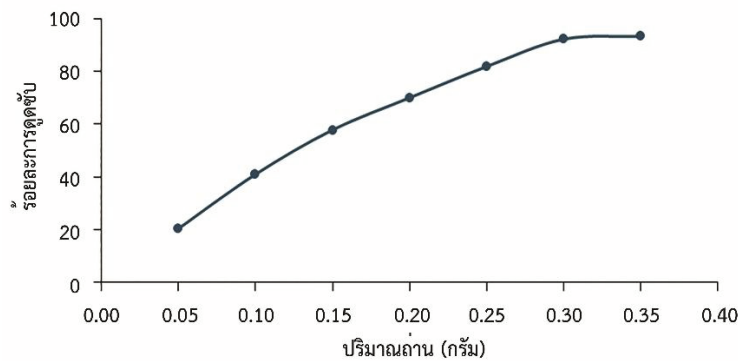
รูปที่ 3 สเปกตรัมอินฟราเรดของถ่านจากเปลือกผลสำโรง

สเปกตรัมอินฟราเรดของถ่านจากเปลือกผลสำโรงในรูปที่ 3 พบพีกที่ปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ 3434 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ที่เลขคลื่น 1627 cm^{-1} การสั่นของพันธะ C=O (C=O stretching) และพันธะ C=C ในวงอะโรมาติก (highly conjugated aromatic C=C stretching) (condensed aromatic C=C stretching) ที่เลขคลื่น 1577 cm^{-1} (Chatterjee et al., 2020; Angthararuk et al., 2023) สอดคล้องกับผล SEM/EDS ที่บ่งชี้ถึงธาตุคาร์บอนและออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบหลัก มีวงอะโรมาติกเป็นโครงสร้างหลักของคาร์บอนในถ่านชีวภาพที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูง (Keiluweit et al., 2010) อีกทั้งยังประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิลด้วย

2. ผลการศึกษาสภาพที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19

2.1 ปริมาณวัสดุดูดซับ

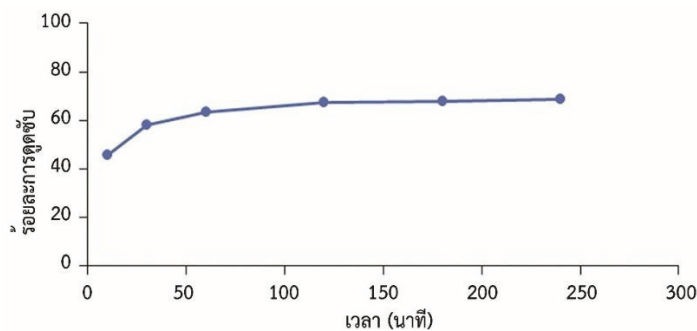
ผลการศึกษาผลของปริมาณถ่านต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของถ่านมากขึ้น 0.0500 0.1000 0.1500 0.2000 0.2500 0.3000 และ 0.3500 กรัม ร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 จะเพิ่มขึ้นดังนี้ 20.21 ± 0.49^a , 40.84 ± 0.47^b , 57.71 ± 1.90^c , 69.92 ± 0.30^d , 81.77 ± 1.83^e , 92.16 ± 0.96^f และ 93.29 ± 0.89^f ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณถ่านคือการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับสีย้อมให้มากขึ้น และเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 0.3000 0.3500 กรัม พบว่าร้อยละการดูดซับเริ่มคงที่ เนื่องจากระบบเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว (Saturation) พื้นที่ผิวของถ่านที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้มากไปกว่านี้ (Zhou et al., 2019) ดังนั้นปริมาณถ่านที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.30 กรัม (ที่ความเข้มข้นสีย้อม 50 ppm ปริมาตร 25.00 mL) อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาปัจจัยอื่นที่ตามมา คือ เวลา pH ไอโซเทอม และจลนศาสตร์การดูดซับ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ปริมาณถ่าน 0.2000 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยกว่าค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้กระบวนการดูดซับไม่เข้าสู่ภาวะอิ่มตัว สามารถเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสีย้อมได้ และวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างแม่นยำ (Ahmad and Hameed, 2010)



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านจากเปลือกผลลำโรงที่ใช้ในการดูดซับและร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 เท่ากับ 50.00 ppm เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)

2.2 เวลาในการดูดซับ

จากการศึกษาผลของเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรงที่เวลาในการดูดซับ 10, 30, 60, 120, 180 และ 240 นาที มีร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 45.52 ± 0.39^a , 58.00 ± 0.26^b , 63.35 ± 0.70^c , 67.61 ± 0.36^d , $67.94 \pm 0.23^{d,e}$ และ 68.89 ± 0.15^e ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 จะเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันเนื่องจากในช่วงแรกมีตำแหน่งที่ว่างไว้ในการดูดซับ (Active Sites) จำนวนมาก (Aswasukhee et al., 2012; Sukpreabprom et al., 2024) และจะเริ่มคงที่ที่เวลา 180 นาที ดังกราฟในรูปที่ 5 เนื่องจากการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibrium) ดังนั้นเวลาเหมาะสมในการดูดซับคือ 180 นาที

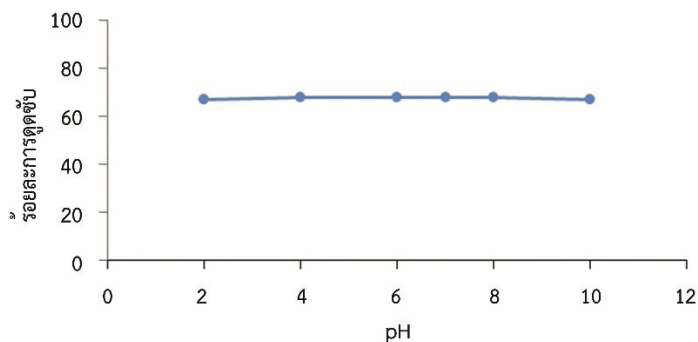


รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับและร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 (ปริมาณถ่าน 0.2000 g ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 เท่ากับ 50.00 ppm เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที)

2.3 ความเป็นกรด-เบส (pH)

จากการศึกษาความเป็นกรด-เบสของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านจากเปลือกผลลำโรงที่เตรียมขึ้นที่ pH 2 4 6 7 8 และ 10 มีร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 67.16 ± 0.66^a , 67.90 ± 1.26^a , 67.96 ± 0.21^a , 67.95 ± 0.10^a , 67.95 ± 1.05^a และ 66.92 ± 0.69^a ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 6 นั่นคือการเพิ่มหรือลดปริมาณของประจุบวกและประจุลบในสารละลายไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการดูดซับของ

ถ่านจากเปลือกผลลำโรง เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีย้อมและถ่านที่สำคัญ 2 แรงคือ ระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic-hydrophobic interaction) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสีย้อมและส่วนที่ไม่ชอบน้ำของถ่าน หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอน และแรงยึดเหนี่ยว $\pi-\pi$ Stacking ระหว่าง π อิเล็กตรอนของวงอะโรมาติกของสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ยึดเหนี่ยวกับ π อิเล็กตรอนของวงอะโรมาติกของถ่าน การเปลี่ยนแปลงค่า pH จึงไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับ (Umpuch et al., 2017)



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 (ปริมาณถ่าน 0.2000 g ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 เท่ากับ 50.00 ppm เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 180 นาที)

3. ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรง

ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรง เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของถ่านจากเปลือกผลลำโรงกับความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่เหลืออยู่ ณ สภาวะสมดุลและอุณหภูมิคงที่ เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมและใช้อธิบายลักษณะการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ของถ่านจากเปลือกผลลำโรงที่เตรียมขึ้น ซึ่งไอโซเทอมที่ศึกษาในการทดลองนี้มี 2 แบบ คือ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีสมมติฐานว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) และมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวและไม่เกิดอันตรกิริยากับตัวดูดซับ (Hameed et Al., 2007) เมื่อพิจารณาสมการไอโซเทอมของการดูดซับแลงเมียร์ เขียนได้ดังสมการ (4)

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

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียว หาได้จาก $q_e = \frac{(C_e - C_0)}{W} V$
 K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์

แบบจำลองไอโซเทอมสมการเส้นตรงของการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการ (5)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (5)$$

ไอโซเทอมแบบฟรันทซ์มีสมมติฐานว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของพื้นผิวมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยผ่านกลไกของการดูดซับหลายชั้น (Hameed et al., 2007) ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุล เมื่อพิจารณาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรันทซ์ เขียนได้ดังสมการที่ (6)

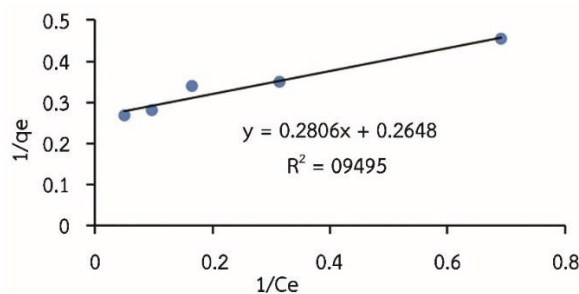
$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ฟรันทซ์
 $1/n$ คือ ปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียว

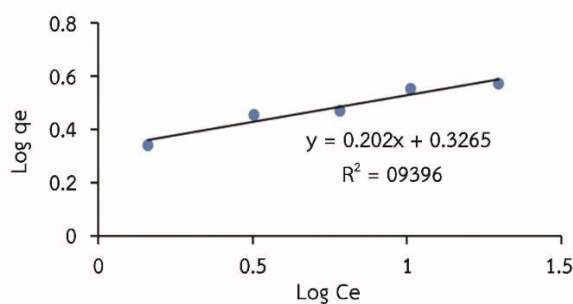
แบบจำลองไอโซเทอมสมการเส้นตรงของการดูดซับแบบฟรันทซ์เขียนได้ดังสมการที่ (7)

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (7)$$

จากที่กล่าวข้างต้น เมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อศึกษาความสอดคล้องของข้อมูลสำหรับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านจากเปลือกผลสำโรงเป็นตัวดูดซับ สำหรับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรันทซ์ ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์



รูปที่ 8 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรันทซ์

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านจากเปลือกผลส้มโรงเรียนเป็นตัวดูดซับ

Isotherm Model		Isotherm Parameters
Langmuir isotherm	q_m	3.7764 mg/g
	K_L	0.9437 L/mg
	R^2	0.9495
Freundlich isotherm	K_F	2.1208
	$1/n$	0.2020
	R^2	0.9396

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 กับวัสดุธรรมชาติในงานวิจัยอื่น

Adsorbent	q_m (mg/g)	Reference
Pistachio shell	2.2	(Rahdar et al., 2018)
Pomegranate seed powder	3.61	(Dehvari et al., 2016)
Coconut shell	2.2	(Isah et al., 2015)
Grapefruit peel	12.39	(Abassi and Razzaghi Asl, 2009)
Groundnut shell derived biochar	7.99	(Muralikrishnan and Jodhi, 2023)
Charcoal derived from <i>Sterculia foetida</i> Fruit Rind	3.7764	Present study

นำกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มาคำนวณหาค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับ พบว่ามีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 3.7764 mg/g ค่าคงที่การดูดซับ (K_L) เท่ากับ 0.9437 L/mg และมีความเป็นเส้นตรง R^2 เท่ากับ 0.9495 ดังตารางที่ 3 คำนวณหาค่า R_L (หรือ Separation Factor) ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของการดูดซับตามแบบจำลอง Langmuir Isotherm ได้จากสมการ $R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$ พบว่าค่า R_L อยู่ในช่วง 0.0209 - 0.0508 ค่าที่ได้อยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Favorable) ส่วนไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช คำนวณค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับได้ดังนี้ ค่า $(1/n)$ เท่ากับ 0.2020 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่ใช้ในการดูดซับ ค่าคงที่การดูดซับ (K_F) เท่ากับ 2.1208 เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของทั้งสองไอโซเทอมพบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ($R^2 = 0.9495$) มากกว่าฟรุนดิช ($R^2 = 0.9396$) เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า

แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ของถ่านจากเปลือกผลส้มโรงเรียนที่เตรียมได้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) บนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียว มีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 3.7764 mg/g มีค่าสูงกว่าวัสดุดูดซับธรรมชาติหลายชนิดที่มีรายงานผลวิจัย เช่น ผงเมล็ดทับทิม เปลือกพิสตาชิโอ และกะลามะพร้าว ดังตารางที่ 4 แม้ถ่านจากเปลือกผลส้มโรงเรียน จะไม่ได้ให้ค่า q_m สูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุบางชนิด แต่มีข้อดีที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น อีกทั้งกระบวนการเตรียมไม่ซับซ้อน ไม่ต้องผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation) ไม่ใช้สารเคมีอันตราย pH ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ ใช้ได้ทั้งในกรดและเบส สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เหมาะสำหรับนำไปใช้ในระดับชุมชนหรือระบบบำบัดขนาดเล็กที่เน้นความปลอดภัยและความยั่งยืน

4. ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านจากเปลือกผลสำโรงเป็นวัสดุดูดซับ ได้ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์กลไกการดูดซับและอัตราการดูดซับ โดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First-Order) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second-Order) ตามสมการที่ (8) และ (9)

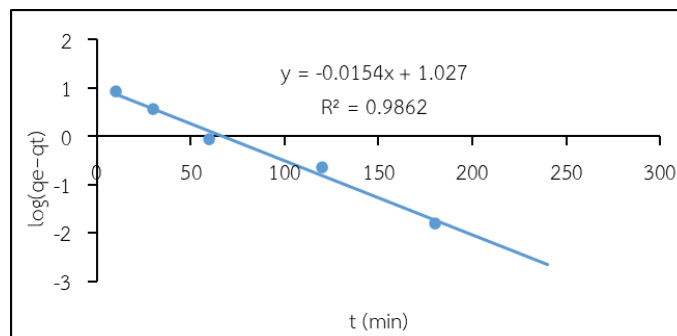
ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้มีการสร้างกราฟทั้งสองแบบจำลอง ดังรูปที่ 9 และ 10 โดยใช้ข้อมูล q_t (ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t ในหน่วย mg/g) และ q_e (ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลในหน่วย mg/g) กับ t (เวลา (min)) เพื่อคำนวณค่าคงที่การดูดซับในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (k_1 ($1/\text{min}$)) ค่าคงที่การดูดซับในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (k_2 ($\text{g/mg}\cdot\text{min}$)) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแต่ละแบบจำลอง

สมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม :

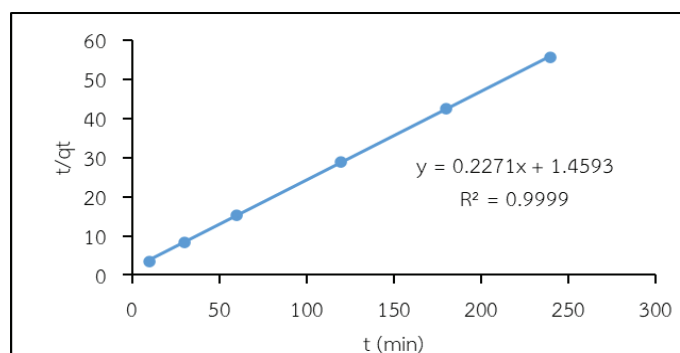
$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (8)$$

สมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (9)$$



รูปที่ 9 กราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



รูปที่ 10 กราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

ผลการคำนวณค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์จากการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ให้ค่าคงที่ $k_1 = 0.0355 \text{ min}^{-1}$ และค่า $q_e = 10.64 \text{ mg/g}$ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลที่สูงกว่า

ค่าที่ได้จากการทดลองจริง ขณะที่แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ให้ค่าคงที่ $k_2 = 0.0352 \text{ g/mg}\cdot\text{min}$ และค่า $q_e = 4.40 \text{ mg/g}$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

Model	Parameter		
Pseudo-first-order	q_e (experimental)	4.31	mg/g
	q_e (calculated)	10.64	mg/g
	k_1	0.0355	min^{-1}
	R^2	0.9862	
Pseudo-second-order	q_e (calculated)	4.40	mg/g
	k_2	0.0352	$\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{min})$
	h	0.685	$\text{mg}/\text{g}\cdot\text{min}$
	R^2	0.9999	

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่าแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีความเหมาะสมในการอธิบายกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 บนถ่านจากเปลือกผลลำโรง โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองอันดับสองเทียมมีค่า 0.9999 ซึ่งใกล้เคียง 1.0 มากกว่าแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9862 แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ซึ่งอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสีย้อมกับหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านเป็นหลัก โดยกลไกที่สำคัญที่อาจเกิดขึ้น ได้แก่ π - π Stacking แรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิตและพันธะไฮโดรเจน (Tan et al., 2008; Ahmad and Hameed, 2010) สอดคล้องกับงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติหรือวัสดุชีวภาพ ซึ่งมักจะพบว่าแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมให้การอธิบายที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างเช่น งานวิจัยที่ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟด้วยถ่านชีวภาพจากเปลือกส้ม (Jawad et al., 2019) และถ่านจากกากเมล็ดฟักทอง (Kizil et al., 2024) ก็แสดงผลที่สอดคล้องกัน ว่าการดูดซับเป็นไปแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรง พบว่า ถ่านที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิว $12.74 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุน $0.01344 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดของรูพรุน 2.111 nm จัดว่าเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง mesopores ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง (2 - 50 nm) จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค SEM/EDS พบว่าถ่านมีพื้นผิวขรุขระมีช่องว่างและรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่ มีธาตุคาร์บอน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก 67.54 และ 17.06 % โดยน้ำหนักตามลำดับ และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีหมู่ไฮดรอกซิลและวงอะโรมาติก เมื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 สภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณถ่าน 0.30 กรัม เวลาในการดูดซับ 180 นาที และค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสีย้อม ไม่ส่งผลต่อการดูดซับ

เมื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลส้มมีแนวโน้มสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีค่ามากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ($R^2=0.9495$) บ่งชี้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับในลักษณะชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) บนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน มีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 3.7764 mg/g จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมี จากผลการทดลองมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้วัสดุนี้ในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสี ซึ่งจะเป็นการช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและยังเป็นการนำเปลือกผลส้มที่เป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าอีกทางหนึ่งด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา สำหรับความอนุเคราะห์สนับสนุนเครื่องมือและสารเคมี รวมทั้งเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณบริษัท พี.พี. คัลเลอร์ เท็กซ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 และ คุณปรีชา ภัสสรศิริ บริษัท อุตสาหกรรมแมนดารินสปินนิ่ง จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการเผ่าถ่านจากเปลือกผลส้มที่ใช้นในงานวิจัยในครั้งนี้

References

- Abassi, M. and Razzaghi Asl, N. (2009). Removal of Hazardous Reactive Blue 19 Dye from Aqueous Solutions by Agricultural Waste. *Journal of the Iranian Chemical Research*, 2, 221-230. <https://www.academia.edu/30876200>
- Abrile, M.G., Fiasconaro, M.L. and Lovato, M.E. (2020). Optimization of Reactive Blue 19 Dye Removal Using Ozone and Ozone/UV Employing Response Surface Methodology. *SN Applied Sciences*, 2, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2824-y>
- Adejumo, A.L., Azeez, L., Oyedele, A.O., Adetoro, R.O. and Aderibigbe, F.A. (2020). Nanostructured and Surface Functionalized Corncob as Unique Adsorbents for Anionic Dye Remediation. *Springer Nature Applied Sciences (SN Applied Sciences)*, 2, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2109-5>
- Ahmad, A.A. and Hameed, B.H. (2010). Fixed-bed Adsorption of Reactive Azo Dye onto Granular Activated Carbon Prepared from Waste. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.003>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Angthararuk, D., Phasuk, S. and Takolpuckdee, P. (2023). Low-Cost Biochar Derived from Bamboo Waste for Removal of Heavy Metal in Aqueous Solution. *Journal of Food Health and Bioenvironmental Science*, 15(2), 34-42. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sdust/article/view/260628>

- Aswasukhee, A., Suppametanon, N., Sombatsri, S., Kunawong, T. and Chankaew, C. (2012). Adsorption of Methyl Orange Using Clays and Zeolites. *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal*, 5(2), 1-10. <https://ph01.tcithaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/15953/14529>
- Benkhaya, S., M'rabet, S. and El Harfi, A. (2020). Classifications, Properties, Recent Synthesis and Applications of Azo Dyes. *Heliyon*, 6(1), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03271>
- Chen, B., Chen, Z. and Lv, S. (2011). A Novel Magnetic Biochar Efficiently Sorbs Organic Pollutants and Phosphate. *Bioresource Technology*, 102(2), 716-723. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>
- Chatterjee, R., Sajjadi, B., Chen, W.-Y., Mattern, D.L., Hammer, N., Raman, V. and Dorris, A. (2020). Effect of Pyrolysis Temperature on Physicochemical Properties and Acoustic-Based Amination of Biochar for Efficient CO₂ Adsorption. *Frontiers in Energy Research*, 8, 85. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00085>
- Dehvari, 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. <https://www.researchgate.net/publication/299385785>
- El-Naggar, A.H., Alzhrani, A.K.R., Ahmad, M., Usman, A.R.A., Mohan, D., Ok, Y.S. and Al-Wabel, M.I. (2016). Preparation of Activated and Non-Activated Carbon from *Conocarpus* Pruning Waste as Low-Cost Adsorbent for Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution. *BioRes*, 11(1), 1092-1107. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.1092-1107>
- Fernandes, G.B., Alves, R.de O., Marconsini, L.T., de Oliveira, M.P., Passos, R.R., Profeti, D. and Profeti, L.P.R. (2025). Macadamia Nut Residue-Derived Biochar: An Eco-Friendly Solution for β -Naphthol and Reactive Black-5 Removal. *Catalysis Today*, 445, <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.115050>
- Foo, K.Y. and Hameed, B.H. (2010). Insights into the Modeling of Adsorption Isotherm Systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Galán, J., Rodríguez, A., Gómez, J. M., Allen, S. J. and Walker, G. M. (2013). Reactive Dye Adsorption onto a Novel Mesoporous Carbon. *Chemical Engineering Journal*, 219, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.073>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22545-4>
- Hameed, B.H., Din, A.T.M. and 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>
- Hoa, N.T.H., Quynh, N.T., Nguyen, V.D., Nguyen, T.N., Huy, B.Q., Thanh, N.T., Loan, H.T., Hoa, N.T.Q. and Nghia, N.T. (2025). Adsorptive Removal of Reactive Black 5 by Longan Peel-Derived Activated Carbon: Kinetics, Isotherms, Thermodynamics, and Modeling. *Water*, 17(11), <https://doi.org/10.3390/w17111678>

- Hyeon, G.-W., Lee, G.B., Kang, D.J., Lee, S.E., Seong, K.M. and Park, J.-E. (2025). Optimization of Activated Carbon Synthesis from Spent Coffee Grounds for Enhanced Adsorption Performance. *Molecules*, 30(12), <https://doi.org/10.3390/molecules3012255>
- Isah, U.A., Abdulraheem, G., Bala, S., Muhammad, S. and Abdullahi, M. (2015). Kinetics, Equilibrium and Thermodynamics Studies of C.I. Reactive Blue 19 Dye Adsorption on Coconut Shell Based Activated Carbon. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 102, 265-273. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.006>
- Iwuozor, K.O., Ighalo, J.O., Emenike, E.C., Igwegbe, C.A. and Adeniyi, A.G. (2021). Do Adsorbent Pore Size and Specific Surface Area Affect the Kinetics of Methyl Orange Aqueous-Phase Adsorption?. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-777328/v1>
- Jawad, A.H., Al-Heetimi, D.T. and Abd Rashid, R. (2019). Biochar from Orange (*Citrus sinensis*) Peels by Acid Activation for Methylene Blue Adsorption. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 38(2), 91-105. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2019.30877>
- Keiluweit, M., Nico, P.S., Johnson, M.G. and Kleber, M. (2010). Dynamic Molecular Structure of Plant Biomass-Derived Black Carbon (Biochar). *Environmental Science and Technology*, 44(4), 1247-1253. <https://doi.org/10.1021/es9031419>
- Kızıl, Y., Benek, V., Teğin, İ., Önal, Y., Erol, K. and Alacabey, İ. (2024). Reactive Blue 19 Adsorption on Activated Carbon from Pumpkin (*Cucurbita pepo*) Seed Waste: Kinetic, Isotherm and Thermodynamic Studies. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 80(1), 7-20. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.80.1.34243>
- Laishram, D., Kim, B., Lee, Y. and Park, J. (2025). Advancements in Biochar as a Sustainable Adsorbent for Water Pollution Mitigation. *Advanced Science*, 12(19), 2410383. <https://doi.org/10.1002/adv.202410383>
- Lehmann, J. and Joseph, S.(Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Muralikrishnan, R. and Jodhi, C. (2023). Biodecolorization of Reactive Blue 19 Using Biochar Derived from Groundnut Shell: Batch Adsorption Isotherms, Kinetics and Regeneration Studies. *Applied Nanoscience*, 13, 2211–2221. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02212-9>
- 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, 8-20. <https://doi.org/10.18502/jhs.v6i3.193>
- Rahmoun, H.B., Boumediene, M., Ghenim, A.N., Da Silva, E.F. and Labrincha, J. (2025). Coupling Coagulation-Flocculation-Sedimentation with Adsorption on Biosorbent (Corncob) for the Removal of Textile Dyes from Aqueous Solutions. *Environments*, 12(6), 201. <https://doi.org/10.3390/environments12060201>
- Reddy, Y., Rotte, N.K., Sudhakar, B.K., Chand, N., 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, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100218>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.006>
- Sing, K.S.W. (1985). Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*, 57(4), 603-619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
- 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. <https://doi.org/10.3390/molecules25225435>
- Sukpreabprom, H., Chanmee, W., Jangruang, A., La-onghitirat, T. and Chunyoung, N. (2024). Adsorption of Direct Red 23 Dye by Corn Husks. *Journal of BSRU-Research and Development Institute*, 9(1), 135-149. <https://so06.tcithaijo.org/index.php/rdibsr/article/view/271556>
- 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), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15766>
- Sridharan, V., Pulidindi, I.N., Vaithyanathan, P., Kanthadai, V.T. and Balasubramanian, V. (2024). Steam Activated Carbon Material from the Fruit Shells of *Sterculia foetida* for Energy and Environmental Applications. *Journal of Water Pollution and Purification Research*, 11(1), 23-33. <https://journals.stmjournals.com/jowppr/article=2024/view=168758>
- Tan, I.A.W., Ahmad, A.L. and Hameed, B.H. (2008). Adsorption of Basic Dye Using Activated Carbon Prepared from Oil Palm Shell: Batch and Fixed Bed Studies. *Desalination*, 225(1-3), 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.005>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J. and Sing, K.S.W. (2015). Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Umpuch, C., Kamphu, T., Thongfueang, N., Kaewsiri, S., Paopo, I., Sangthien, T. and Sangthean, P. (2017). Adsorption of Reactive Black 5 Dye on Activated Carbon Prepared from Water Hyacinth. *Journal of Science and Technology, UbonRatchathani University*, 19(1), 163-177. https://li01.tcithaijo.org/index.php/sci_ubu/article/view/86460/68588
- Xiao, H., Lin, Q., Li, G., Zhao, X., Li, J. and Li, E. (2022). Comparison of Biochar Properties from 5 Kinds of Halophyte Produced by Slow Pyrolysis at 500 °C. *Biochar*, 4(1), <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00141-6>
- Xue, Y., Gao, B., Yao, Y., Inyang, M., Zhang, M. and Zimmerman, A. R. (2012). Hydrogen Peroxide Modification Enhances the Ability of Biochar (Hydrochar) Produced from Hydrothermal Carbonization of Biomass to Remove Aqueous Heavy Metals: Batch and Column Tests. *Chemical Engineering Journal*, 200-202, 673-680. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.116>

- Yadav, M., Singh, N., Annu, Khan, S.A., Raorane, 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. <https://doi.org/10.3390/polym16172417>
- Yennam, R., Gautam, N., Shah, J., Thandlam, A.K., Gole, S., Nirgude, P. and Dabhade, G. (2024). Evaluation of Activated Biochar from Sustainable *Sterculia foetida* Shells for the Removal of AB 158 Dye. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 13(2), 248-255. <https://doi.org/10.13074/jent.2024.06.242607>
- Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y. and Liu, Y. (2019). Recent Advances for Dyes Removal Using Novel Adsorbents: A Review. *Environmental Pollution*, 252, 352-365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>