

การพัฒนาถ่านจากเปลือกทุเรียนเพื่อกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้ง

Development of Durian Peel-Derived Charcoal for Removal of Textile Dyes in Wastewater

ประนิตดา อินชมฤทธิ์*, ปิยะนุช ทองสุขนอก, เขมนิจจารีย์ สาริพันธ์ และ กรองแก้ว มิฆเนตร

Pranitda Inchomrit*, Piyanuch Thongsuknok, Khemanitjaree Sariphan

and Krongkaew Mighanetara

สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

Environmental Management Program, Faculty of Science and Technology,

Thepsatri Rajabhat University, Lopburi Province

E-mail : pranitda.p@lawasri.tru.ac.th*, tongsuknong@gmail.com, khamanitjaree.s@lawasri.tru.ac.th and

krongkaew.m@lawasri.tru.ac.th

*Corresponding author

(Received: 15 March 2026, Revised: 30 September 2026, Accepted: 1 October 2026)

<https://doi.org/10.57260/stc.2026.1680>

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนของสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากกิจกรรมในชุมชนและอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาถ่านจากเปลือกทุเรียนเป็นวัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำทิ้ง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และประเมินผลของระยะเวลาสัมผัสและความเข้มข้นของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการดูดซับและความเข้มข้นของตัวดูดซับจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล นอกจากนี้ ถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaCl มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถ่านที่ไม่ปรับสภาพ โดยถ่านที่ผ่านการปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด 94.57 % ที่ความเข้มข้นตัวดูดซับ 3 % (w/v) และระยะเวลาในการดูดซับ 2 ชั่วโมง ดังนั้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของถ่านจากเปลือกทุเรียนในการเป็นวัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำทิ้ง การนำเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นวัสดุดูดซับสามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และมีส่วนช่วยส่งเสริมการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืนในระดับชุมชน

คำสำคัญ: ถ่านจากเปลือกทุเรียน วัสดุดูดซับ การกำจัดสีย้อมผ้า น้ำทิ้ง การปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์



Copyright © 2026 Science and Technology to Community
This is an open access article distributed under the terms of the CC BY 4.0 license

Abstract

The contamination of textile dyes in wastewater from community activities and the textile industries is a significant environmental problem. This study aimed to develop durian peel charcoal as an adsorbent for the removal of textile dyes from wastewater. The color removal efficiency of unmodified and sodium chloride (NaCl)-modified durian peel charcoal was compared, and the effects of contact time and adsorbent concentration on color removal efficiency were evaluated. The results indicated that color removal efficiency increased with increasing contact time and adsorbent concentration until adsorption equilibrium was reached. Moreover, NaCl-modified durian peel charcoal exhibited higher color removal efficiency than unmodified charcoal. The modified charcoal achieved the highest color removal efficiency of 94.57% at an adsorbent concentration of 3% (w/v) and a contact time of 2 h. These findings demonstrate the potential of durian peel charcoal as an adsorbent for the removal of textile dyes from wastewater. The utilization of durian peel waste as an adsorbent can add value to agricultural residues and contribute to sustainable resource management at the community level.

Keywords: Durian peel charcoal, Adsorbent, Textile dye removal, Wastewater, Sodium chloride modification

บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมสำคัญที่มีบทบาทต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย ทั้งในด้านการผลิต การส่งออก และการจ้างงาน อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอจำเป็นต้องใช้น้ำในปริมาณมาก โดยเฉพาะในขั้นตอนการฟอก การย้อม และการตกแต่งผ้า ส่งผลให้เกิดน้ำทิ้งที่มีสารเคมีและสีย้อมตกค้างจำนวนมาก หากน้ำเสียเหล่านี้ไม่ได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสม อาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนโดยรอบ (Forgacs et al., 2004; Tran, 2023) สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อนและมีความเสถียรสูง จึงยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ แม้ว่าสีย้อมหลายชนิดจะมีความเป็นพิษต่ำ แต่การมีสีย้อมอยู่ในน้ำแม้เพียงปริมาณเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำมีสีเข้มและลดการส่องผ่านของแสงในน้ำ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชน้ำและระบบนิเวศในแหล่งน้ำธรรมชาติ (Crini, 2006)

การบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งสามารถดำเนินการได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี การกรองด้วยเมมเบรน การออกซิเดชันขั้นสูง และการดูดซับ (Adsorption) โดยแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน (Zeitoun & Selem, 2023) อย่างไรก็ตาม วิธีการดูดซับได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีขั้นตอนการดำเนินงานไม่ซับซ้อน (Alawam et al., 2025)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นวัสดุดูดซับที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีโครงสร้างรูพรุนที่เอื้อต่อการดูดซับสารอินทรีย์และสีย้อม (Kuyucu et al., 2025) อย่างไรก็ตาม การใช้ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์อาจมีข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่าย จึงมีการศึกษาการพัฒนาวัสดุดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเพิ่มทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวมวล เช่น เปลือกผลไม้ แกลบ และชีวมวลชนิดต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ทดแทนถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากวัสดุชีวมวลเหล่านี้มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งสามารถนำมาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนและมีศักยภาพในการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Tsoutsas et al., 2024)

เปลือกทุเรียนเป็นหนึ่งในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณมากในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตทุเรียนที่สำคัญ โดยข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรระบุว่า ในปี พ.ศ. 2568 ประเทศไทยมีผลผลิตทุเรียนประมาณ 1.54 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 1.29 ล้านตันในปี พ.ศ. 2567 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2568) นอกจากนี้ เปลือกทุเรียนมีสัดส่วนประมาณ 65-70 % ของน้ำหนักผลทุเรียนทั้งหมด (Azfaralariff et al., 2025) ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากปริมาณผลผลิตทุเรียนในปี พ.ศ. 2568 สามารถประมาณได้ว่าอาจมีเปลือกทุเรียนเกิดขึ้นประมาณ 1.00-1.08 ล้านตันต่อปี หากเปลือกทุเรียนไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม อาจก่อให้เกิดปัญหาการสะสมของขยะอินทรีย์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การนำเปลือกทุเรียนมาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง ลดปริมาณขยะชีวมวล และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ทั้งนี้ มีการศึกษานำเปลือกทุเรียนมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์สำหรับการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ โดยพบว่าถ่านจากเปลือกทุเรียนมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ (Huong et al., 2025)

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การนำถ่านจากเปลือกทุเรียนมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมยังมีประเด็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติม โดยเฉพาะผลของการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารเคมีและปัจจัยของกระบวนการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม การปรับสภาพด้วย NaCl อาจเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นผิวของวัสดุและเพิ่มตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการยึดเกาะของสีย้อม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาถ่านจากเปลือกทุเรียนเป็นวัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำทิ้ง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaCl และศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสและความเข้มข้นของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี เป็นการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และช่วยลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้กรอบแนวคิดการพัฒนาจากเปลือกทุเรียนให้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้ง (ภาพที่ 1) โดยเริ่มจากการนำถ่านจากเปลือกทุเรียนมาปรับสภาพด้วย NaCl เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ จากนั้นศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวและความพรุนของวัสดุ และศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับและความเข้มข้นของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้ง โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนดและวิเคราะห์ผลที่ได้ เพื่อนำไปประเมินศักยภาพของถ่านจากเปลือกทุเรียนในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับต้นทุนต่ำสำหรับการบำบัดน้ำเสีย โดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

การเตรียมถ่านจากเปลือกทุเรียน

นำเปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองมาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นละออง และสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนบนพื้นผิว จากนั้นนำไปตากแดดจนแห้งสนิท เพื่อลดความชื้นเบื้องต้นและช่วยให้กระบวนการเผาเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อเปลือกทุเรียนแห้งแล้วนำมาใส่ภาชนะโลหะชนิดปิด และนำเข้าเตาเผาชุมชนแบบดั้งเดิม ทำการเผาโดยให้ความร้อนภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจน (Pyrolysis) เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบอินทรีย์ของเปลือกทุเรียนให้เป็นถ่านกัมมันต์ (ดัดแปลงจาก Huong et al., 2025)

หลังจากกระบวนการเผา นำถ่านที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นหลายครั้งจนกระทั่งค่า pH ของน้ำล้างมีค่าเท่ากับ 7 เพื่อกำจัดสารที่ละลายน้ำได้และเถ้าที่ตกค้างจากกระบวนการ Pyrolysis ทั้งนี้เพื่อให้วัสดุมีสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมและลดผลกระทบของสารตกค้างต่อกระบวนการดูดซับฟอสเฟต จากนั้นนำถ่านที่ผ่านการล้างไปอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่ตกค้างและทำให้ตัวดูดซับมีสภาวะความชื้นที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน (ดัดแปลงจาก Huong et al., 2025)

เมื่อถ่านแห้งสนิทแล้ว นำมาบดให้มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมขนาดอนุภาคของตัวดูดซับและเพิ่มความสม่ำเสมอของวัสดุในการทดลอง จากนั้นนำถ่านที่ผ่านการร่อนแล้วใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อป้องกันการดูดความชื้นจากอากาศกลับเข้าสู่วัสดุ และรักษาสภาพความชื้นของถ่านให้คงที่ก่อนนำไปชั่งและใช้ในการทดลองดูดซับฟอสเฟต

การปรับสภาพถ่านจากเปลือกทุเรียนด้วย NaCl

นำถ่านจากเปลือกทุเรียนไปปรับสภาพโดยการต้มในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 20 % (น้ำหนักต่อปริมาตร; w/v) ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านมาล้างน้ำกลั่นจนมีค่า pH เท่ากับ 7 (ดัดแปลงจาก โยธิน กัลยาเลิศ และคณะ, 2566) แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 มิลลิเมตร แล้วใส่ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่าน

นำถ่านจากเปลือกทุเรียนทั้งชนิดไม่ปรับสภาพและปรับสภาพด้วย NaCl มาศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างรูพรุนด้วย SEM

การเตรียมตัวอย่างน้ำ และการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม

เก็บตัวอย่างน้ำจากจุดรวบรวมน้ำทิ้งหลังสิ้นสุดกระบวนการย้อมผ้า (ก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม) จากโรงย้อมผ้าชุมชนท่าศาลา อ.เมือง จ.ลพบุรี โดยบรรจุในขวดพลาสติกที่สะอาด และปิดฝาสนิท แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C (จนกว่าจะนำมาใช้ทดลอง) จากนั้นปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7 เพื่อควบคุมสภาวะเริ่มต้นของตัวอย่างให้เป็นกลาง และลดผลกระทบของความแตกต่างด้าน pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ และนำตัวอย่างน้ำไปหาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ด้วย UV-visible spectrophotometer เพื่อนำไปใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน และศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับและความเข้มข้นของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้ง

การสร้างกราฟมาตรฐาน

ปิเปตตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้าที่กำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่แล้ว ปริมาตร 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตร จะได้ตัวอย่างน้ำที่มีความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 % ตามลำดับ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมด้วย UV-visible spectrophotometer และสร้างกราฟมาตรฐาน โดยกำหนดให้แกน x เป็นความเข้มข้น (%) และแกน y เป็นค่าการดูดกลืนแสง เพื่อหาสมการเส้นตรง ($y = ax+b$)

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ

ชั่งถ่านจากเปลือกทุเรียนชนิดไม่ปรับสภาพและปรับสภาพด้วย NaCl อย่างละ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้าปริมาตร 50 มิลลิลิตร จำนวน 36 ขวด จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง (เก็บตัวอย่างช่วงเวลาละ 3 ชั่วโมง) โดยมีชุดควบคุม (Blank control) ซึ่งเป็นตัวอย่างน้ำทิ้งที่ไม่มีการเติมตัวดูดซับเพื่อใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสีที่ไม่ได้เกิดจากกระบวนการดูดซับ แล้วแยกถ่านออกจากตัวอย่างน้ำด้วย Centrifuge ที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำตัวอย่างน้ำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมด้วย UV-visible spectrophotometer และคำนวณค่าความเข้มข้น (%) จากสมการเส้นตรง แล้วคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ จากสมการที่ (1)

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

เมื่อ " C_0 " คือ ความเข้มข้นของสีก่อนการดูดซับ (%)

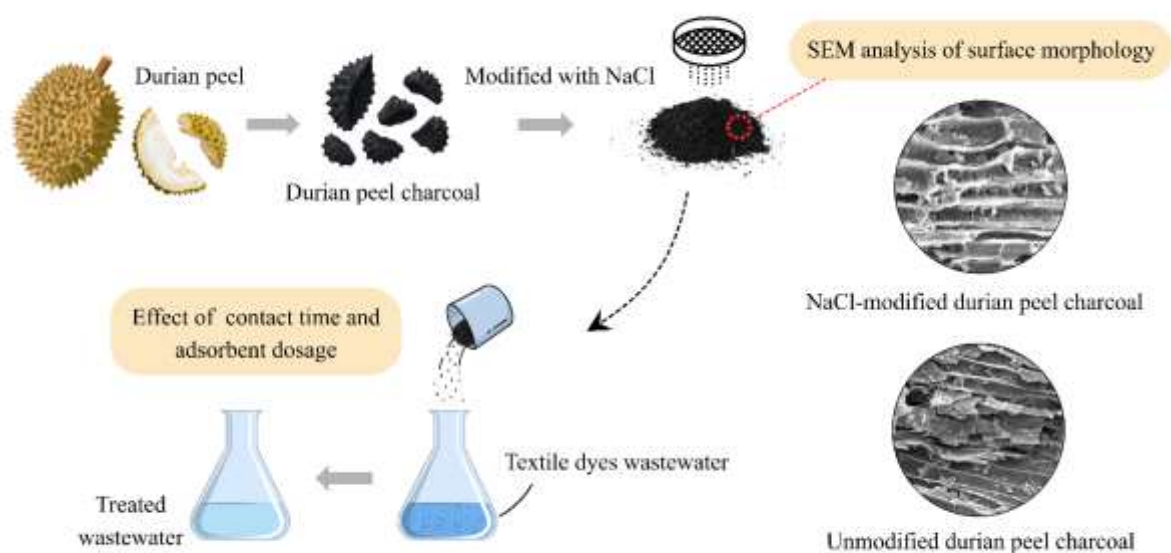
" C_e " คือ ความเข้มข้นของสีหลังการดูดซับ (%)

การศึกษาความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหมาะสม

ซังถ่านจากเปลือกทุเรียนชนิดไม่ปรับสภาพและปรับสภาพด้วย NaCl ในปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้าปริมาตร 50 มิลลิลิตร (ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นของถ่านต่อน้ำทิ้ง เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4% (w/v) ตามลำดับ) ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ โดยมีชุดควบคุมที่ไม่เติมตัวดูดซับร่วมในการทดลอง จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลาสมมูลจากการการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ แล้วแยกถ่านออกจากน้ำทิ้งด้วย Centrifuge ที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำตัวอย่างน้ำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมด้วย UV-visible spectrophotometer และคำนวณค่าความเข้มข้น (%) จากสมการเส้นตรง แล้วคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ จากสมการที่ (1)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองศึกษาระยะเวลาในการดูดซับและความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหมาะสม มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % โดยใช้โปรแกรม SPSS version 26



ภาพที่ 1 แผนภาพกรอบแนวคิดการพัฒนาถ่านจากเปลือกทุเรียนให้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้ง

ผลการวิจัย

ความยาวคลื่นที่เหมาะสม

จากการทดสอบค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้าด้วย UV-visible spectrophotometer โดยสแกนในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ พบว่าตัวอย่างน้ำมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ดังนั้นจึงเลือกใช้ความยาวคลื่นดังกล่าวเป็นค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสม สำหรับการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านจากเปลือกทุเรียน เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้น และประสิทธิภาพการกำจัดสีของตัวดูดซับ

กราฟมาตรฐาน

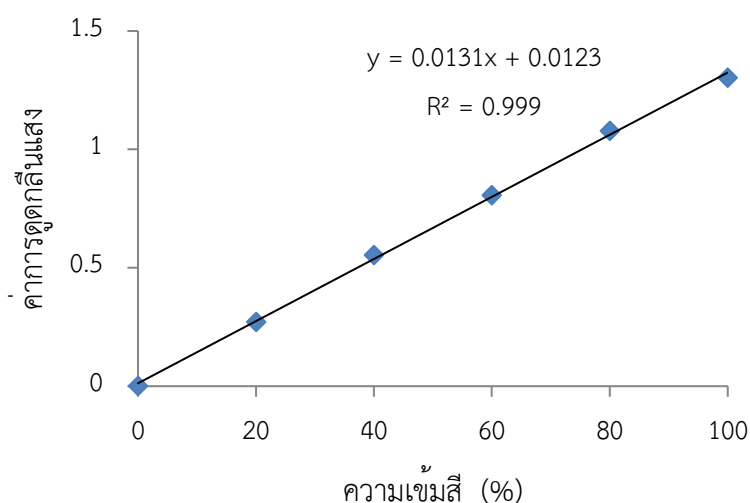
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้ากับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร พบว่าค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำทิ้งอย่างเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐานคือ

$$y = 0.0131x + 0.0123 \quad (2)$$

เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

x คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (%)

ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) เท่ากับ 0.999 แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้าในระดับสูงมาก จึงสามารถใช้สมการดังกล่าวในการคำนวณหาความเข้มข้นของสีก่อนและหลังการดูดซับด้วยถ่านจากเปลือกทุเรียนในการทดลองขั้นตอนต่อไปได้อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 2 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (%) และค่าการดูดกลืนแสง

ผลของระยะเวลาในการดูดซับ

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งโดยใช้ถ่านจากเปลือกทุเรียนชนิดไม่ปรับสภาพและชนิดปรับสภาพด้วย NaCl พบว่าระยะเวลาในการดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยถ่านจากเปลือกทุเรียนชนิดไม่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ที่เวลา 0.5 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการดูดซับ 57.57 % และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 85.67 % ที่เวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งแตกต่างจากช่วงเวลาอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ขณะที่ถ่านจากเปลือกทุเรียนชนิดปรับสภาพด้วย NaCl มีประสิทธิภาพการกำจัดสีในแต่ละช่วงเวลาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านจากเปลือกทุเรียนชนิดปรับสภาพด้วย NaCl ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถ่านชนิดไม่ปรับสภาพในทุกช่วงเวลา (ตารางที่ 1) โดยมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มต้นที่ 83.19 % ที่เวลา 0.5 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 89.88 % ที่เวลา 6 ชั่วโมง โดยพบว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นระหว่าง 0.5-2.5 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยถ่านชนิดไม่ปรับสภาพมีค่าประสิทธิภาพเพิ่มจาก 57.57 % เป็น 74.37 % ขณะที่ถ่านชนิดปรับสภาพมีค่าอยู่ในช่วง 81.90-86.56 %

เมื่อระยะเวลาในการดูดซับมากกว่า 3 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มชะลอตัว และมีแนวโน้มคงที่ โดยในช่วงเวลา 5-6 ชั่วโมง ถ่านชนิดปรับสภาพมีประสิทธิภาพการกำจัดสีอยู่ในช่วง 88.50-89.88 % ส่วนถ่านชนิดไม่ปรับสภาพมีค่าอยู่ในช่วง 83.51-85.67 % แสดงให้เห็นว่าระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

ตารางที่ 1 ผลของระยะเวลาต่อประสิทธิภาพการดูดซับโดยถ่านจากเปลือกทุเรียน

เวลา (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	
	ถ่านไม่ปรับสภาพ	ถ่านปรับสภาพ
0.5	57.57 ^d ± 1.35	83.19 ^a ± 7.14
1	57.00 ^d ± 1.25	81.90 ^a ± 5.33
1.5	62.46 ^d ± 1.59	82.40 ^a ± 1.33
2	64.60 ^{cd} ± 2.26	84.19 ^a ± 1.62
2.5	74.37 ^c ± 4.28	86.56 ^a ± 3.95
3	71.11 ^{cd} ± 3.57	85.01 ^a ± 2.21
3.5	73.25 ^c ± 4.02	87.20 ^a ± 0.45
4	74.89 ^c ± 0.70	86.57 ^a ± 3.61
4.5	76.61 ^{bc} ± 3.05	86.29 ^a ± 2.59
5	84.14 ^{ab} ± 4.51	88.50 ^a ± 2.87
5.5	83.51 ^{ab} ± 5.43	89.24 ^a ± 0.60
6	85.67 ^a ± 3.54	89.88 ^a ± 1.40

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตามการทดสอบ DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ $p < 0.01$

ผลของความเข้มข้นของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นถ่านจากเปลือกทุเรียนต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำทิ้ง พบว่า ความเข้มข้นของตัวดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยถ่านจากเปลือกทุเรียน ชนิดไม่ปรับสภาพที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของถ่านที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ที่ความเข้มข้น 1 % (w/v) มีประสิทธิภาพการดูดซับ 83.08 % และเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 92.25 % เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 4 % (w/v)

ขณะที่ถ่านจากเปลือกทุเรียนชนิดปรับสภาพด้วย NaCl ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีแนวโน้มการดูดซับ เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของถ่านเช่นเดียวกัน โดยที่ความเข้มข้น 1 และ 2 % (w/v) มีประสิทธิภาพการดูดซับ 83.43 และ 83.44 % ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็น 94.57 และ 93.03 % เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของถ่านเป็น 3 และ 4 % (w/v) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความเข้มข้นของถ่าน 1 และ 2 % (w/v) ให้ประสิทธิภาพการดูดซับแตกต่างจากความเข้มข้น 3 และ 4 % (w/v) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)

การเพิ่มความเข้มข้นของถ่านจาก 1 เป็น 4 % (w/v) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นทั้งใน ถ่านชนิดไม่ปรับสภาพและชนิดปรับสภาพ โดยที่ความเข้มข้น 1 และ 2 % (w/v) ให้ประสิทธิภาพการดูดซับ ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 83.08-83.44 % และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 3 % (w/v) ประสิทธิภาพการดูดซับ เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยถ่านชนิดไม่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพ 87.27 % ขณะที่ถ่านชนิดปรับสภาพมีค่าสูงสุด 94.57 % อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 4 % (w/v) ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มคงที่ โดยถ่าน ชนิดปรับสภาพมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้น 3 % (w/v) และผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าทั้งสองความเข้มข้นให้ประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

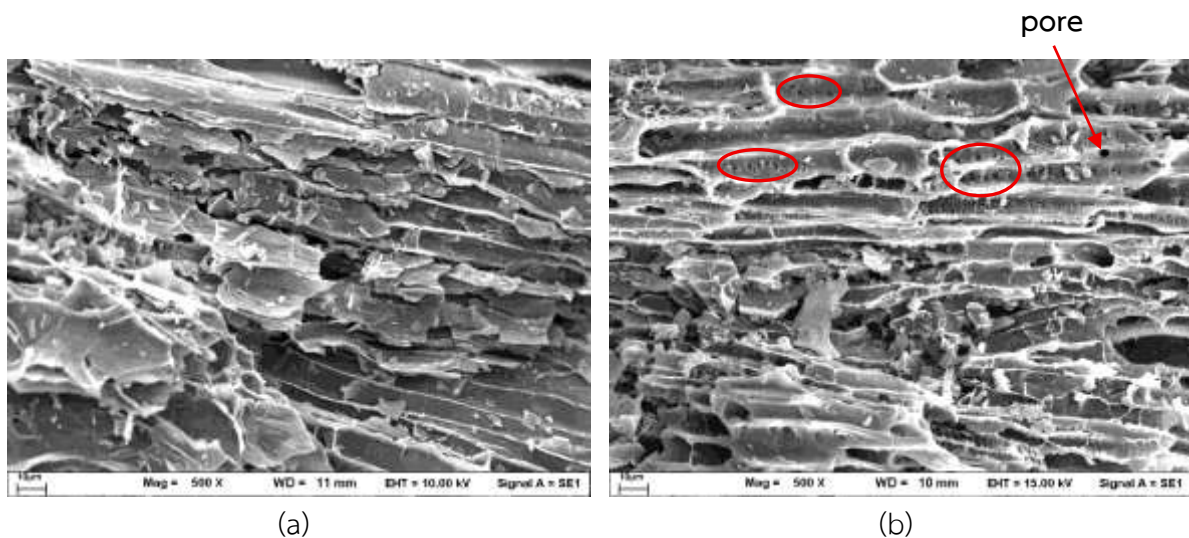
ตารางที่ 2 ผลของความเข้มข้นถ่านจากเปลือกทุเรียนต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

ความเข้มข้นของถ่าน (% w/v)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	
	ถ่านไม่ปรับสภาพ ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง	ถ่านปรับสภาพ ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง
1	83.08 ^a ± 5.50	83.43 ^b ± 2.78
2	83.42 ^a ± 3.43	83.44 ^b ± 2.19
3	87.27 ^a ± 3.51	94.57 ^a ± 0.75
4	92.25 ^a ± 0.51	93.03 ^a ± 0.78

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตามการทดสอบ DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ $p < 0.01$

ลักษณะพื้นผิวของถ่านจากเปลือกทุเรียน

จากผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านจากเปลือกทุเรียน พบว่าถ่านที่ไม่ถูกปรับสภาพ โครงสร้างพื้นผิวมีลักษณะเป็นชั้นๆ พื้นผิวก่อนข้างตันและเรียบกว่า โครงสร้างเกาะกันเป็นแผ่นหนา พื้นผิวเรียบและมีรอยแตกหักตามแนวยาว แต่ถ่านที่ปรับสภาพด้วย NaCl โครงสร้างเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด โดยเกิดรูพรุนขนาดเล็ก กระจายอยู่ทั่วไป พื้นผิวมีความขรุขระ และมีลักษณะยุ่ยหรือแตกแขนงมากขึ้น (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านจากเปลือกทุเรียน ที่กำลังขยาย 500 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM): (a) ถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaCl และ (b) ถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaCl

การอภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้ง โดยประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัส อย่างไรก็ตาม สำหรับถ่านที่ปรับสภาพด้วย NaCl ระยะเวลาในการดูดซับไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แม้ว่าค่าการกำจัดสีจะอยู่ในช่วง 81.90-89.88 % (ตารางที่ 1) ทั้งนี้ อาจเนื่องจากตำแหน่งดูดซับที่มีอยู่สามารถดูดซับสีได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่ระยะแรกของการทดลอง โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการดูดซับ การกำจัดสีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับยังมีตำแหน่งการดูดซับที่ว่างจำนวนมาก ทำให้โมเลกุลของสีสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้อย่างรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสีจะค่อย ๆ แพร่เข้าสู่โครงสร้างรูพรุนภายในของวัสดุ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Gupta & Suhas (2009) และ Crini (2006) ที่ระบุว่ากระบวนการดูดซับสีย้อมโดยวัสดุคาร์บอนหรือวัสดุชีวมวลมักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกก่อนที่จะค่อย ๆ เข้าสู่สภาวะสมดุล นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huong et al. (2025) ที่รายงานว่า การดูดซับสีย้อมโดยวัสดุชีวมวลมักมีอัตราการดูดซับสูงในช่วงแรกเนื่องจากมีตำแหน่งการดูดซับที่ว่างจำนวนมากบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

สำหรับผลของความเข้มข้นของตัวดูดซับ พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของถ่านจากเปลือกทุเรียนส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 2) เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวรวมและจำนวนตำแหน่งการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของสีสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวของวัสดุได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวดูดซับในระดับสูง ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคของตัวดูดซับหรือการทับซ้อนของตำแหน่งการดูดซับ ส่งผลให้พื้นที่ผิวที่สามารถใช้งานได้จริงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Uddin et al. (2017) รวมทั้งงานวิจัยที่ศึกษาการดูดซับสีย้อมโดยถ่านกัมมันต์จากชีวมวลผลไม้เขตร้อน ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของตัวดูดซับจนถึงจุดหนึ่งก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Farqi et al., 2023)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับ พบว่าถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaCl มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ตารางที่ 1 และ 2) ทั้งนี้จากกระบวนการปรับสภาพทางเคมีสามารถเพิ่มความพรุน (ภาพที่ 3) ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น (Lee et al., 2018) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Bharathi & Ramesh (2013) ที่รายงานว่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผ่านการปรับสภาพสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมจากน้ำเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yusop et al. (2021) ที่พบว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนมีโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง ส่งผลให้สามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้มีงานวิจัยที่รายงานว่า การปรับสภาพถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนสามารถเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น (Tran & Huong, 2021) ทั้งนี้ ผลการศึกษายังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดอื่นในการกำจัดสีย้อม โดยพบว่าถ่านกัมมันต์จากลำต้นกล้วยสามารถกำจัดสีย้อมเมทิลเรดจากสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากกระบวนการเตรียมถ่านช่วยเพิ่มโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวของวัสดุ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสารสีย้อมเพิ่มขึ้น (ธนกร คีเรียง และคณะ, 2568)

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านจากเปลือกทุเรียนด้วย SEM สนับสนุนผลการทดลองด้านประสิทธิภาพการดูดซับ โดยพบว่าถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaCl มีพื้นผิวหยาบและปรากฏโครงสร้างรูพรุนจำนวนมากกว่าถ่านที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ภาพที่ 3) ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากบทบาทของ NaCl ในกระบวนการสร้างโครงสร้างรูพรุน โดย NaCl สามารถแทรกตัวและกระจายอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุชีวมวลและทำหน้าที่เป็นสารช่วยสร้างโครงสร้างรูพรุนในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน เมื่อผ่านการล้าง NaCl ออกจากวัสดุ ผลึกของ NaCl ที่เคยแทรกอยู่ภายในโครงสร้างจะถูกกำจัดออก ส่งผลให้เกิดช่องว่างบริเวณเดิมและพัฒนาเป็นรูพรุนบนพื้นผิวและภายในโครงสร้างของถ่าน กระบวนการดังกล่าวสามารถทำให้โครงสร้างของวัสดุมีความพรุนเพิ่มขึ้นและมีลักษณะพื้นผิวแตกต่างจากถ่านที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Lee et al., 2018) โครงสร้างรูพรุนดังกล่าวช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและเอื้อต่อการแพร่ของโมเลกุลสีย้อมเข้าสู่ภายในโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสีย ทั้งนี้ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huong et al. (2025) ที่ระบุว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนมีโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงซึ่งเหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย

อุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งนั้นเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติด้านโครงสร้างรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวที่เอื้อต่อการดูดซับสีย้อม ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Tsoutsas et al. (2024) ที่ชี้ให้เห็นว่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับหรือสารช่วยตกตะกอนในการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับต้นทุนต่ำสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมผ้า อันจะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง ลดปริมาณของเสียในชุมชน และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนและนโยบาย BCG Economy ของประเทศที่มุ่งเน้นการพัฒนาสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืนของชุมชน

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ถ่านจากเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร สามารถพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งได้ โดยผลการวิจัยพบว่าถ่านชนิดไม่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการกำจัดสีแตกต่างกันตามระยะเวลาในการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ขณะที่ถ่านที่ปรับสภาพด้วย NaCl มีประสิทธิภาพการกำจัดสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างช่วงเวลาที่ศึกษา ($p > 0.05$) ซึ่งถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaCl มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถ่านที่ไม่ปรับสภาพ เนื่องจากการปรับสภาพช่วยเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวของวัสดุ ส่งผลให้มีตำแหน่งสำหรับการดูดซับมากขึ้น โดยถ่านที่ผ่านการปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด 94.57 % ที่ความเข้มข้นของตัวดูดซับ 3 % (w/v) และระยะเวลาในการดูดซับ 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของถ่านจากเปลือกทุเรียนในการบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมผ้า อีกทั้งยังเป็นแนวทางเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ลดปริมาณของเสีย และสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำเสียระดับชุมชนได้

อย่างไรก็ตาม การดูดซับเป็นกระบวนการถ่ายโอนสีย้อมจากน้ำไปสะสมบนตัวดูดซับ มิได้เป็นการทำลายสีย้อม ดังนั้น ตัวดูดซับที่อิ่มตัวควรได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม เช่น การฟื้นฟูและนำกลับมาใช้ซ้ำ หรือการกำจัดอย่างถูกวิธีเพื่อป้องกันการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม การศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษาลักษณะของน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัด ได้แก่ pH, EC, สี, TSS และ COD รวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น pH อุณหภูมิ และไอโซเทอมการดูดซับ ตลอดจนประสิทธิภาพการฟื้นฟู จำนวนรอบการนำกลับมาใช้ซ้ำ ความเสถียรของสีย้อมบนตัวดูดซับ และความเข้มข้นของ NaCl ที่เหมาะสม นอกจากนี้ ควรประเมินต้นทุนและความเป็นไปได้ในการขยายกระบวนการสู่การใช้งานจริง เพื่อสนับสนุนการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียระดับชุมชนอย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ธนกร คีรีียง, อาทิตย์ หุเต๋ม และ ปิยรัตน์ มุลศรี. (2568). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษลำต้นกล้วยงเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์*, 5(2). 1-12.
<https://so04.tci-thaijo.org/index.php/jstpcru/article/view/280101>
- โยธิน กัลยาเลิศ, วิชัย กองศรี, นพมาศ ประทุมสูตร และ ชุมพล บุชบก. (2566). โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบธาตุของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน. *วารสารฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป*, 7(2). 1-9.
<http://journalpags.skru.ac.th/ojs/index.php/jpags/article/view/83>
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2568). *สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2569: ทุเรียน*.
https://oae.go.th/uploads/files/2026/01/22/AD96BF9855DA.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Alawam, A. S., Mahgoub, S. M., Allam, A. A., Radalla, A. M., Shemy, M. H., & Mahmoud, R. (2025). Sustainable zeolite/activated carbon nanocomposite for dual-dye adsorption, kinetic and thermodynamic studies, and urea electro-oxidation applications. *RSC Advances*, 15(51), 43983-44006. <https://doi.org/10.1039/D5RA06559C>
- Azfaralariff, A., Ahmad, M. I., Che Zain, M. S., & Abdul Khalil, H. P. S. (2025). Transforming agricultural waste into sustainable bioadsorbents and advanced bioaerogels from durian (*Durio zibethinus*) peel. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 19(6), 1706-1727.
<https://doi.org/10.1002/bbb.2771>
- Bharathi, K. S., & Ramesh, S. T. (2013). Removal of dyes using agricultural waste as low-cost adsorbents: A review. *Applied Water Science*, 3, 773-790.
<https://doi.org/10.1007/s13201-013-0117-y>
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061-1085.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>
- Farqi, N. N. A. N. L. T., Abdulhameed, A. S., Surip, S. N., AlOthman, Z. A., & Jawad, A. H. (2023). Tropical fruit wastes including durian seeds and rambutan peels as a precursor for producing activated carbon using H₃PO₄-assisted microwave method: RSM-BBD optimization and mechanism for methylene blue dye adsorption. *International Journal of Phytoremediation*, 25(12), 1567-1578.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2175780>

- Forgacs, E., Cserhati, T., & Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: A review. *Environment International*, 30(7), 953-971.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.001>
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal-A review. *Journal of Environmental Management*, 90, 2313-2342.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- Huong, D. T., Ngan, N. N. P., Anh, D. T. T., Vinh, N. D., & Xuan, V. T. (2025). Durian peel-seed biochar for efficient methylene blue removal from water: Synthesis, characterization, and adsorption performance. *RSC Advances*, 15(40), 33726-33749.
<https://doi.org/10.1039/d5ra05313g>
- Kuyucu, A. E., Selcuk, A., Onal, Y., Alacabey, I., & Erol, K. (2025). Effective removal of dyes from aqueous systems by waste-derived carbon adsorbent: Physicochemical characterization and adsorption studies. *Scientific Reports*, 15, 28835.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-13685-x>
- Lee, Y. E., Jo, J. H., Kim, I. T., & Yoo, Y. S. (2018). Influence of NaCl concentration on food-waste biochar structure and templating effects. *Energies*, 11(9), 2341.
<https://doi.org/10.3390/en11092341>
- Tran, D. K., & Huong, D. T. G. (2021). Research on synthetic methods for activated carbon materials from durian peels to decolorize Reactive Blue 220 in textile dye wastewater. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 18(9), 1359-1367. <https://vjol.info.vn/index.php/sphcm/article/view/67481>
- Tran, H. N. (2023). Adsorption technology for water and wastewater treatments. *Water*, 15(15), 2857. <https://doi.org/10.3390/w15152857>
- Tsoutsas, E. K., Tolkou, A. K., Kyzas, G. Z., & Katsoyiannis, I. A. (2024). An update on agricultural wastes used as natural adsorbents or coagulants in single or combined systems for the removal of dyes from wastewater. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235, 178.
<https://doi.org/10.1007/s11270-024-06979-9>
- Uddin, M. T., Rahman, M. A., Rukanuzzaman, M., & Islam, M. A. (2017). A potential low cost adsorbent for the removal of cationic dyes from aqueous solutions. *Applied Water Science*, 7(6), 2831-2842. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0542-4>

- Yusop, M. F. M., Ahmad, M. A., Rosli, N. A., Gonawan, F. N., & Abdullah, S. J. (2021). Scavenging malachite green dye from aqueous solution using durian peel based activated carbon. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 17(1), 95-103. <https://scispace.com/pdf/scavenging-malachite-green-dye-from-aqueous-solution-using-1yfukkgpnd.pdf>
- Zeitoun, Z., & Selem, N. Y. (2023). A comprehensive review on textile wastewater treatment by coupling TiO_2 with PVDF membrane. *Bulletin of the National Research Centre*, 47, 153. <https://bnrc.springeropen.com/articles/10.1186/s42269-023-01131-9>