

การดูดซับสีย้อมอย่างรวดเร็วโดยใช้ผงถ่านคาร์บอนที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้ง
ทางการเกษตรจากมะพร้าวในพื้นที่ตำบลบางตลาด จังหวัดฉะเชิงเทรา
Rapid Aqueous Dye Adsorption Using Carbon Powder Derived
from Agricultural Waste of Coconut in Bangtalad Sub-district,
Chachoengsao Province

พิไลพร หนูทองคำ และ ประสพพร จุลบุตร์*

Pilaipon Nuthongkum and Prasopporn Junlabhut*

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ จ.ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย
Department of applied physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University,
Chachoengsao, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 4 ธันวาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 21 สิงหาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 22 สิงหาคม 2567

Received: 4 December 2023, Revised: 21 August 2024, Accepted: 22 August 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ส่งผลต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับสีย้อมจากถ่านคาร์บอนที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งที่มีต้นทุนต่ำผ่านกระบวนการคาร์บอนในเขชันขั้นตอนเดียว เตรียมถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ โดยการเผาถ่านในเตาเผาแนวตั้งขนาด 200 ลิตร ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ โดยเปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ และศึกษาลักษณะทางโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ในขณะที่ตรวจสอบสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และเครื่องตรวจเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry: EDS) ผลการศึกษาพบว่าผงถ่านคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้งมีลักษณะทางโครงสร้างสอดคล้องกับลักษณะทางโครงสร้างของคาร์บอนที่มีการจัดเรียงอย่างไม่เป็นระเบียบ เช่นเดียวกันกับโครงสร้างของผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่าขนาดรัศมีรูพรุนเฉลี่ยมีค่า 23.45 ± 0.69 , 4.72 ± 0.17 , 4.22 ± 0.19 และ N/A ไมโครเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุพบว่าถ่านจากวัสดุทั้งสามตัวอย่าง มีคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก มีสารเจือปนเล็กน้อยเนื่องจากกระบวนการคาร์บอนในเขชันในปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 2.84 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ถ่านเป็นวัสดุดูดซับเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: pjunlabhut@gmail.com

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.261438>

เชิงพาณิชย์ในสภาวะปกติ พบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 15 นาที โดยผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูอย่างมีประสิทธิภาพร้อยละ 94.78 และ 97.38 ตามลำดับ เมื่อคำนวณร้อยละความแตกต่างของประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมต่างกัน 2.70 แสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกันมาก อัตราการลดลงของความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูต่อหน่วยเวลาในรูปแบบ pseudo-first-order reaction จากสมการของ Lagergren ก็มีค่าใกล้เคียงกัน 0.02968 min^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ 0.03775 min^{-1} อย่างไรก็ตามในด้านการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า เน้นการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมในชุมชน โดยเฉพาะในจังหวัดฉะเชิงเทรา อีกทั้งยกระดับวัสดุเหลือทิ้งที่ต้นทุนต่ำในชุมชนประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

คำสำคัญ : ตัวดูดซับ ผงถ่านคาร์บอน มะพร้าว วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร สีย้อมเมทิลีนบลู

Abstract

This research emphasizes the significance of dye contaminants in industrial textile wastewater and their potential impact on health and the environment. The study aims to investigate the efficiency of low-cost carbon adsorbents derived from coconut waste through a single-step carbonization process for removing dye from aqueous solutions. The preparation of carbon powder from agriculture coconut waste, including coconut husk, young coconut shell and mature coconut shell, involves carbonization in a vertical furnace with a capacity of 200 L at a temperature of 600°C for four hours. The characteristics of the carbon adsorbents derived from coconut waste were compared with commercially activated carbon powder. The crystalline structure was analyzed by X-ray Diffractometer (XRD), while the surface morphology and elemental composition were examined with a Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive Spectrometry (EDS). The results revealed that the carbon from coconut waste exhibited a carbon structure similar to commercial activated carbon. The surface morphology showed average surface pore size of 23.45 ± 0.69 , 4.72 ± 0.17 , 4.22 ± 0.19 , and N/A micrometers for coconut husk, young coconut shell, mature coconut shell and commercial activated carbon, respectively. Elemental analysis indicated that all the carbon materials mainly consisted of carbon and oxygen as the major components, with less than 2.84% impurities occurring in the carbonization process. The adsorption performance of methylene blue using carbon materials as adsorbents revealed that the suitable contact time was 15 minutes. The carbon waste from mature coconut shells and commercial activated carbon exhibited removal efficiencies of 94.78% and 97.38%, respectively. Despite a small difference in removal efficiency at 2.70%, indicating that the adsorption efficiency was similar to the commercial activated carbon.

The pseudo-first-order reaction kinetics based on Lagergren's equation exhibited a similar value of 0.02968 min^{-1} , comparable to the commercial activated carbon's value of 0.03775 min^{-1} . However, efficient resource utilization focuses on the environmental, particularly in Chachoengsao Province. Additionally, efforts are being made to use low-cost waste materials from the community to be used as adsorbents for dye removal in wastewater treatment.

Keywords: Adsorbent, Carbon powder, Coconut, Agriculture waste, Methylene blue dye

1. บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญต่อประเทศไทยเป็นอย่างมากและสีย้อมนับเป็นวัตถุดิบหลักที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เมทิลีนบลู (Methylene Blue) หรือเมทิลไทโอนีนีเยมคลอไรด์ (Methylthioninium Chloride) เป็นสีย้อมที่นิยมใช้ในกระบวนการฟอกย้อม หากมีการทิ้งน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัยใกล้แหล่งน้ำ อีกทั้งอนุภาคของสีย้อมบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านสู่ผิวน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสง ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง กระทั่งสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศทางน้ำอย่างมหาศาล [1]-[6] ในการกำกับดูแลเรื่องการปล่อยน้ำเสียปนเปื้อนจากอุตสาหกรรม ถูกควบคุมด้วยประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมและประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมในปีพ.ศ. 2559 และ พ.ศ. 2560 ตามลำดับ พบว่ามีการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม ให้ค่าสีมีค่าไม่เกิน 300 ADMI [6] กระบวนการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนจากกระบวนการฟอกย้อมสามารถทำได้หลากหลาย เช่น การบำบัดทางชีวภาพด้วยระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน การบำบัดทางเคมีด้วยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน หรือการใช้ไฟฟ้าเคมีเป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ถึงแม้ประสิทธิภาพสูงแต่ล้วนเป็นกระบวนการที่ต้องการแหล่งพลังงานทั้งสิ้น กระบวนการบำบัดทางกายภาพจากกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงในสภาวะปกติ กระบวนการไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำ [1],[6]

พื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทราแบ่งเป็นพื้นที่ปลูกมะพร้าว 20,678 ไร่ ซึ่งให้ผลผลิตเฉลี่ย 880 กก./ไร่ รวมผลผลิตต่อปีประมาณ 18,197 ตัน นำรายได้เข้าสู่จังหวัดสูงถึง 152 ล้านบาทในปีพ.ศ. 2559-2560 [7] มะพร้าวมีคุณค่าทางโภชนาการที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย และยังเป็นพืชเศรษฐกิจในจังหวัด แต่เนื่องด้วยราคาที่ผันผวน จึงมีการนำเอามะพร้าวมาทำการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า สิ่งที่มาคือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เปลือกมะพร้าว เส้นใยมะพร้าว ขุยมะพร้าว และกะลามะพร้าว เป็นต้น สวนมะพร้าวน้ำหอมโคโคควบอย ตำบลบางตลาด อำเภอคลองเขื่อน จังหวัดฉะเชิงเทรา ผลิตถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากสวนมะพร้าว ได้แก่ เปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ ด้วยเตาผลิตถ่านแบบถัง 200 ลิตร ชนิดแนวตั้ง โดยใช้ขุยมะพร้าว และทางมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง เพื่อลดขยะจากการเกษตร และยังได้ถ่านที่มีคุณภาพ นอกจากถ่านแล้วในกระบวนการเผายังทำให้ได้น้ำส้มควันไม้ เพื่อจัดจำหน่ายอีกด้วย เพื่อเพิ่มมูลค่าของวัสดุที่เหลือทิ้ง สวนมะพร้าว

น้ำหอมโคโคควบอย จึงทำความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ร่วมทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของถ่านคาร์บอนที่เผาได้จากวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าว เพื่อเปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่มีจำหน่ายทั่วไป โดยทำการศึกษากระบวนการดูดซับโดยใช้วัสดุดูดซับจากถ่านซึ่งโดยปกติกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำ ดูดติดบนผิวของวัสดุดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนพื้นผิวและภายในรูพรุน [6]

ในงานวิจัยจึงมุ่งเน้นเพิ่มมูลค่าของวัสดุที่เหลือทิ้ง ด้วยการเผาถ่านจากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวสามชนิด ได้แก่ เปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ ด้วยเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร ชนิดแนวตั้งที่อุณหภูมิคาร์บอนในเซชัน 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการศึกษาผลของเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม รวมทั้งทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยทำการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของผงถ่านคาร์บอน

การเตรียมผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากสวนมะพร้าวน้ำหอมโคโคควบอย ต.บางตลาด อ.คลองเขื่อน จ.ฉะเชิงเทรา ทำโดยการเผาด้วยเตาเผาผลิตถ่านแบบถัง 200 ลิตร ชนิดแนวตั้ง ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลผลิตเป็นถ่านคาร์บอนคุณภาพสูง ดังรูปที่ 1 โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกากมะพร้าวและทางมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 1. กระบวนการเตรียมถ่านที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้ง (ก) ถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ถ่านกะลามะพร้าวอ่อน และ (ค) ถ่านกะลามะพร้าวแก่



รูปที่ 2. ผงถ่านคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้ง (ก) ผงถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ผงถ่านกะลามะพร้าวอ่อน (ค) ผงถ่านกะลามะพร้าวแก่ และ (ง) ผงถ่านถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

จากนั้นนำถ่านคาร์บอนจากวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวและถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์บดละเอียดด้วยเครื่องปั่นอัตโนมัติกำลังไฟฟ้า 1,200 วัตต์ รุ่น BE-127A เพื่อลดขนาด และทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช เพื่อให้ได้ขนาดที่สม่ำเสมอดังรูปที่ 2 และทำการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องตรวจเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน

2.2 การดูดซับสีย้อมเมทิลินบลู

เตรียมเป็นสารละลายความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลาร์ จากสารตั้งต้นเมทิลินบลูที่มีมวลโมเลกุล 319.86 กรัมต่อโมล เพื่อทำการทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยใช้ผงถ่านคาร์บอนจากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวเป็นตัวดูดซับที่สภาวะปกติ เริ่มต้นจากการชั่งวัสดุตัวดูดซับปริมาณ 0.25 กรัม เติมนลงในสารละลายเมทิลินบลูปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 5–30 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา ทำการแยกวัสดุดูดซับด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 3,800 รอบต่อนาที และนำสารละลายเมทิลินบลูที่ผ่านการดูดซับไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลินบลูเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น ด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับกับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ด้วยค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป และศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรไมโครสโคป

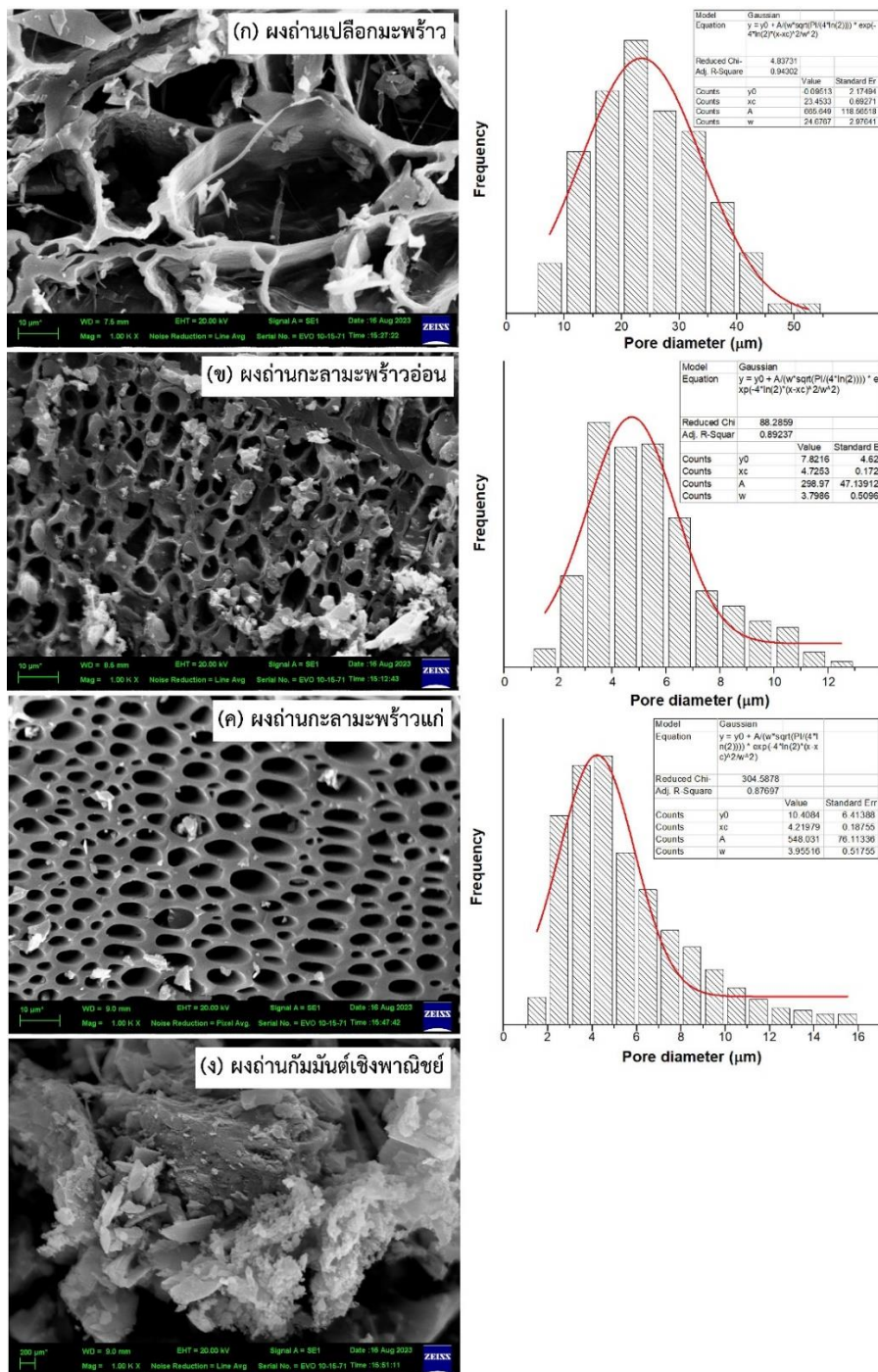
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ศึกษาสมบัติของถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ ที่ผ่านการลดขนาดด้วยเครื่องปั่นอัตโนมัติและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว มีพื้นผิวภายนอกไม่เรียบ มีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่และเล็กปะปนกัน แต่ขนาดของรูพรุนบริเวณพื้นผิวมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3 (ก) ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้น เกิดจากการระเหยของสารระเหยในวัสดุตั้งต้น ทำให้เกิดเป็นช่องว่างหรือโพรงและก่อตัวเป็นรูพรุนเนื่องจากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน [3]-[5] ผง

ถ่านคาร์บอนจากเปลือกกะลามะพร้าวอ่อนแสดงดังรูปที่ 3 (ข) พบว่าการกระจายตัวของรูพรุนสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว แต่ถ่านคาร์บอนที่ได้จากเปลือกกะลามะพร้าวแก่ จากรูปที่ 3 (ค) พบว่า ลักษณะพื้นผิวภายนอกเรียบ มองเห็นรูพรุนได้อย่างชัดเจน และมีการกระจายตัวของรูพรุนอย่างเป็นระเบียบ ขนาดของรูพรุนใกล้เคียงกัน สังเกตการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยขนาดรูพรุนบริเวณพื้นผิวของผงถ่านด้วยซอฟต์แวร์ Image J จากภาพ SEM ของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่า 23.45 ± 0.69 , 4.72 ± 0.17 , 4.22 ± 0.19 และ N/A ไมโครเมตร ตามลำดับ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ต่างกัน เกิดจากประเภทของวัสดุตั้งต้นที่ต่างกัน ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญต่อขนาดรูพรุนของถ่านและส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับ [8]

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องตรวจรังสีเอกซ์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDS) พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก ข้อมูลจากตารางที่ 1 พบว่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มีความบริสุทธิ์สูง และไม่พบสิ่งเจือปนอื่น ส่วนผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ที่เตรียมจากเตาเผาผลิตถ่านแบบถัง 200 ลิตร ชนิดแนวตั้ง ที่อุณหภูมิ 600°C พบธาตุคาร์บอนในปริมาณที่สูงเพิ่มขึ้น 83.03, 88.92 และ 89.78 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และปริมาณธาตุออกซิเจนร้อยละ 11.67, 8.29 และ 9.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติของถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันปริมาณของคาร์บอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตั้งต้น เนื่องจากกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำหน้าที่สลายสารระเหยที่คงอยู่ในวัสดุตั้งต้น [9]-[10] นอกจากนี้ผงถ่านที่ได้จากการเผาด้วยวัสดุเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวทั้งสามตัวอย่างยังแสดงสิ่งเจือปนเล็กน้อยของโพแทสเซียม และซิลิกอน ในปริมาณร้อยละ 2.84:2.47, 2.79:0 และ 1.02:0 ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันทำในพื้นที่ที่อับอากาศจึงพบปริมาณธาตุออกซิเจนต่ำ และเนื่องจากวัสดุตั้งต้นเป็นสารชีวมวล จึงอาจพบธาตุซิลิกอนเล็กน้อยในผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าวได้ การเจือปนแสดงถึงความบริสุทธิ์ของถ่านคาร์บอนที่ได้และผลการทดลองพบว่าถ่านคาร์บอนที่ได้จากวัสดุกะลามะพร้าวแก่มีความบริสุทธิ์ของถ่านมากที่สุด เมื่อเทียบกับถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว และกะลามะพร้าวอ่อน



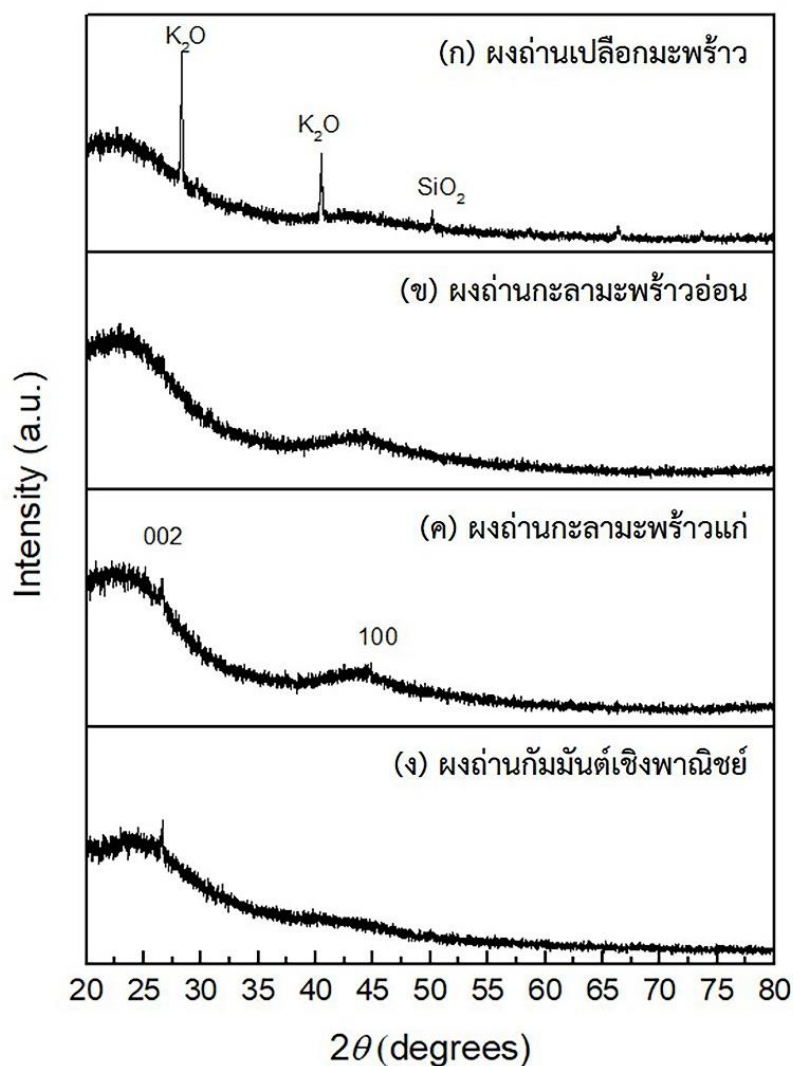
รูปที่ 3. ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงถ่านคาร์บอนจาก (ก) ผงถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ผงถ่านกละมะพร้าวอ่อน (ค) ผงถ่านกละมะพร้าวแก่ และ (ง) ผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

ตารางที่ 1. องค์ประกอบของธาตุของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

ตัวอย่าง	ผงถ่าน เปลือกมะพร้าว	ผงถ่าน กะลามะพร้าวอ่อน	ผงถ่าน กะลามะพร้าวแก่	ผงถ่าน กัมมันต์เชิงพาณิชย์
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)			
คาร์บอน	83.03	88.92	89.78	74.84
ออกซิเจน	11.67	8.29	9.20	25.16
โพแทสเซียม	2.84	2.79	1.02	-
ซิลิกอน	2.47	-	-	-
ทั้งหมด	100.00			

จากการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 20-80 องศา พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีลักษณะการเลี้ยวเบนของพีคกว้าง (Broad peak) ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน จากรูปที่ 4 (ก) พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว มีโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ที่มุม 28.8 และ 40.6 องศา ตรงกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 26-1327 สอดคล้องกับลักษณะพีคของโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และพบพีคที่มุม 50.2 องศา ตรงกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 82-0511 สอดคล้องกับลักษณะพีคของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างของสารประกอบโพแทสเซียมออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์เกิดระหว่างกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน [9]-[12] ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จาก EDS

จากรูปที่ 4 (ค) และ 4 (ง) ผงถ่านคาร์บอนกะลามะพร้าวแก่ และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนตรงกันที่มุม 26 องศา ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางโครงสร้างของแกรไฟต์ [6] ตรงกับกระบวนการเลี้ยวเบน (002) ไม่มีโครงสร้างอินทรีย์อื่นเจือปน ความร้อนเนื่องจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์ในวัสดุตั้งต้นถูกสลาย และบางส่วนเกิดปฏิกิริยารีดิวซ์ไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงและเกิดการซ้อนกันเป็นชั้นของระนาบระหว่างการทำให้เป็นคาร์บอน [6],[10]

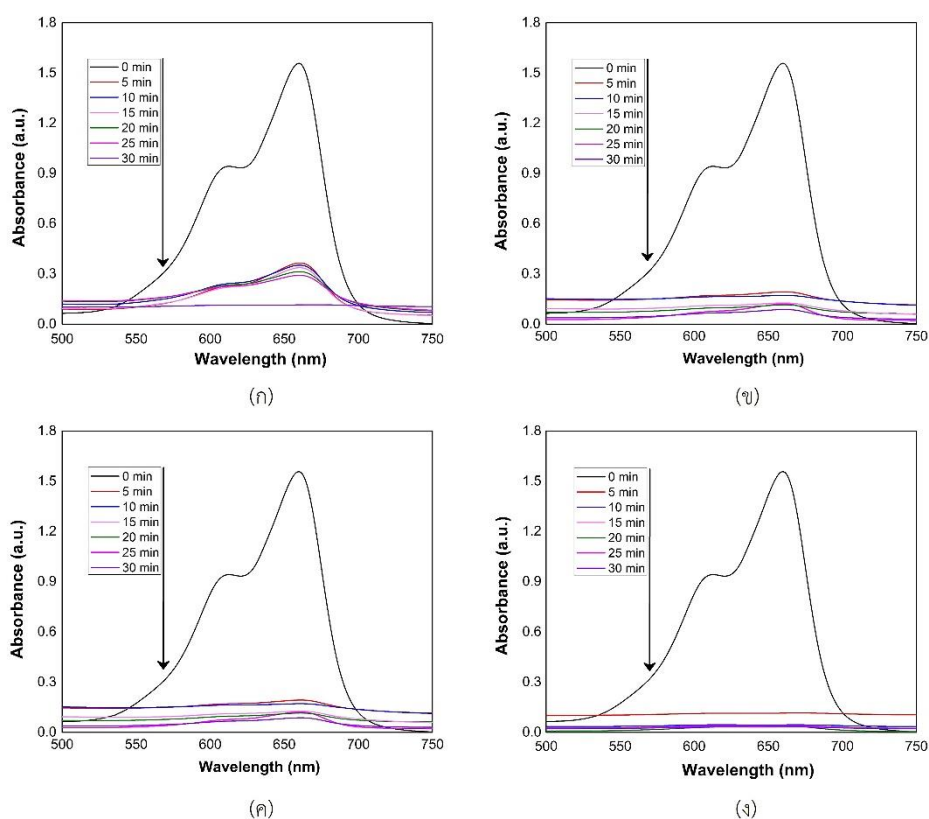


รูปที่ 4. ลักษณะโครงสร้างของผงถ่านคาร์บอนจาก (ก) ผงถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ผงถ่านกะลามะพร้าวอ่อน (ค) ผงถ่านกะลามะพร้าวแก่ และ (ง) ผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

3.2 ศึกษาผลการดูดซับสีย้อม

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมโดยใช้ผงถ่านคาร์บอนเป็นวัสดุดูดซับที่สภาวะปกติ เปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่าสเปกตรัมการดูดซับสีย้อมมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรแสดงดังรูปที่ 5 สเปกตรัมของสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาในการดูดซับ 5 นาที ส่งผลให้มีการถ่ายโอนโมเลกุลของสีย้อมจากสารละลายไปยังวัสดุดูดซับได้เร็วในช่วงแรก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งเมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของสีย้อม จะเกิดการแพร่กระจายของสีย้อมเข้าสู่โครงสร้างรู

พรุณภายในวัสดุดูดซับ ทำให้มีอัตราการดูดซับช้าลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อัตราการดูดซับของตัวดูดซับจะมีความจุจำกัด ส่งผลให้เกิดการเข้าสู่สภาวะสมดุล สังเกตได้จากอัตราการดูดซับจะค่อนข้างคงที่ [6],[8],[13] จากการทดลองพบว่าเวลาของสภาวะสมดุลของผงถ่านเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที โดยเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับ ณ จุดสมดุลของผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน กะลามะพร้าวแก่ และผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีค่าร้อยละ 90.51, 77.43, 94.78 และ 97.38 ตามลำดับ



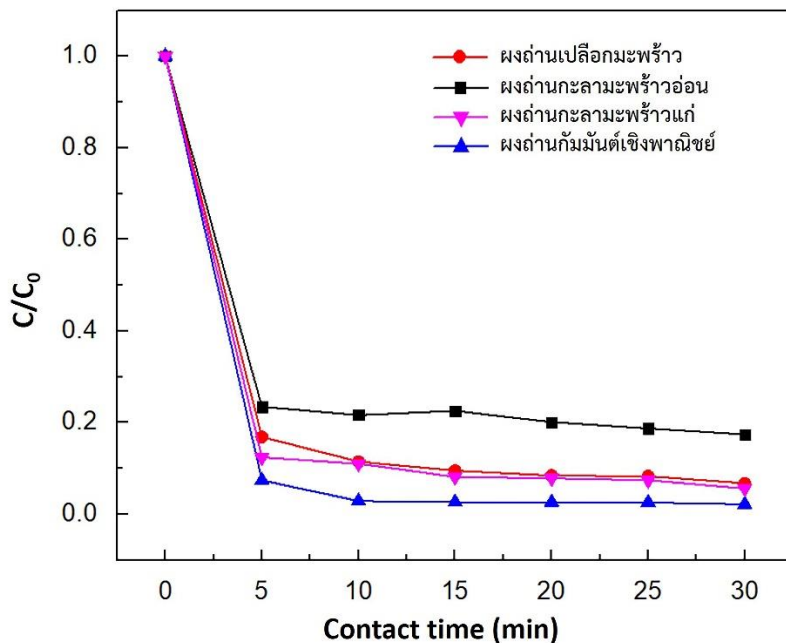
รูปที่ 5. สเปกตรัมการดูดซับสีของ (ก) ผงถ่านเปลือกมะพร้าว (ข) ผงถ่านกะลามะพร้าวอ่อน (ค) ผงถ่านกะลามะพร้าวแก่ และ (ง) ผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ แต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

จากผลการศึกษาพบว่า ผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าวมีขนาดรัศมีเฉลี่ยของรูพรุนบริเวณพื้นผิวสูงกว่าผงถ่านคาร์บอนชนิดอื่นจึงดูดซับสีได้ดีในช่วงต้น ในขณะที่ผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนบนพื้นผิวสม่ำเสมอ มีองค์ประกอบของธาตุอื่นเจือปนน้อย และมีลักษณะทางโครงสร้างของคาร์บอนใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ จึงส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดสีได้ดี เมื่อเทียบกับผงถ่านคาร์บอนจากเปลือกมะพร้าว และกะลามะพร้าวอ่อน เมื่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 20-30 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย

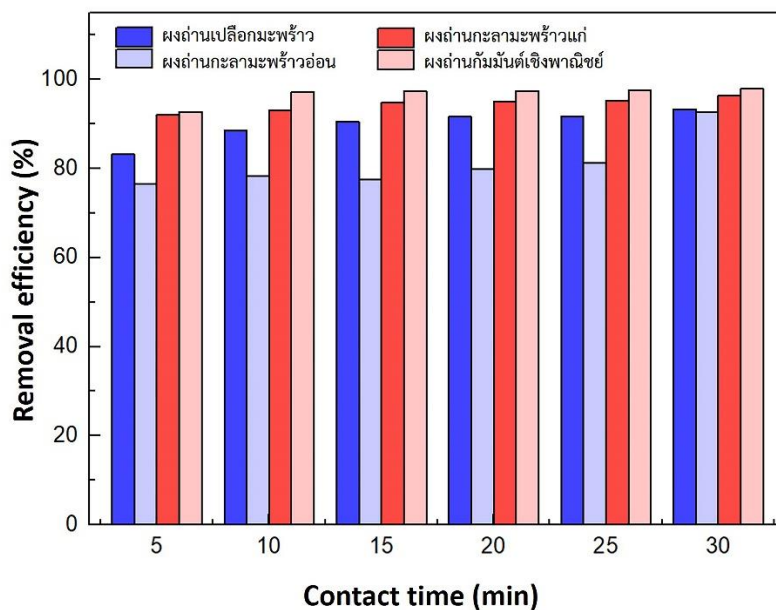
ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของผงถ่านคาร์บอนแสดงได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 6 (ก) ผลการคำนวณอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสีที่ย้อมที่เมื่อเวลาในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น C/C_0 พบว่าค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูผ่านสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในย่านที่ตามองเห็น ($\lambda = 665 \text{ nm}$) ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับที่ได้จากผงถ่านจากวัสดุเหลือทิ้งจากมะพร้าวมีความสามารถในการดูดซับสีของเมทิลีนบลู เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบร้อยละของประสิทธิภาพการดูดซับสีของผงถ่านคาร์บอนในการเปลี่ยนแปลงเวลา แสดงในรูปที่ 6 (ข) จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ และผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มีความสามารถในการดูดซับสีของเมทิลีนบลูใกล้เคียงกันมาก

แม้ว่าผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ที่เตรียมได้อาจจะไม่ได้ยืนยันความเป็นถ่านกัมมันต์ แต่ประสิทธิภาพของการกำจัดสีของผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เมื่อคำนวณเปรียบเทียบร้อยละความแตกต่างของประสิทธิภาพการดูดซับสีของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ กับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ พบว่ามีค่าร้อยละของความแตกต่าง 2.70 จากการทดลองสรุปได้ว่า ตัวดูดซับจากผงถ่านคาร์บอนด้วยกระบวนการเผาวัสดุเหลือทิ้งจากมะพร้าวที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูใกล้เคียงกับวัสดุดูดซับจากผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ก่อนและหลังการดูดซับสีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared spectrometer: FTIR) ที่ช่วงเลขคลื่น 4,000-500 ต่อเซนติเมตร พบว่าผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวก่อนการดูดซับสีปรากฏการณีสันที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3779 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอกซิล ฟีนอล และแอลกอฮอล์บนพื้นผิวของผงถ่านคาร์บอน [8],[14]-[16] ปรากฏการณีสันที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1720-1664 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ในหมู่คาร์บอกซิลิก [15] ปรากฏการณีสันที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1583 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}=\text{C}$ ในวงแหวนอะโรมาติก [17] ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เหล่านี้รวมถึงหมู่คาร์บอกซิลิก และหมู่ไฮดรอกซิลมีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของผงถ่านคาร์บอน จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเส้นสเปกตรัมของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ก่อน และหลังการดูดซับสีมีลักษณะทางเคมีคล้ายกัน แต่ตำแหน่งเลขคลื่นของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่หลังการดูดซับสีเลื่อนออกจากตำแหน่งเดิม (Shifted) โดยตำแหน่งเลขคลื่น 3779 ต่อเซนติเมตร เคลื่อนไปที่ตำแหน่งเลขคลื่นลดลงที่ 3777 ต่อเซนติเมตร และตำแหน่งเลขคลื่น 1720-1664 และ 1583 ต่อเซนติเมตร เคลื่อนไปที่ตำแหน่งเลขคลื่นเพิ่มขึ้นที่ 1724-1670 และ 1591 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ การเคลื่อนของตำแหน่งเลขคลื่นเกิดเนื่องจากการดูดซับโมเลกุลของสีที่ย้อมบนพื้นผิวของผงถ่านคาร์บอนสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jawad และคณะ [16],[18]

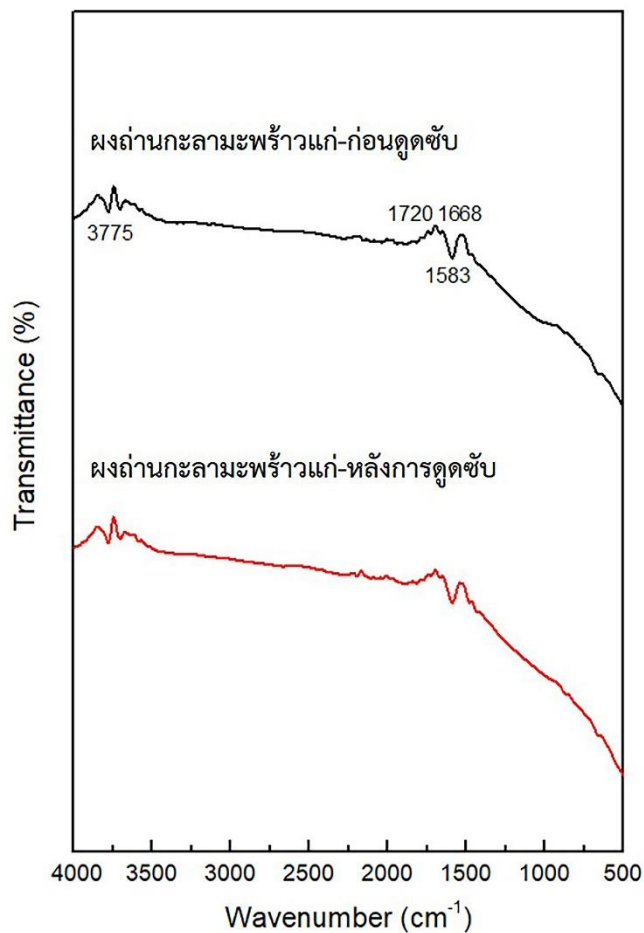


(ก)



(ข)

รูปที่ 6. ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของผงถ่านคาร์บอน (ก) อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสีที่ยอมที่เมื่อเวลาในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น และ (ข) ร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับสีต่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับ 0-30 นาที



รูปที่ 7. รูปแบบหมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีของผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่เปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ในรูปแบบ pseudo-first-order reaction ด้วยสมการของ Lagergren ดังแสดงในสมการที่ (1) [19]-[21]

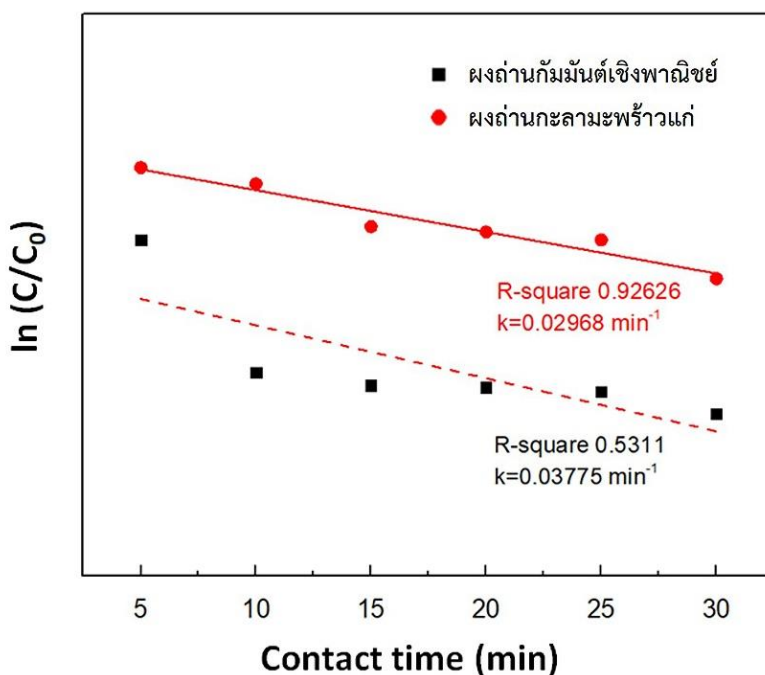
$$\ln(C_t / C_0) = -kt \quad (1)$$

โดยที่ k คือ อัตราการลดลงของสีย้อมต่อหน่วยเวลา (Rate constant) ในรูปแบบ pseudo-first-order

C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูในเวลา t

C_0 คือ ความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น

t คือ เวลา



รูปที่ 8. ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C/C_0)$ กับเวลาในการดูดซับตั้งแต่ 0-30 นาที

จากการคำนวณค่าความชันจากสมการเส้นตรง (k) โดยการทำ Linear fit แสดงในรูปที่ 8 พบว่าค่า k ระหว่างตัวดูดซับจากผงถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ กับผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีค่า 0.02968 min^{-1} และ 0.03775 min^{-1} ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงอัตราการลดลงของความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูต่อหน่วยเวลาที่ใกล้เคียงกัน แสดงถึงประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ดี แม้ผงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีย้อมในสภาวะปกติได้ประสิทธิภาพดีกว่าผงถ่านจากกะลามะพร้าวแก่ เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนแบบเมโซพอร์ของถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณมากส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูที่ดี และรวดเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในด้านของการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า งานวิจัยนี้นับเป็นการกำจัดกะลามะพร้าวเหลือทิ้งในชุมชน อีกทั้งยกระดับวัสดุเหลือทิ้งที่ต้นทุนต่ำในชุมชนจังหวัดฉะเชิงเทราประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากนี้ยังสามารถต่อยอดและพัฒนาการเผากะลามะพร้าวแก่ให้เป็นถ่านกัมมันต์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารปนเปื้อนอื่น นอกจากสีย้อม ตัวอย่างเช่นโลหะหนัก [22] และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [23] เป็นต้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติของผงถ่านคาร์บอนที่ผลิตจากเปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าวอ่อน และกะลามะพร้าวแก่ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ในเตาเผาผลิตถ่านแบบถังขนาด 200 ลิตร ชนิดแนวตั้ง ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่มีลักษณะทาง

พื้นผิวภายนอกเรียบ สังเกตรูพรุนเชิงพื้นผิวได้อย่างชัดเจน และมีการกระจายตัวของรูพรุนเชิงพื้นผิวสม่ำเสมอขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 4.22 ± 0.19 ไมโครเมตร มีสารเจือปนน้อยเมื่อเทียบกับผงถ่านจากเปลือก และกะลามะพร้าวอ่อน และมีลักษณะโครงสร้างคาร์บอนเช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ เหมาะที่จะนำมาทดสอบเป็นตัวดูดซับสี้อมที่ปนเปื้อนในน้ำได้ ผลการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสี้อมเมทิลีนบลูในสภาวะปกติ พบว่าถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่มีประสิทธิภาพการดูดซับสี้อมใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ มีร้อยละความแตกต่างของการประสิทธิภาพการดูดซับสี้อมเพียง 2.70 ที่เวลาในการดูดซับ 15 นาที อัตราการลดลงของความเข้มข้นของสี้อมเมทิลีนบลูต่อหน่วยเวลามีค่าใกล้เคียงกัน 0.02968 min^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ 0.03775 min^{-1}

จากการศึกษาพบว่าถ่านคาร์บอนจากกะลามะพร้าวแก่ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเพียงขั้นตอนเดียวสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสี้อมเมทิลีนบลูได้เทียบเท่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ อีกทั้งกระดับวัสดุเหลือทิ้งที่ต้นทุนต่ำในชุมชนจังหวัดฉะเชิงเทราประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากทุนวิจัยขับเคลื่อนงานวิจัยเชิงพื้นที่ (FRMU) : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปีงบประมาณ 2565 มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ (บางคล้า) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่อำนวยความสะดวกเครื่องมือในการทำวิจัย และที่สำคัญขอขอบคุณ คุณยอดหญิง พรชัยสิทธิ์ สวนมะพร้าวน้ำหอม โคโค่ควบอย ต.บางตลาด อ.คลองเขื่อน จ.ฉะเชิงเทรา สำหรับความร่วมมือและการอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่สนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Yang, J. and Qiu, K. 2010. Preparation of activated carbons from walnut shells via vacuum chemical activation and their application for methylene blue removal. *Chemical Engineering Journal*, 165(1), 209-217, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.019>.
- [2] Bergna, D., Varila, T., Romar, H. and Lassi, U. 2018. Comparison of the properties of activated carbons produced in one-stage and two-stage processes. *Journal of carbon research*, 4(3), 1-10, <https://doi.org/10.3390/c4030041>.
- [3] De Souza, C.C. et al. 2022. Activated carbon of Coriandrum sativum for adsorption of methylene blue: Equilibrium and kinetic modeling. *Cleaner Materials*, 3, 100052, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100052>.
- [4] Sujiono, E.H., Zabrian, D., Zharvan, V. and Humairah, N.A. 2022. Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. *Results in Chemistry*, 4, 100291, <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100291>.

- [5] Dungani, R., Munawar, S.S., Karliati, T., Malik, J. and Aditiawati, P. 2022. Study of Characterization of activated carbon from coconut shells on various particle scales as filler agent in composite materials. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 50(4), 256-271, <https://doi.org/10.5658/WOOD.2022.50.4.256>.
- [6] เจนจิรา ภูริรักษ์พิติกร, กิตติยา ปลื้มใจ, วรินดา เฟื่องชูช และ แหลมทอง ชื่นชม. 2022. การเพิ่มประสิทธิภาพ การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเมโซพอร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่เตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันแบบหม้อเดียว. *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 11(11), 45-56, <https://doi.org/10.60136/bas.v11.2022.129>. [Jenjira Phuriragpitikhon, Kittiya Pluamjai, Warinda Fuangchoonuch, Laemthong Chuenchom. 2022. Enhancing adsorption efficiency of methylene blue from water using cassava rhizome-derived mesoporous activated carbons prepared via one-pot hydrothermal carbonization. *Bulletin of Applied Sciences, Natural Resources and Environment*, 1(11), 45-56, <https://doi.org/10.60136/bas.v11.2022.129>. (in Thai)]
- [7] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา. 2566. ข้อมูลพื้นฐานของจังหวัดฉะเชิงเทรา. แหล่งข้อมูล : <https://www.opsmoac.go.th/chachoengsao-home>. ค้นเมื่อวันที่ 18 ตุลาคม 2566.
- [8] Ramutshatsha-Makhwedzha, D., Mavhungu, A., Moropeng, M.L. and Mbaya, R. 2022. Activated carbon derived from waste orange and lemon peels for the adsorption of methyl orange and methylene blue dyes from wastewater. *Heliyon*, 8(8), 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09930>.
- [9] Taer, E. et al. 2018. Activated carbon electrode made from coconut husk waste for supercapacitor application. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(12), 12072-12084, <https://doi.org/10.20964/2018.12.19>.
- [10] Mopoung, S. 2008. Surface image of charcoal and activated charcoal from banana peel. *Journal of Microscopy Society of Thailand*, 22, 15-19.
- [11] Husin, H., Abubakar, A., Ramadhani, S., Sijabat, C.F.B. and Hasfita, F. 2018. Coconut husk ash as heterogenous catalyst for biodiesel production from cerbera manghas seed oil. *MATEC web of conferences*, 197, 09008, <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819709008>.
- [12] Satheesh, M., Pugazhivadivu, M., Prabu, B., Gunasegaran, V. and Manikandan, A. 2019. Synthesis and characterization of coconut shell ash. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(7), 4123-4128, <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16299>.

- [13] Wang, J. and Guo, X. 2020. Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous materials*, 390, 122156, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>.
- [14] Xie, Z., Guan, W., Ji, F., Song, Z. and Zhao, Y. 2014. Production of biologically activated carbon from orange peel and landfill leachate subsequent treatment technology. *Journal of chemistry*, 91912, 1-9, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/491912>.
- [15] Abbas, M. and Trari, M. 2020. Removal of methylene blue in aqueous solution by economic adsorbent derived from apricot stone activated carbon. *Fibers and Polymers*, 21(4), 810-820, <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-020-8630-8>.
- [16] Jawad, A.H. et al. 2017. Microwave-assisted preparation of mesoporous-activated carbon from coconut (*Cocos nucifera*) leaf by H_3PO_4 activation for methylene blue adsorption. *Chemical Engineering Communications*, 204(10), 1143-1156, <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1347565>.
- [17] 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>.
- [18] Jawad, A.H., Sauodi, M.H., Mastuli, M.S., Aouda, M.A. and Radzun, K.A. 2018. Pomegranate peels collected from fresh juice shop as a renewable precursor for high surface area activated carbon with potential application for methylene blue adsorption. *Desalination and Water Treatment*, 124(4), 287-296, <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22725>.
- [19] Junlabhut, P., Wattanawikkam, C., Mekprasart, W. and Pecharapa, W. 2018. Effect of Metal (Mn, Co, Zn, Ni) Doping on Structural, Optical and Photocatalytic Properties of TiO_2 Nanoparticles Prepared by Sonochemical Method. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(10), 7302-7309, <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15717>.
- [20] Ohno, T., Tokieda, K., Higashida, S. and Matsumura, M. 2003. Synergism between rutile and anatase TiO_2 particles in photocatalytic oxidation of naphthalene. *Applied Catalysis A: General*, 244(2), 383-391, [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(02\)00610-5](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(02)00610-5).
- [21] Liao, Y. et al. 2012. Controllable synthesis of brookite/anatase/rutile TiO_2 nanocomposites and single-crystalline rutile nanorods array. *Journal of Materials Chemistry*, 22(16), 7937-7944.
- [22] Sultana, M., Rownok, M.H., Sabrin, M., Rahaman, M.H. and Alam, S. N. 2022. A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner engineering and technology*, 6, 1-14,

<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100382>.

- [23] Shafeeyan, M.S., Daud, W.M.A.W., Houshmand, A. and Shamiri, A. 2010. A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(2), 143-151,
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.07.006>.