

การเพิ่มศักยภาพของถ่านกัมมันต์จากต้นกระถินยักษ์

ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน

เพื่อใช้ในการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสีย

ENHANCEMENT OF ACTIVATED CARBON FROM *LEUCAENA* BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION TECHNIQUE FOR DYE ADSORPTION IN WASTEWATER

สุชีวรรณ ยอยรูโรบ¹ บุญญา ชาญนอก² และพลากร บุญใส^{3*}

Sucheewan Yoyrurob¹, Boonya Charnnok² and Palakorn Boonsai^{3*}

บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตผ้าบาติกมักมีการสูญเสียของสีย้อมบางส่วน ส่งผลให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมถูกปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรชาร์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน (HTC) ที่อุณหภูมิ 200–260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30–120 นาที และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมจากน้ำเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์ ผลการศึกษาพบว่า การผลิตถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ให้ค่าดัชนีไอโอดีนสูงสุด ($1,383.6 \pm 25.9$ มิลลิกรัม/กรัม) และพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด (1,555.5 ตารางเมตร/กรัม) การวิเคราะห์ด้วย SEM และ BET แสดงให้เห็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเมื่อสารละลายสีย้อมมี pH 3 และที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นมากกว่า 300 มิลลิกรัม/ลิตร แนวโน้มการดูดซับสีเริ่มลดลง

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

¹Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University, Muang District, Songkhla Province 90000

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

²Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai District, Songkhla Province 90110

³คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210

³Faculty of Science and Digital Innovation, Thaksin University, Pa Phayom District, Phatthalung Province 93210

*corresponding author e-mail: bpalakorn@tsu.ac.th

Received: 24 June 2025; Revised: 17 September 2025; Accepted: 18 September 2025

DOI: <https://doi.org/10.14456/lsej.2025.17>

การดูดซับเข้าสู่สมดุลในเวลา 90 นาที กลไกการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม และไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ แสดงถึงการดูดซับทางกายภาพแบบชั้นเดียว โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 116.3 มิลลิกรัม/กรัม การใช้เทคนิค HTC ควรทำที่อุณหภูมิไม่เกิน 220 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 120 นาที เพื่อประโยชน์ด้านผลผลิตและเพื่อลดความเสียหายของโครงสร้างรูพรุน งานวิจัยนี้แสดงถึงแนวทางการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ไฮโดรชาร์ ถ่านกัมมันต์ ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน การดูดซับ

Abstract

Batik fabric production often results in the loss of dyes during the dyeing process, leading to the release of dye-contaminated wastewater into the environment, which affects the ecosystem. Activated carbon is recognized as a low-cost, environmentally friendly adsorbent with strong potential for wastewater treatment. This study aims to determine the optimal conditions for hydrochar production via hydrothermal carbonization (HTC) at temperatures ranging from 200 to 260°C and contact times of 30 to 120 min, and to investigate the optimal conditions for dye adsorption from wastewater using activated carbon derived from the hydrochar. The results indicated that the optimal condition was achieved at 220°C for 120 min, producing activated carbon with the highest iodine number ($1,383.6 \pm 25.9$ mg/g) and the largest specific surface area ($1,555.5$ m²/g). SEM and BET analyses confirmed a porous structure favorable for adsorption. Maximum dye adsorption occurred at pH 3, while dye concentrations above 300 mg/L resulted in a decreasing adsorption trend. Adsorption equilibrium was reached within 90 min. The adsorption process followed the pseudo-first-order kinetic model and Langmuir isotherm, indicating a physical monolayer adsorption mechanism, with a maximum adsorption capacity of 116.3 mg/g. HTC at temperatures not exceeding 220°C for 120 min is recommended to optimize yield and preserve pore structure. This study demonstrates a sustainable approach to adding value to local waste materials for effective environmental management.

Keywords: hydrochar, activated carbon, hydrothermal carbonization, adsorption

บทนำ

ผ้าบาติกเป็นที่ยินยอมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยเฉพาะภาคใต้ซึ่งมีการผลิตในระดับชุมชนและครัวเรือน กระบวนการย้อมผ้ามักทำให้เกิดน้ำเสียที่มีสีย้อมตกค้าง โดยเฉพาะจากขั้นตอนการล้างผ้าและการต้มลอกเทียน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำเสียหลักของกระบวนการผลิต (Noomuen, 2014) โดยอุตสาหกรรมผลิตผ้าทั่วไปมีสีย้อมประมาณร้อยละ 15 ที่สูญเสียไปในกระบวนการผลิต (Mani et al., 2019; Wielewski et al., 2020) น้ำเสียจากการย้อมผ้ามักไม่ผ่านการบำบัดอย่างเหมาะสม และมักถูกปล่อยลงบ่อซึมหรือแหล่งน้ำใกล้เคียงโดยตรง ส่งผลให้แหล่งน้ำปรากฏสีที่ผิดไปจากธรรมชาติ ลดการส่องผ่านของแสง และรบกวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำ (Kasikampaiboon, 2000) ดังนั้นการบำบัดสีในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกจึงมีความสำคัญและควรมีการศึกษาถึงแนวทางการบำบัดที่เหมาะสมและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันการบำบัดสีในน้ำเสียสามารถทำได้โดยวิธีการบำบัดทางเคมี เช่น กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes; AOPs) และการใช้ UV/H_2O_2 เป็นเทคนิคที่สามารถทำลายโครงสร้างของสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล ($\bullet OH$) ที่มีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูง (Katheresan et al., 2018) อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวมีต้นทุนสารเคมีสูง และอาจมีผลพลอยได้ที่เป็นพิษเกิดขึ้นได้หากไม่มีการควบคุมที่เหมาะสม การบำบัดทางชีวภาพโดยการใช้จุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย (*Pseudomonas*, *Bacillus*) และเชื้อราบางชนิด (*Aspergillus niger*) รวมถึงการใช้เอนไซม์ (เช่น laccase, peroxidase) เป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืน เนื่องจากสามารถย่อยสลายสีย้อมโดยตรงหรือลดทอนความเป็นพิษของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียได้ (Robinson et al., 2001; Forgacs et al., 2004) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มักใช้เวลานานและมีข้อจำกัดต่อชนิดของสีย้อมที่สามารถกำจัดได้ การดูดซับ (adsorption) เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความนิยมสูงสุด โดยเฉพาะการใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและสมบัติการดูดซับที่ดี สามารถผลิตได้โดยใช้ชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความยั่งยืน ซึ่งเป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสีในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตผ้าบาติกก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

ไฮโดรชาร์ (Hydrochar) เป็นถ่านที่มีปริมาณคาร์บอนและค่าความร้อนสูง ผลิตจากชีวมวลที่มีความชื้นสูงผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal Carbonization: HTC) ซึ่งเป็นกระบวนการแปรสภาพทางเคมี-ความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูงที่อุณหภูมิ 180–250 องศาเซลเซียส (Fakkaew et al., 2015) โดยไม่ต้องทำให้วัตถุดิบแห้งก่อน กระบวนการนี้สามารถใช้กับวัสดุหลากหลาย เช่น ขยะอินทรีย์หรือเศษวัสดุเกษตร และผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติดูดซับสูงต่อไป ซึ่งมีความแตกต่างจากชาร์ทั่วไปที่ต้องใช้ชีวมวลที่แห้งและใช้อุณหภูมิสูง 400–800 องศาเซลเซียส

กระถินยักษ์ (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) เป็นพืชต่างถิ่นรุกรานที่ส่งผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพและสิ่งแวดล้อม (Lorprakansit, 2022) จากข้อมูลโครงการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคมฐานรากหลังโควิดด้วยเศรษฐกิจ BCG (U2T for BCG) พ.ศ. 2565 ตำบลขุนตดห้วย จังหวัดสงขลา พบว่ากระถินยักษ์มีความชื้น คาร์บอนคงตัว และเถ้าร้อยละ 5.25 17.71 และ 2.47 ตามลำดับ ไนโตรเจน ร้อยละ 0.59 คาร์บอน ร้อยละ 45.89 และค่าความร้อนรวม 16.68 MJ/kg นอกจากนี้ยังพบว่ากระถินยักษ์เป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส ที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในสัดส่วนสูง คือ ร้อยละ 55.9 34.7 และ 18.6 ตามลำดับ (Nazri et al., 2009) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนสภาพไปเป็นคาร์บอน จึงทำให้กระถินยักษ์เป็นชีวมวลที่น่าสนใจสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์

ต้นกระถินยักษ์มีศักยภาพเป็นชีวมวลต้นทางสำหรับการผลิตไฮโดรชาร์และถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการดูดซับสีจากน้ำเสียที่เกิดจากการย้อมผ้าบาติกได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรชาร์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน รวมถึงการศึกษาสถานะการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไฮโดรชาร์ เพื่อเป็นแนวทางการจัดการสีในน้ำเสียจากการผลิตผ้าบาติกอย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ส่วนลำต้นของกระถินยักษ์ ผึ่งแดดประมาณ 48 ชั่วโมง และอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ นำมาบดและร่อนด้วยตะแกรงร่อน ยี่ห้อ Cisa โดยเลือกขนาดของต้นกระถินยักษ์ที่อยู่ในช่วง 2-4.75 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น เก็บในถุงพลาสติก ก่อนนำไปใช้ในงานวิจัย ทำการวิเคราะห์ ความชื้น สารระเหยได้ ปริมาณคาร์บอนคงตัว และเถ้า

การผลิตไฮโดรชาร์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

ทำการผลิตไฮโดรชาร์จากไม้กระถินยักษ์ 25 กรัม และน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 200 220 240 และ 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 และ 120 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์อุณหภูมิและความดันสูง ทำซ้ำอย่างน้อย 3 ซ้ำ/สถานะ หลังปฏิกิริยาแยกของเหลวและของแข็ง (Hydrochar) ด้วยกระดาดกรอง อบไฮโดรชาร์ที่ 60 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ และเก็บในถุงพลาสติก วิเคราะห์ความชื้น สารระเหยได้ คาร์บอนคงตัว และเถ้า

การผลิตถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์จากต้นกระถินยักษ์

นำไฮโดรชาร์ที่ได้มากระตุ่นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ร้อยละ 40 (Njewa et al., 2022) ในอัตราส่วนไฮโดรชาร์ต่อกรดฟอสฟอริก 1:3 (Zhao, 2023) โดยมวลต่อปริมาตร โดยแช่ไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกที่ 40 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที (Xing et al., 2019) กรองและอบแห้งที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปคาร์บอนไนเซชันที่ 600 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน (200 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาทีก) ล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เป็นกลาง และอบแห้งอีกครั้งก่อนร่อนผ่านตะแกรง 150 ไมครอน ถ่านกัมมันต์ที่ได้นำมาวิเคราะห์สมบัติ ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว เถ้า ค่าการดูดซับไอโอดีน พื้นที่ผิว (BET) ลักษณะรูพรุน (SEM) และหมู่ฟังก์ชัน (FTIR) โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุม คือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกระถินยักษ์ ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่ 600 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และคาร์บอนไนเซชันที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การศึกษาการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์

การศึกษาดิทธิพลของค่า pH ของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากสีรีแอคทีฟแบล็ค 5 (300 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร) ปรับค่า pH ของสารละลายสีย้อมในแต่ละหลอด เท่ากับ 3 5 7 และ 9 เติมถ่านกัมมันต์ 0.1 กรัม ใส่ในหลอดทดลองมีฝาปิด เขย่าที่อัตรา 200 รอบ/นาทีก เป็นเวลา 60 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C (เบอร์ 41) แล้วนำสารละลายส่วนที่ใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 598 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ PG รุ่น T80⁺

การศึกษาดิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ โดยใช้สารละลายสีย้อมความเข้มข้น 300 มิลลิกรัม/ลิตร (pH 7.0±0.2) เติมถ่านกัมมันต์ 0.1 กรัม ทำการทดลองเหมือนการทดลองส่วนแรก เก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมในแต่ละช่วงเวลา ได้แก่ 10 30 60 90 120 และ 150 นาที แล้วนำสารละลายส่วนที่ใสไปวัดค่าดูดกลืนแสง

การศึกษาดิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้น โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในช่วง 50-300 มิลลิกรัม/ลิตร (pH 7.0±0.2) เติมถ่านกัมมันต์ 0.1 กรัม ทำการทดลองเหมือนการทดลองส่วนแรก แล้วนำสารละลายส่วนที่ใสไปวัดค่าดูดกลืนแสง

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมบนถ่านกัมมันต์ โดยวิเคราะห์ความสอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์ 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) (Lagergren, 1898) และอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) (Ho & McKay, 1999) ซึ่งใช้คำนวณปริมาณการดูดซับและค่าที่สมดุล โดยอาศัยสมการเชิงเส้นตามสมการที่ (1) ถึง (3)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times \frac{V}{m} \quad (1)$$

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

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

โดย q_t คือ ปริมาณการดูดซับที่เวลา t (มิลลิกรัม/กรัม) q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม) C_0 คือ ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร) C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลา t (มิลลิกรัม/ลิตร) C_e คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร) V คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อม (ลิตร) m คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม) และ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที⁻¹)

สมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในรูปของสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (4)

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

โดย k_2 คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (กรัม/มิลลิกรัม.นาที)

การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ

เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับสีย้อมบนผิวของถ่านกัมมันต์ โดยวิเคราะห์ความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอม 2 แบบ ได้แก่ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ซึ่งอธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังสมการที่ (5) (Langmuir, 1918) และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) (Freundlich, 1906) ซึ่งอธิบายการดูดซับหลายชั้นบนพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังสมการที่ (6)

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

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

โดย q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม) q_m คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุดแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัม/กรัม) K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตร/มิลลิกรัม) C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่สมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร) K_F คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิช และ $1/n$ คือ ค่าที่บ่งบอกความเข้มข้นของการดูดซับ

ผลการวิจัย

สมบัติของไฮโดรซาร์และถ่านกัมมันต์

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการผลิตไฮโดรซาร์ ผลผลิตที่ได้มีแนวโน้มลดลง การผลิตไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 30 นาที ให้ผลผลิตสูงถึงร้อยละ 81.5±6.2 ในขณะที่การผลิตไฮโดรซาร์ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 120 นาที มีผลผลิตเพียงร้อยละ 49.9±2.5 ดังตารางที่ 1 (Table 1) การผลิตไฮโดรซาร์จากต้นกระถินยักษ์ที่อุณหภูมิไม่เกิน 220 องศาเซลเซียส ให้ผลผลิตของไฮโดรซาร์มากกว่าร้อยละ 70 ลักษณะของไฮโดรซาร์และถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 1 (Figure 1)

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันส่งผลให้สมบัติของไฮโดรชาร์จากต้นกระถินยักษ์มีสมบัติในด้านคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น ปริมาณเถ้าและสารระเหยลดลง ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 120 นาที ไฮโดรชาร์มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด (ร้อยละ 33.5 ± 1.9) ในขณะที่ปริมาณเถ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณเถ้าของไฮโดรชาร์ในแต่ละสภาวะมีปริมาณเถ้าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Table 1 Yield of hydrochar from *Leucaena* at different temperatures and contact time.

Temperature (°C)	Hydrochar yields (%)		
	30 min	60 min	120 min
200	81.5 ± 6.2	76.9 ± 4.9	77.5 ± 3.5
220	74.6 ± 5.0	72.9 ± 2.7	66.7 ± 3.7
240	72.9 ± 4.1	66.7 ± 4.4	61.1 ± 3.6
260	63.7 ± 2.5	57.5 ± 2.4	49.9 ± 2.5



(a) Hydrochar



(b) Activated carbon from hydrochar

Figure 1 Hydrochar and Activated carbon from hydrochar (220°C 120 min)

เมื่อนำไฮโดรชาร์จากต้นกระถินยักษ์มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติแตกต่างกัน โดยสมบัติที่เด่นชัดได้แก่ ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชุดควบคุม โดยมีปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 29.8 ± 0.9 ถึง 33.0 ± 1.0 ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ชุดควบคุมมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 20.7 ± 5.1 สำหรับการดูดซับไอโอดีน พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 120 นาที มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่สุด $1,383.6 \pm 25.9$ มิลลิกรัม/กรัม รองลงมา ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 120 นาที

(1,355.9±63.0 มิลลิกรัม/กรัม) นอกจากนี้จากผลการศึกษายังพบว่า เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซับไอโอดีนัมเบอร์มีแนวโน้มลดลง ดังตารางที่ 2 (Table 2)

Table 2 Iodine number of activated carbon from *Leucaena* hydrochar

Activated from hydrochar		Fixed carbon	ค่าการดูดซับไอโอดีน	BET surface area
Temp (°C)	Time (min)	(%)	(mg/g)	(m ² /g)
200	30	32.3±1.0 ^{bc}	1,326.9±62.3 ^{cd}	165.2
	60	37.1±7.7 ^c	1,264.2±126.7 ^{bcd}	517.9
	120	32.2±2.3 ^{bc}	1,355.9±63.0 ^{cd}	108.1
220	30	31.9±1.0 ^{bc}	1,308.2±58.5 ^{cd}	196.5
	60	31.8±6.4 ^{bc}	1,307.7±45.4 ^{cd}	574.4
	120	29.8±1.7 ^b	1,383.6±25.9 ^d	1,555.5
240	30	29.8±0.9 ^{bc}	1,079.1±37.3 ^{ab}	1,414.0
	60	30.4±3.5 ^{bc}	1,100.6±95.7 ^{ab}	1,138.1
	120	30.2±2.5 ^{bc}	1,107.4±99.0 ^{ab}	1,230.7
260	30	33.0±1.0 ^{bc}	1,054.0±78.1 ^a	430.2
	60	30.9±4.5 ^{bc}	1,187.0±139.7 ^{abc}	327.7
	120	32.3±1.3 ^{bc}	1,252.5±177.6 ^{bcd}	338.7
Control unit		20.7±5.1 ^a	1,101.6±164.9 ^{ab}	293.0

ถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์และชุดควบคุมมีค่าการดูดซับไอโอดีนเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 900-2547 (Thai Industrial Standards Institute, 2004) โดยถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 120 นาที มีค่าการดูดซับไอโอดีนัมเบอร์สูงที่สุด (1,383.6±25.9 มิลลิกรัม/กรัม) และมีพื้นที่ผิวสูงที่สุด (1,555.5 ตารางเมตร/กรัม) ซึ่งได้นำมาศึกษาการดูดซับสีย้อมต่อไป

ผลของค่า pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมต่อการดูดซับ

ในสภาวะที่เป็นกรดสูงถ่านกัมมันต์มีปริมาณการดูดซับสีสูงที่สุด โดยสารละลายสีย้อมที่มีค่า pH 3 ถ่านกัมมันต์มีปริมาณการดูดซับสีได้ 64.2±0.8 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งแตกต่างจากค่า pH อื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรด พื้นผิวของตัวดูดซับหรือถ่านกัมมันต์จะกลายเป็นประจุบวก จึงเกิดการยึดเหนี่ยวกันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ สารละลายสีย้อมเป็นประจุลบและมีปฏิกิริยาของไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ ที่ผ่านมามีรายงานเกี่ยวกับการกำจัดสารละลายสีย้อมด้วยตัวดูดซับเป็นจำนวนมาก โดยพบว่า ร้อยละ 70.46 มีการกำจัดสารละลายสีย้อมได้สูงสุดในสารละลายสีย้อมที่เป็นกรด เนื่องจากกลุ่มการทำงานของพื้นผิวตัวดูดซับมักกลายเป็นโปรตอนในสภาพที่เป็นกรด และด้วยเหตุนี้ประจุบวกจึงครอบคลุมพื้นผิว

ของตัวดูดซับ (Sarvestani & Doroudi, 2020) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่า pH ของสีย้อมสูงขึ้น ปริมาณการดูดซับสีย้อมมีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนชุดควบคุม ดังภาพที่ 2 (Figure 2)

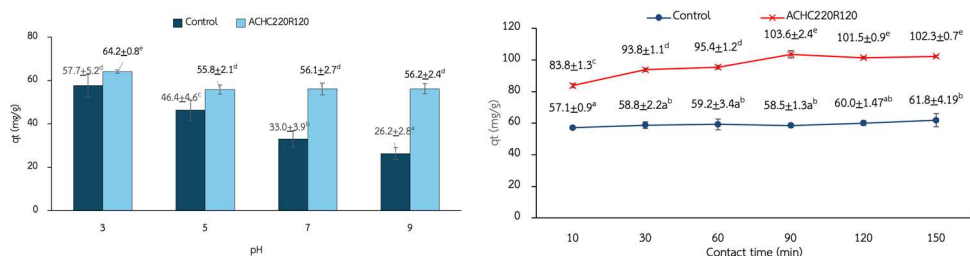


Figure 2 Effect of initial pH of the dye solution and contact times on dye adsorption capacity.

ผลของระยะเวลาสัมผัส

ถ่านกัมมันต์จากไฮโดรคาร์มีปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (10 นาที) หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 90 นาที (ปริมาณการดูดซับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ) โดยมีปริมาณการดูดซับสูงสุด 103.6 ± 2.4 มิลลิกรัม/กรัม เนื่องจากในช่วงแรกถ่านกัมมันต์ปราศจากโมเลกุลของสีย้อม ดังนั้นสีย้อมจึงเข้าไปเกาะกับตัวดูดซับได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 2 สีย้อมเกิดการแพร่กระจายเข้าสู่รูพรุนภายในถ่านกัมมันต์ จนกระทั่งในช่วงที่ 3 เกิดการอิ่มตัวของถ่านกัมมันต์ จึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมไม่สามารถเข้าไปในถ่านกัมมันต์ได้ (Bello et al., 2019) ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ชุดควบคุมมีปริมาณการดูดซับเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ดังภาพที่ 2 (Figure 2)

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

ถ่านกัมมันต์จากไฮโดรคาร์มีปริมาณการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น และการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีสูงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 250 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 300 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณการดูดซับสีย้อมอัตราการเพิ่มขึ้นลดลง และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากกว่า 300 มิลลิกรัม/ลิตร แนวโน้มการดูดซับสีย้อมคงที่ ดังภาพที่ 3 (Figure 3) ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ชุดควบคุมมีแนวโน้มการดูดซับสีย้อมคงที่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มจาก 150 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 200 มิลลิกรัม/ลิตร และมีปริมาณการดูดซับคงที่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากกว่า 250 มิลลิกรัม/ลิตร

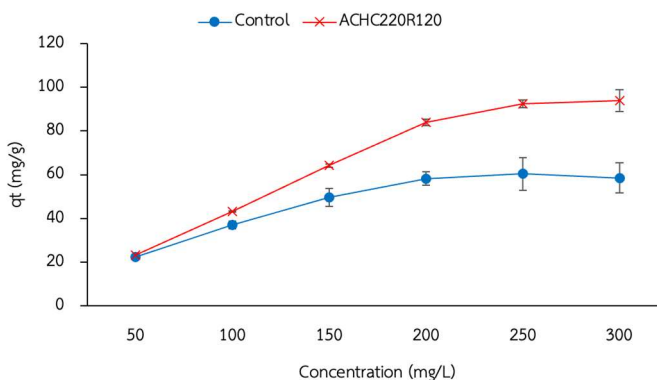


Figure 3 Effect of initial dye concentration on dye adsorption capacity.

จลนศาสตร์การดูดซับ

จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองจลนศาสตร์ทั้งสองแบบ พบว่า แบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมให้ค่าความสอดคล้องกับข้อมูล ($R^2 = 0.9673$) สูงกว่าแบบจำลองอันดับสองเทียม ดังภาพที่ 4 (Figure 4) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมขึ้นกับจำนวนตำแหน่งว่างบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นหลัก โดยกระบวนการดูดซับถูกควบคุมด้วยขั้นตอนการแพร่ของสีย้อมผ่านชั้นบาง ๆ รอบผิวถ่านกัมมันต์ (boundary layer) ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแรงดึงดูดทางกายภาพ มากกว่าการเกิดพันธะเคมีถาวรระหว่างตัวดูดซับกับสีย้อม

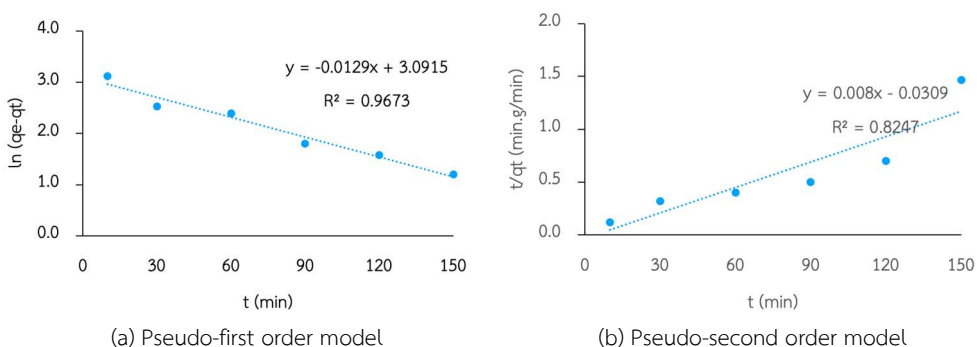


Figure 4 Adsorption kinetic models of activated carbon derived from hydrochar.

ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ในสภาวะอุณหภูมิคงที่ไอโซเทอมจะใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับรวมทั้งสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ จากภาพที่ 5 (Figure 5) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอมทั้งสองแบบ พบว่า ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่แน่นอนบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยทุกตำแหน่งมีพลังงานดูดซับเท่ากัน และการดูดซับมีเพียงหนึ่งชั้น (Monolayer sorption) ระหว่างการดูดซับจะไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน (Jaturapiree et al., 2021) โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 116.3 มิลลิกรัม/กรัม และค่า K_L เท่ากับ 0.1 ลิตร/มิลลิกรัม

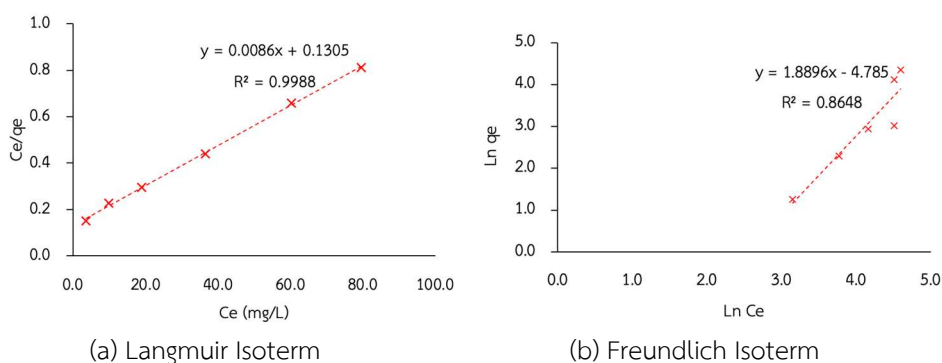


Figure 5 Adsorption isotherms of activated carbon derived from hydrochar.

การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏในตัวอย่าง จากภาพที่ 6 (Figure 6) ไฮโดรคาร์บอนจากต้นกระถินยักษ์พบหมู่ C-H (ช่วง 599.84 cm^{-1}) หมู่ C-O (ช่วง 1110.35 cm^{-1}) หมู่ C-N (ช่วง 1032.53 cm^{-1}) จำนวนมาก ซึ่งสะท้อนความเป็นชีวมวลที่ยังมีองค์ประกอบอินทรีย์อยู่ สำหรับถ่านกัมมันต์จากไฮโดรคาร์บอนพบว่าหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับออกซิเจน (C-O) ลดลง ส่วนหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ไม่พบชัดเจน ส่วนถ่านกัมมันต์ชุดควบคุมไม่พบหมู่ฟังก์ชันที่ชัดเจน ซึ่งเกิดจากในขั้นตอนการกระตุ้นทางเคมีและความร้อนร่วมกัน สารเคมีกระตุ้นที่เป็นกรดสามารถกำจัดอะตอมออกซิเจนออกจากโครงสร้างคาร์บอนได้ (Parshetti et al., 2015) นอกจากนี้ Gerçel et al. (2007) ยังพบการกระตุ้นด้วยกรดสามารถทำลายพันธะจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับสารประเภทอะลิฟาติกและอะโรมาติกในสารตั้งต้นลิกโนเซลลูโลส

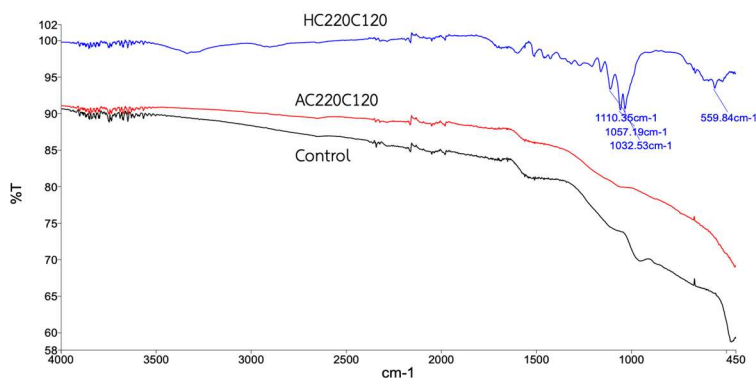


Figure 6 FT-IR spectra for hydrochar (HC220C120), activated carbon (AC220C120) and control.

จากภาพถ่าย SEM ดังภาพที่ 7 (Figure 7) ที่ขยาย 5000× (scale bar 30μm) พบว่าไฮโดรชาร์จากต้นกระถินยักษ์มีรูพรุนเสียรูปและบางส่วนถูกอุดตัน เนื่องจากองค์ประกอบอินทรีย์ยังสลายตัวไม่สมบูรณ์ หลังผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและคาร์บอนเฮกเซน รูพรุนมีความชัดเจนมากขึ้น จัดเรียงคล้ายรวงผึ้ง เนื่องจากเศษคาร์บอนถูกกำจัดออกพร้อมก๊าซ ทำให้ผิวเปิดโล่งและเพิ่มพื้นที่ดูดซับ ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการ HTC จะยังคงโครงสร้างรวงผึ้ง และการกระตุ้นด้วยกรด ทำให้ถ่านกัมมันต์เกิดโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อนขึ้น (Parshetti et al., 2015) ส่วนถ่านกัมมันต์ชุดควบคุมที่ผ่านการเผาและกระตุ้นเช่นกันก็แสดงโครงสร้างรูพรุนที่ค่อนข้างชัดเจน

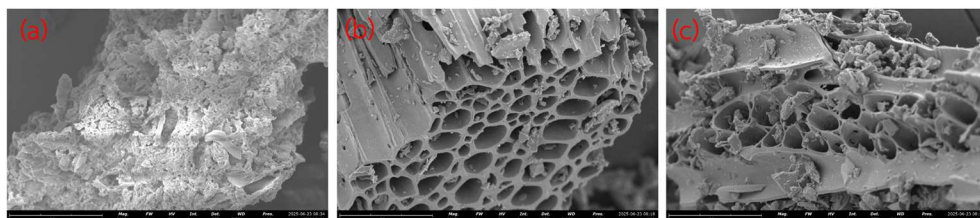


Figure 7 SEM images of (a) hydrochar (HC220C120), (b) activated carbon from hydrochar (AC220C120) and (c) control.

อภิปรายผล

ต้นกระถินยักษ์ถูกนำมาแปรรูปเป็นไฮโดรชาร์และถ่านกัมมันต์ผ่านกระบวนการทางเคมี พบว่าสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการกระตุ้นและเผาที่อุณหภูมิสูงช่วยกำจัดสารระเหยและองค์ประกอบที่ไม่ใช่คาร์บอนออกไป ขณะเดียวกันเกิดการควบแน่นของโครงสร้างอะโรมาติก ทำให้ได้โครงสร้างคาร์บอนที่เสถียรและมีความพรุนสูง ส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไฮโดรชาร์ดิบ (Libra et al., 2011) โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเฮกเซน

ที่อุณหภูมิสูงทำให้ผลผลิตลดลง อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ ไม่เกิน 220 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 120 นาที ไฮโดรชาร์ที่ได้ในขั้นตอนนี้ยังมีลักษณะรูพรุนไม่เด่นชัด อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและนำไปคาร์บอนเซชันเพื่อเป็นถ่านกัมมันต์ พบว่า ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างรูพรุนชัดเจน พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดถึง $1,383.6 \pm 25.9$ มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์เกรดการค้าโดยทั่วไปมีค่าการดูดซับไอโอดีนอยู่ในช่วง 600–1,200 มิลลิกรัม/กรัม ขึ้นกับวัตถุดิบและวิธีการกระตุ้น การดูดซับสีของถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์เป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first-order kinetics) และไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ซึ่งบ่งชี้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เป็นการดูดซับทางกายภาพ และจำกั้อยู่บนตำแหน่งจำเพาะของพื้นผิววัสดุในลักษณะชั้นเดียว ถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์มีหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับออกซิเจน (C-O) ลดลง ส่วนหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ไม่พบชัดเจน อาจเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีทำให้เกิดการทำลายหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (Wan Ibrahim et al., 2021) จึงไม่มีการดูดซับแบบเคมีปรากฏในการวิจัยนี้ถ่านกัมมันต์จากไฮโดรชาร์มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงสุดเท่ากับ 116.3 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งจัดอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลชนิดอื่นตามข้อมูลในตารางที่ 3 (Table 3)

Table 3 Comparative study of agricultural waste adsorbents in adsorption processes.

Adsorbent/Activated Carbon	Dyes/Elements/ Reactive Black 5	qm (mg/g)	Reference
Coffee waste	Reactive Black 5	77.5	Wakkel et al., 2019
Biochar from gasification residues	Reactive Black 5	35.7	Tran et al., 2022
Eggshell waste	Cadmium (Cd)	146.0	Tizo et al., 2018
Polyaniline nanofibers	Reactive Black 5	312.5	Bhaumik et al., 2016
Banana peel	Methylene blue	98.4	Kumar et al., 2021
Eggshell waste with Fe ₂ O ₃	Reactive Black 5	250.0	Al-mahmodi et al., 2025
Activated carbon from <i>LEUCAENA</i> hydrochar	Reactive Black 5	116.3	Present study

สรุปผลการวิจัย

ต้นกระถินยักษ์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันมีสมบัติดีขึ้นในด้านคาร์บอนคงตัว สารระเหย และปริมาณเถ้า โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ 220 องศาเซลเซียส ที่เวลา 120 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีโครงสร้างและพื้นผิวเหมาะสมต่อการดูดซับ (SEM และ BET) สามารถนำไปผลิตถ่านกัมมันต์และนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับสี โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีในสภาวะกรด (pH 3) และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 90 นาที การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพและเป็นการดูด

ซับแบบชั้นเดียว สอดคล้องกับแบบจำลอง pseudo-first-order kinetics และ Langmuir isotherm ถ่านกัมมันต์จากไฮโดรคาร์บอนจากต้นกระถินยักษ์จึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย เช่น วิสาหกิจชุมชนที่ผลิตผ้าบาติก และยังช่วยเพิ่มมูลค่าวัสดุท้องถิ่นตามแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืน อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษากฎการคายซับเพิ่มเติมเพื่อประเมินการนำกลับมาใช้ซ้ำและขยายการใช้งานในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี 2567 ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Al-mahmodi AF, Atta M R, Munsamy Y, Al-dhawi B N S. Adsorption of reactive black 5 dye using eggshell waste supported by Fe_2O_3 : An equilibrium isotherms study. *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis* 2025; 18: 100174. DOI: 10.1016/j.ctta.2025.100174.
- Bello OS, Adegoke KA, Fagbenro SO, Lameed OS. Functionalized coconut husks for rhodamine-B dye sequestration. *Water Research* 2019;35(17):4159-4165.
- Bhaumik M, McCrindle RI, Maity A, Agarwal S, Gupta V K. Polyaniline nanofibers as highly effective re-usable adsorbent for removal of reactive black 5 from aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science* 2016;466:442-451. DOI: 10.1016/j.jcis.2015.12.056.
- Fakkaew K, Koottatep T, Polprasert C. Effects of hydrolysis and carbonization reactions on hydrochar production. *Bioresource Technology* 2015;192:328-334. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.05.091.
- Forgacs E, Cserhádi T, Oros G. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International* 2004;30(7):953-971. Doi: 10.1016/j.envint.2004.02.001
- Freundlich HMF. Over the adsorption in solution. *The Journal of Physical Chemistry* 1906;57:385-471.
- Gerçel Ö, Özcan A, Özcan AS, Gerçel HF. Preparation of activated carbon from a renewable bio-plant of *Euphorbia rigida* by H_2SO_4 activation and its adsorption behavior in aqueous solutions. *Applied Surface Science* 2007;253:4843-4852.
- Ho YS, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry* 1999;34(5):451-465. Doi: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5.
- Jaturapiree A, Pathomnithipinyo T, Chaichana E, Saowapark T. The adsorption of methylene blue dye on activated carbon prepared from molasses by using chemical and microwave activation. *RMUTP Research Journal* 2021;15(1):167-178.
- Kasikampaiboon P. A study for optimum conditions of reactive dyes removal from batik dyeing wastewater by fenton's reagent. Master of Engineering (Environmental Engineering), Faculty of Engineering, Chiang Mai University; 2000.

- Katheresan V, Kansedo J, Lau SY. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2018;6(4):4676-4697. Doi: 10.1016/j.jece.2018.06.060
- Kumar U, Vibhute B, Parikh S. Experimental study of adsorption efficiency of methylene blue dye by using bananaleaf biochar as an adsorbent. *Journal of Physics: Conference Series* 2021; 012003.
- Lagergren S. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar* 1898;24(4):1-39.
- Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society* 1918;40:1361-1403. Doi:10.1021/ja02242a004.
- Libra JA, Ro KS, Kammann C, Funke A, Berge ND, Neubauer Y, Titirici MM, Fühner C, Bens O, Kern J, Emmerich KH. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications. *Biofuels* 2011;2(1):71-106. Doi: 10.4155/bfs.10.81.
- Lorprakansit P. Giant Leucaena: The Forest-Destroying Invader. Seub Nakhasathien Foundation. Available at: <https://www.seub.or.th/blogging/knowledge/leucaena-leucocephala/>. Accessed April 26, 2024.
- Mani S, Chowdhary P, Bharagava RN. Textile Wastewater Dyes: Toxicity profile and treatment approaches. In Bharagava R, Chowdhary P. (Eds) *Emerging and eco-friendly approaches for waste management*. Singapore: Springer Publication; 2019: DOI: 10.1007/978-981-10-8669-4_11.
- Nazri WM, Jamaludin K, Rudaini MN, Rahim S, Yuziah MN. Effects of chemical components on properties of oriented strand board from *Leucaena leucocephala* wood. *Journal of Tropical Forest Science* 2009; 21(4):353-360.
- Njewa E D, Mlay H A, Mrema JA. Effect of phosphoric acid concentration and impregnation ratio on the properties of activated carbon derived from rice husk and potato peel wastes. *Environmental Challenges* 2022;8:100541. Doi: 10.1016/j.envc.2022.100541.
- Noomuen P. Adsorption of color in wastewater from batik processes using ground brick. Master of Science in Technology and Environmental Management, Faculty of Technology and Environment, Prince of Songkla University; 2014.
- Parshetti GK, Chowdhury S, Balasubramanian R. Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review. *Chemical Engineering Journal* 2015;283:789-805.
- Robinson T, McMullan G, Marchant R, Nigam P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology* 2001; 77(3):247-255. Doi: 10.1016/S0960-8524(00)00080-8.
- Sarvestani MRJ, Doroudi Z. Removal of Reactive Black 5 from waste waters by adsorption: A Comprehensive Review. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology* 2020;5(2):180-190. DOI: 10.22090/jwent.2020.02.008.
- Thai Industrial Standards Institute. Thai industrial standard: TIS 900-2547 Activated Carbon. Ministry of Industry; 2004.

- Tizo MS, Blanco LAV, Cagas ACQ, Dela Cruz BRB, Encoy JC, Gunting JV, Arazo RO, Mabayo VIF. Efficiency of calcium carbonate from eggshells as an adsorbent for cadmium removal in aqueous solution. *Sustainable Environment Research* 2018;28(6):326-332. DOI: 10.1016/j.serj.2018.09.002.
- Tran HN, Trung NPT, Lima EC, Bollinger JC, Dat NDD, Chao HP, Juang RS. Revisiting the calculation of thermodynamic parameters of adsorption processes from the modified equilibrium constant of the Redlich-Peterson model. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 2022;98(2):462-472.
- Wakkel M, Khiari B, Zagrouba F. Textile wastewater treatment by agro-industrial waste: Equilibrium modelling, thermodynamics and mass transfer mechanisms of cationic dyes adsorption onto low-cost lignocellulosic adsorbent. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 2019;96:439-452.
- Wan Ibrahim WMH, Mohamad Amini MH, Sulaiman NS, Wan Abdul Kadir WR. Evaluation of alkaline-based activated carbon *Leucaena Leucocephala* produced at different activation temperatures for cadmium adsorption. *Applied Water Science* 2021;11(1):1-13. DOI: s13201-020-01330-z.
- Wielewski LP, Zuccolotto T, Soares M, Prola LDT, Liz MV de. Degradation of the Textile Dye Reactive Black 5 by Basidiomycetes. *Revista Ambiente & Água* 2020;15:e2464. DOI: 10.4136/ambi-agua. 2464.
- Xing X, Jiang W, Li S, Zhang X, Wang W. Preparation and analysis of straw activated carbon synergetic catalyzed by $\text{ZnCl}_2\text{-H}_3\text{PO}_4$ through hydrothermal carbonization combined with ultrasonic assisted immersion pyrolysis. *Waste Management* 2019;89:64-72. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.04.002.
- Zhao X, Guo Y, Chen F, Zhang H. Preparation of high surface area activated carbon from sunflower straw using H_3PO_4 activation: Effect of impregnation ratio. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2023;13: 4567-4579. Doi:10.1007/s13399-021-01838-1