Methyl Orange Dye Adsorption by Activated Carbon Prepared from Macadamia Shell Waste via Sodium Hydroxide Solution and Microwave Activation

Jinnapada Inthong[1] and Piyarut Moonsri[2*]
[1,2*]Program of Science Education, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University.
*Corresponding author: piyarut.m@pcru.ac.th

Received	Reviewed	Revised	Accepted
08/12/2025	05/01/2026	11/03/2026	12/03/2026

Abstract

Methyl orange (MO) is a persistent azo dye that is difficult to degrade and poses significant adverse impacts on water quality and the environment. Meanwhile, macadamia shell is an abundant agricultural waste that remains largely underutilized. This study aimed to investigate the adsorption of methyl orange using activated carbon prepared from macadamia shell waste via sodium hydroxide–assisted microwave activation (MAC-MC) and to compare its performance with activated carbon produced by conventional pyrolysis (MAC-PC). The results demonstrated that NaOH activation combined with microwave heating at a power of 800 W for 15 min produced activated carbon with a highly porous surface, characterized by micron-sized pores uniformly distributed throughout the surface structure. SEM–EDS analysis revealed that MAC-MC contained 73.56% carbon and 23.60% oxygen, which were comparable to those of MAC-PC prepared by pyrolysis at 800 °C for 3 h, exhibiting carbon and oxygen contents of 81.09% and 16.60%, respectively. These findings highlight the effectiveness of microwave activation in enhancing carbon content within a significantly shorter processing time. FTIR analysis further indicated that the functional groups present in the raw macadamia shell markedly decreased after both microwave and thermal activation, confirming the increased carbon purity of the prepared activated carbons. Batch adsorption experiments conducted at pH 3 and 30 °C using 0.1 g of adsorbent in 100 mL of 300 mg L^{-1} MO solution for 120 min showed that MAC-MC exhibited superior adsorption performance compared to MAC-PC, achieving a higher removal efficiency (≈81.97% versus 77.41%) and a greater equilibrium adsorption capacity ($q_e \approx$ 245.91 versus 232.24 mg g^{-1}). Adsorption isotherm analysis revealed that the Freundlich model provided the best fit, indicating a heterogeneous surface and multilayer adsorption behavior. The Dubinin–Radushkevich model yielded a mean adsorption energy of approximately 18.26 kJ mol^{-1}, suggesting

that the adsorption mechanism involved ion exchange and chemisorption. Thermodynamic analysis showed a negative enthalpy change ($\Delta H = -17.58$ kJ mol^{-1}), confirming that the adsorption process was exothermic, while negative Gibbs free energy values ($\Delta G < 0$) at all studied temperatures indicated spontaneous adsorption, with improved favorability at lower temperatures. Overall, activated carbon prepared from macadamia shell waste via sodium hydroxide–assisted microwave activation represents an efficient and promising approach for upgrading agricultural waste into a high-performance adsorbent for dye removal from wastewater.

Keywords: Activated carbon; Macadamia nut shell; Methyl orange; Microwave activation

การดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ

จินต์ณภาดา อินทอง[1] และปิยรัตน์ มูลศรี[2*]
[1,2*]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
*ผู้นิพนธ์หลัก: piyarut.m@pcru.ac.th

บทคัดย่อ

เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange, MO) เป็นสีย้อมกลุ่มอะโซที่มีความคงตัวสูงและย่อยสลายได้ยาก ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ ขณะเดียวกันกะลาแมคคาเดเมียเป็นของเสียทางการเกษตรที่มีปริมาณมากแต่ยังไม่ได้รับการใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลออเรนจ์โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่เตรียมด้วยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ (MAC-MC) และเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยวิธีไพโรไลซิส (MAC-PC) จากผลการศึกษาพบว่าการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นรังสีไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ นาน 15 นาที ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะพื้นผิวที่มีความพรุนสูง มีรูพรุนขนาดไมครอนกระจายตัวทั่วทั้งโครงสร้างพื้นผิว จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ C และ O ของถ่านกัมมันต์ด้วย SEM-EDS พบว่ามีปริมาณธาตุ C เท่ากับ 73.56% และธาตุ O เท่ากับ 23.60% ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการไพโรไลซิสที่ 800 °C นาน 3 ชั่วโมง ซึ่งพบปริมาณธาตุ C และ O เท่ากับ 81.09% และ 16.60% ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟในระยะเวลาสั้นที่สามารถเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนได้ดี และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR แสดงให้ทราบว่าหมู่ฟังก์ชันที่พบในวัสดุผงเศษกะลาแมคคาเดเมียเริ่มต้นลดลงอย่างชัดเจนหลังผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟและการกระตุ้นด้วยความร้อน โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีความบริสุทธิ์ของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาการดูดซับสีย้อม MO แบบแบตช์ที่ pH 3 อุณหภูมิ 30°C ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 g ในน้ำยาป้อน MO 300 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL เป็นเวลา 120 นาที พบว่า MAC-MC ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า MAC-PC (% Removal ≈ 81.97 เทียบกับ 77.41) และมีค่าความจุการดูดซับสมดุลสูงกว่า (q_e ≈ 245.91 เทียบกับ 232.24 mg g^{-1}) การวิเคราะห์ไอโซเทอมชี้ว่าแบบจำลอง Freundlich ให้ความสอดคล้องดีที่สุด (พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวและแนวโน้มการดูดซับหลายชั้น) ขณะที่แบบจำลอง Dubinin–Radushkevich ให้ค่าพลังงานเฉลี่ยของการดูดซับ ≈ 18.26 kJ mol^{-1} สะท้อนถึงกลไกของการดูดซับเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน/เคมีซอร์พชัน นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์พบว่า ΔH เท่ากับ -17.58 kJ mol^{-1} แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน โดยค่า $\Delta G < 0$ ในทุกอุณหภูมิและมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สะท้อนว่าการดูดซับเกิดได้เองและเหมาะสมที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการใช้คลื่นรังสีไมโครเวฟนี้ เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการยกระดับของเสียการเกษตรสู่ตัวดูดซับสมรรถนะสูงเพื่อการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียต่อไปได้

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์; กะลาแมคคาเดเมีย; เมทิลออเรนจ์: กระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

บทนำ

เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange, MO) เป็นสีย้อมกลุ่มอะโซ (azo dye) มีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไนโตรเจน-ไนโตรเจน (-N=N-) เชื่อมระหว่างวงแอโรมาติกทำให้มีความคงตัวสูงและย่อยสลายได้ยาก สีย้อมชนิดนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ การผลิตสี เป็นต้น ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำจากน้ำเสียอุตสาหกรรม ซึ่งไม่เพียงส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและระบบนิเวศเท่านั้น แต่ยังอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต (Alghamdi et al., 2019) ดังนั้น การพัฒนาวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนสำหรับการกำจัดสีย้อมกลุ่มอะโซจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในบรรดาวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวางวิธีการดูดซับ (Adsorption) จึงเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความเรียบง่ายในการใช้งาน ไม่ก่อให้เกิดของเสียอันตรายเพิ่มเติม และสามารถกำจัดสีย้อมได้ในระดับความเข้มข้นต่ำ วัสดุดูดซับต่างๆ ถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำและน้ำเสีย ทั้งได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี วัสดุธรรมชาติ และวัสดุที่แปรรูปจากวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น (Chudoba et al., 2022; Gupta et al., 2011; Putro et al., 2021) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon, AC) เป็นวัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีโครงสร้างรูพรุน และสภาพพื้นผิวหน้าที่ช่วยในการดูดซับโมเลกุลของสีย้อม การใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่น่าสนใจ เนื่องจากช่วยลดปริมาณของเสียทางการเกษตร และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ (Gupta et al., 2011; Hashmi et al., 2024) กะลาแมคคาเดเมียเป็นหนึ่งในของเสียทางการเกษตรที่มีความแข็ง ย่อยสลายได้ยาก และมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ เซลลูโลส (40–50%), เฮมิเซลลูโลส (20–30%) และลิกนิน (20–25%) และขี้เถ้า (1–5%) โดยให้ปริมาณคาร์บอนคงที่ประมาณ 18.6–21.45% ซึ่งเหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ (Kong et al., 2013; Moonsri, 2021; Piechocki et al., 2014) อย่างไรก็ตาม ของเสียชนิดนี้ยังไม่ได้รับการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในระดับชุมชนหรือเกษตรกรผู้ผลิต ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับกระบวนการกระตุ้น (activation process) ซึ่งสามารถทำได้ทั้งด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) สามารถช่วยลดอุณหภูมิในการเผาและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ (Alghamdi et al., 2019) นอกจากนี้ การใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ยังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถถ่ายเทพลังงานเข้าสู่วัสดุได้โดยตรง ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ลดเวลาในการผลิต และลดการสูญเสียพลังงานเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนด้วยเตาเผาแบบดั้งเดิม (Abbas et al., 2016; Du et al., 2017; Foo et al., 2011) เมื่อพิจารณาในบริบทของพื้นที่เกษตรกรรม การพัฒนากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้เวลาและพลังงานต่ำ สามารถดำเนินการได้ในระดับครัวเรือนหรือวิสาหกิจชุมชน จะช่วยลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มโอกาสในการนำวัสดุดูดซับไปใช้งานจริงในการบำบัดน้ำเสียในท้องถิ่น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ศึกษาการประยุกต์ใช้การกระตุ้นด้วย NaOH ร่วมกับคลื่นไมโครเวฟในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย และเชื่อมโยงสมบัติเชิงโครงสร้างกับสมรรถนะการดูดซับสีย้อมอย่างเป็นระบบยังมีรายงานค่อนข้างจำกัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมียด้วยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับคลื่นรังสี

ไมโครเวฟ เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพและกลไกการดูดซับสีย้อม MO ผ่านการวิเคราะห์ไอโซเทอมและพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อประเมินศักยภาพของกระบวนการดังกล่าวในการยกระดับของเสียทางการเกษตรให้เป็นวัสดุดูดซับสมรรถนะสูงสำหรับการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งถือเป็นการเพิ่มมูลค่าและการใช้งานถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับบริบทของเกษตรกรในปัจจุบัน

วิธีการวิจัย

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

นำเศษกะลาแมคคาเดเมีย (จากกลุ่มเกษตรกรแปรรูปผลไม้ในพื้นที่เมืองหนาวหนองแม่นา อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์) ที่ผ่านการกำจัดสิ่งปนเปื้อนแล้วไปบดลดขนาดและร่อนด้วยตระแกรงขนาด 30 mesh นำผงที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง และอบให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน (รุ่น UM500, Memmert, Germany) ที่ 80 ^{0}C นาน 8 ชั่วโมง จะได้ผงเศษกะลาแมคคาเดเมีย การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้กระบวนการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH solution) ทำโดยนำผงเศษกะลาแมคคาเดเมียปริมาณ 40.0 กรัม มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 40 %w/w ในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองผงเศษกะลาแมคคาเดเมียและล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้งจนกระทั่งน้ำที่ล้างมีค่าพีเอชประมาณ 7-8 แล้วนำผงเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านการแช่สารละลายเบสดังกล่าวไปอบให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 ^{0}C จากนั้นชั่งผงเศษกะลาแมคคาเดเมียดังกล่าวมาปริมาณ 10.0 กรัม ใส่ลงในถ้วยแก้วสำหรับไมโครเวฟแล้วนำไปให้ความร้อนโดยเตาไมโครเวฟ (SAMSUNG รุ่น MG23K3575AS) ที่อุณหภูมิ 800 วัตต์ เป็นเวลานาน 15 นาที นำตัวอย่างที่ได้เก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป ทำการการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมียโดยนำผงเศษกะลาแมคคาเดเมียปริมาณ 10.0 กรัม ไปเผาด้วยเตาเผา (รุ่น CWF1300, Carbolite Gero, Germany) ที่อุณหภูมิ 800 ^{0}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ในเตาจนเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 ^{0}C นาน 24 ชั่วโมง นำผงถ่านกัมมันต์ที่ได้เก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้งสองวิธีในขั้นตอนต่อไป

การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์

ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ตรวจสอบโดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, รุ่น Phenom XL G2 Desktop SEM, Thermo Fisher Scientific, Netherland) และใช้เทคนิค SEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุตัวอย่างทำโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (model Spectrum two, PerkinElmer, USA)

การศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์และรูปแบบการดูดซับ

การทดลองการดูดซับแบบแบตช์ดำเนินการโดยเตรียมสารละลาย MO ความเข้มข้นเริ่มต้นตามสภาวะที่กำหนด และเลือกศึกษาการดูดซับที่ pH = 3 เนื่องจากเมทิลออเรนจ์เป็นสีย้อมชนิดแอนไอออนิก ซึ่งที่สภาวะกรดพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มมีประจุบวก ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดเชิงไฟฟ้าสถิตระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ pH ดังกล่าวยังต่ำกว่าค่าจุดประจุ

ศูนย์ (pH_{pzc}) ของถ่านกัมมันต์ชีวมวลโดยทั่วไปจึงเอื้อต่อกระบวนการดูดซับ MO (Rattanapan et al., 2017; Meethai et al., 2024) ทำโดยปิเปตสารละลาย MO ความเข้มข้น 300 mg L^{-1} ปริมาตร 100 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL จำนวน 3 ขวด จากนั้นปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 3 โดยใช้สารละลาย HCl (0.1 mol L^{-1}) แล้วเติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1 g ในแต่ละขวด นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 30 °C นาน 120 นาที จากนั้นกรองเอาเฉพาะสารละลายไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer, รุ่น SPECORD 200 Plus, Analytikajena, Germany) ที่ความยาวคลื่น 508 nm เพื่อหาความเข้มข้นสมดุลของ MO ที่เหลืออยู่จากค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละของการกำจัดสีย้อม MO และความสามารถในการดูดซับ ตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ (Gupta et al., 2011)

$$\%\text{Methyl Orange removal} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 และ C_e คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้น (mg L^{-1}) ที่สภาวะสมดุลของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) ที่สภาวะสมดุล ของตัวถูกดูดซับสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

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

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่สภาวะสมดุล โดย W และ V คือ น้ำหนักของสารดูดซับ (g) และปริมาตรของของสารละลาย (L) ที่ใช้ ตามลำดับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ศึกษาโดยปิเปตสารละลาย MO ปริมาตร 100 mL ของความเข้มข้น 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 และ 600 mg L^{-1} ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL และปรับ pH ให้เท่ากับ 3 แล้ว จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1 g ลงไปในสารละลายแต่ละขวด นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหูมิที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 120 นาที แล้วกรองเอาเฉพาะสารละลายไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 508 nm เพื่อหาความเข้มข้นสมดุลของ MO ที่เหลืออยู่จากค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ (โดยแต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง) จากนั้นคำนวณหาปริมาณ MO ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปหารูปแบบการดูดซับจากสมการของ Langmuir model, Freundlich isotherm และ Dubinin-Radushkevich model (Gupta et al., 2011; Dawadi et al., 2020)

เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption thermodynamic)

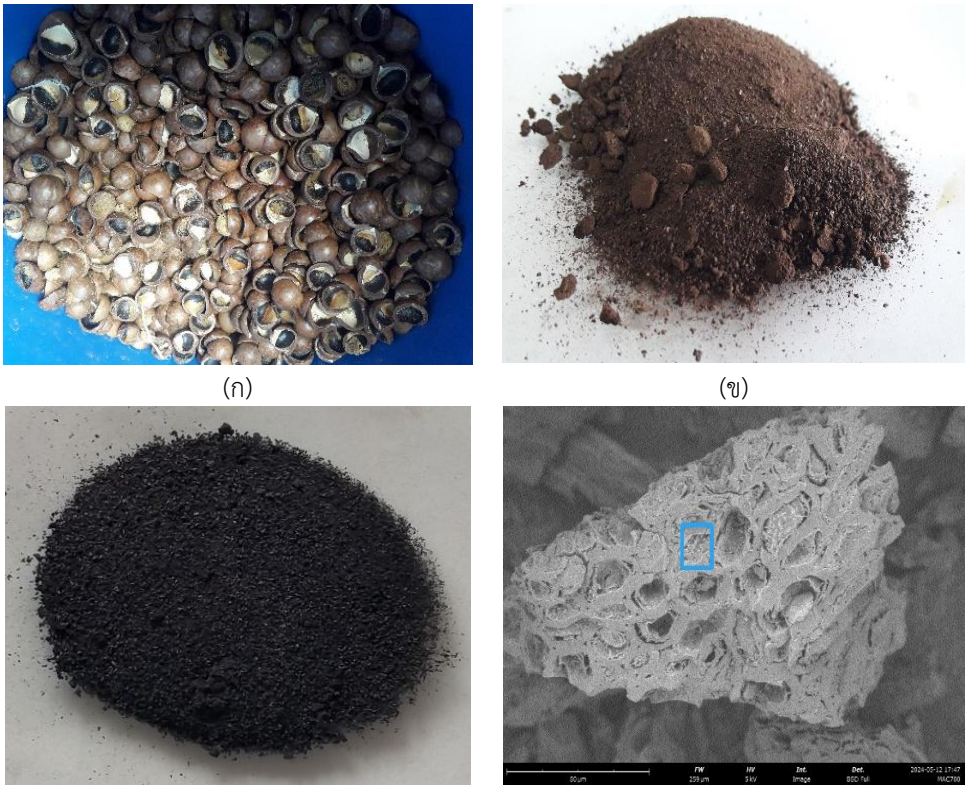
ปิเปตสารละลาย MO ความเข้มข้น 300 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL ใส่ลงไปในชมพู่ขนาด 250 mL และปรับ pH ให้เท่ากับ 3 แล้วเติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1 g และนำไปเขย่าที่อุณหภูมิ

30^{0}C เป็นเวลา 120 นาที กรองเอาเฉพาะสารละลายไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 508 nm หาความเข้มข้นสมดุลของ MO ที่เหลืออยู่ ทำการศึกษาเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้เป็น 40 ^{0}C และ 50 ^{0}C ตามลำดับ นำผลที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณ MO ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ และคำนวนหาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ โดยใช้สมการของ the Van' t Hoff equation (Atkins & De Paula, 2014)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเศษกะลาแมคคาเดเมียและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

เศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งจากการเกษตรแสดงได้ดังภาพที่ 1 (ก) เมื่อผ่านการทำความสะอาดและลดขนาดแล้วจะได้ผงเศษกะลาแมคคาเดเมียดังภาพที่ 1 (ข) ซึ่งเป็นผงละเอียดมีขนาดประมาณ 30 mesh ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผงเศษกะลาแมคคาเดเมีย โดยกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงได้ดังภาพที่ 1 (ค) ตามลำดับ



(ก) (ข)

(ค) (ง)

figure 1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) เศษกะลาแมคคาเดเมีย (ข) ผงเศษกะลาแมคคาเดเมีย (ค) ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH ร่วมกับคลื่นรังสีไมโครเวฟ และ (ง) พื้นผิวถ่านกัมมันต์ตรวจสอบโดย SEM

ลักษณะสัณฐานวิทยาจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1000X ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไมโครเวฟ (MAC-MC) แสดงดังภาพที่ 1(ง) แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะพื้นผิวที่มีความพรุนสูง โดยมีรูพรุนขนาดไม่สม่ำเสมอในช่วงระดับไมครอน กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งโครงสร้างพื้นผิว ซึ่งกระบวนการกระตุ้นโดยการใช้สารละลายเบสร่วมกับคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดการระเหยขององค์ประกอบที่ระเหยได้และการพังทลายของโครงสร้างภายของวัสดุตัวอย่าง (Abba and Ahmed, 2016; Du et al., 2017) การพัฒนาโครงสร้างรูพรุนดังกล่าวมีบทบาทสำคัญต่อสมรรถนะการดูดซับ เนื่องจากช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวเฉพาะและจำนวนตำแหน่งการดูดซับ (active sites) ลักษณะรูพรุนที่พบจากภาพ SEM อยู่ในช่วงระดับไมครอน ซึ่งสามารถจัดอยู่ในกลุ่ม macropores ที่เอื้อต่อการแพร่ของโมเลกุลสีย้อมเข้าสู่โครงสร้างภายใน และสนับสนุนค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงของ MAC-MC จึงสามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับได้

องค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมียโดยการใช้วิธีการกระตุ้นด้วยการแช่ในสารละลาย NaOH ร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ เปรียบเทียบกับการกระตุ้นด้วยความร้อน และผงเศษกะลาแมคคาเดเมียเริ่มต้น ผลที่ได้จากการตรวจสอบหาปริมาณธาตุ C และธาตุ O ที่เป็นองค์ประกอบโดยใช้เทคนิค SEM-EDS ผลที่ได้เป็นดังนี้

Table 1 ปริมาณองค์ประกอบของธาตุ C และ O ที่พบในสารตัวอย่าง

ชนิดตัวอย่าง	Atom Concentration (%)	
	C	O
MAC-MC กระตุ้นที่ 450 W นาน 15 นาที	70.18	25.98
MAC-MC กระตุ้นที่ 600 W นาน 15 นาที	70.49	25.31
MAC-MC กระตุ้นที่ 800 W นาน 10 นาที	66.56	25.32
MAC-MC กระตุ้นที่ 800 W นาน 15 นาที	73.56	23.60
MAC-MC กระตุ้นที่ 800 W นาน 20 นาที	70.84	23.69
MAC-PM กระตุ้นโดยการเผาที่ 800 ^{0}C นาน 3 ชม.	81.09	16.60

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุ C และ O ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเศษกะลาแมคคาเดเมียโดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย 40% NaOH และคลื่นไมโครเวฟ เปรียบเทียบกับการไพโรไลซิสด้วยความร้อน อุณหภูมิ 800 ^{0}C นาน 3 ชั่วโมง พบว่าตัวอย่าง MAC-MC ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์เป็นเวลา 15 นาที มีปริมาณธาตุ C สูงถึง 73.56% และธาตุ O 23.60% ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่าง MAC-PC ที่เผาที่ 800°C นาน 3 ชั่วโมง (81.09% C และ 16.60% O) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟในระยะเวลาสั้นสามารถเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนได้ดี โดยทั่วไปพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาและกำลังไฟในการกระตุ้น ค่าคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเหมาะสม ก่อนจะลดลงเล็กน้อยหากระยะเวลานานเกินไป ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าสภาวะการกระตุ้นที่เหมาะสมสามารถส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะด้วยเทคนิค FTIR ของผงเศษกะลาแมคคาเดเมีย (MAC) ถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านการไพโรไลซิสโดยความร้อนที่ 800°C นาน 3 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยใช้การกระตุ้นด้วยสารละลายเบสร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์เป็นเวลา 15 นาที ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 2

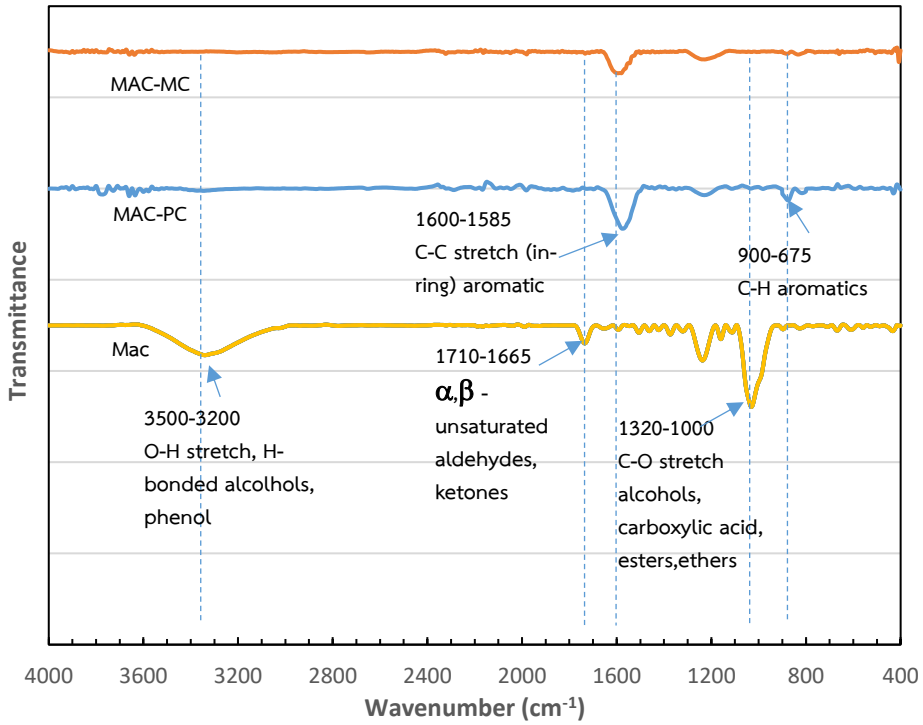


Figure 2. สเปกตรัมการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของ Mac-Powder เปรียบเทียบกับ MAC-PC และ MAC-MC ตามลำดับ

จากสเปกตรัม FTIR พบว่าเฉพาะตัวอย่าง MAC มีสัญญาณดูดกลืนชัดเจนในช่วงคลื่น 3500–3200 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ O–H ของแอลกอฮอล์ที่มีพันธะไฮโดรเจนและฟีนอล ส่วนบริเวณ 1710–1665 cm^{-1} แสดงถึงการมีอยู่ของหมู่คาร์บอนิลในแอลดีไฮด์หรือคีโตนที่ไม่อิ่มตัว ในช่วง 1600–1585 cm^{-1} สัญญาณจากการสั่นของพันธะ C=C ในวงอะโรมาติกยังปรากฏใน MAC-PC แต่จางลงใน MAC-MC บ่งชี้ว่าการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟอาจลดหมู่ฟังก์ชันบางชนิดลง นอกจากนี้บริเวณ 1320–1000 cm^{-1} ที่สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C–O ในหมู่แอลกอฮอล์ กรดคาร์บอกซิลิก และเอสเทอร์ปรากฏเด่นใน MAC และ MAC-PC ขณะที่ MAC-MC มีความราบเรียบตลอดสเปกตรัม แสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันลดลงอย่างชัดเจนหลังผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสอดคล้องกับความบริสุทธิ์ของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจากผลการวิเคราะห์ EDS (Meethai et al., 2024; Du et al., 2017)

ความสามารถในการดูดซับและการกำจัดสีย้อม

ความสามารถในการกำจัดสีย้อม MO และความสามารถในการดูดซับ ของถ่านกัมมันต์ MAC-PC ที่ผ่านการไพโรไลซิสโดยความร้อนที่ 800°C นาน 3 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ MAC-MC ที่เตรียมโดยใช้การกระตุ้นด้วยสารละลายเบสร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์เป็นเวลา 15 นาที ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 3

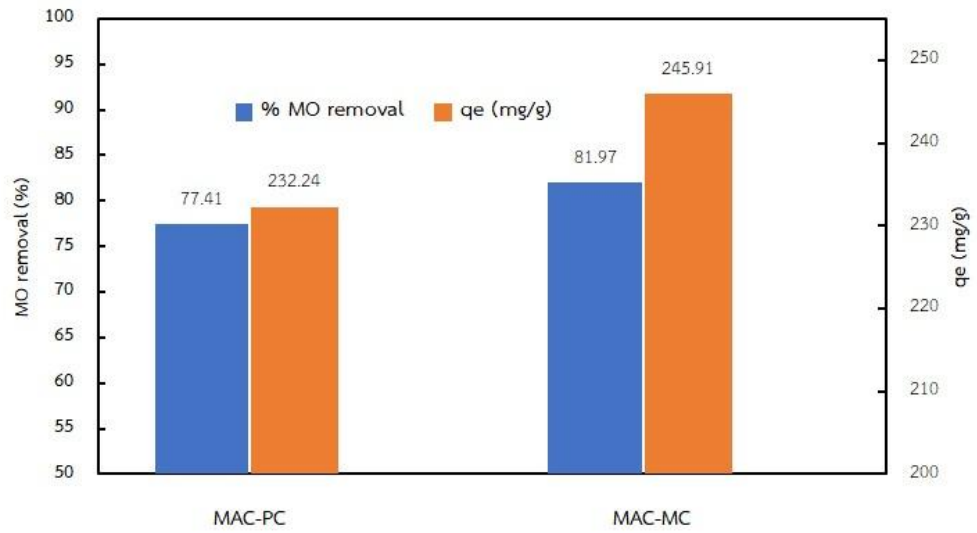


Figure 3. ความสามารถในการดูดซับและการกำจัดสีย้อม MO ของตัวดูดซับ MAC-PC และ MAC-MC

จากกราฟเปรียบเทียบพบว่าการดูดซับสีย้อม MO ที่สภาวะ pH 3 อุณหภูมิ 30 °C และเวลาสัมผัส 120 นาที ถ่านกัมมันต์ MAC-PC จากกะลาแมคคาเดเมียที่เผาที่ 800 °C นาน 3 ชั่วโมง มีความสามารถกำจัดสีย้อม MO เท่ากับ 77.41% และความจุการดูดซับสมดุล q_e เท่ากับ 232.24 mg/g ขณะที่ตัวอย่าง MAC-MC ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสร่วมกับไมโครเวฟ 800 วัตต์ 15 นาที ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า โดยมีความสามารถกำจัดสีย้อม 81.97% และ q_e เท่ากับ 245.91 mg/g แสดงให้ทราบว่าวิธีการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นรังสีไมโครเวฟ ช่วยพัฒนาโครงสร้างรูพรุนและเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับเกิดการดูดซับทำให้สามารถยึดจับโมเลกุล MO มากขึ้น (Du et al., 2017) อีกทั้งสภาพประจุของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่สภาวะกรดเอื้อต่อแรงดึงดูดเชิงไฟฟ้าสถิตระหว่างพื้นผิวถ่านกัมมันต์กับ MO ซึ่งเป็นสีย้อมแอนไอออนิก จึงส่งผลให้ MAC-MC มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม MO ได้ดี (Rattanapan et al., 2017; Meethai et al., 2024)

การศึกษารูปแบบการดูดซับของ MO บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์

ไอโซเทอร์มของการดูดซับของ MO ด้วยถ่านกัมมันต์ MAC-MC ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสร่วมกับไมโครเวฟ 800 วัตต์ 15 นาที เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ MO

ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้นของสารละลาย MO ที่เหลืออยู่ ณ สภาวะสมดุล เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมสำหรับอธิบายลักษณะการดูดซับ MO บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยไอโซเทอมที่นิยมใช้ในการศึกษา ได้แก่ Langmuir model, Freundlich isotherm และ Dubinin-Radushkevich model โดยผลที่ได้จากการศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 4

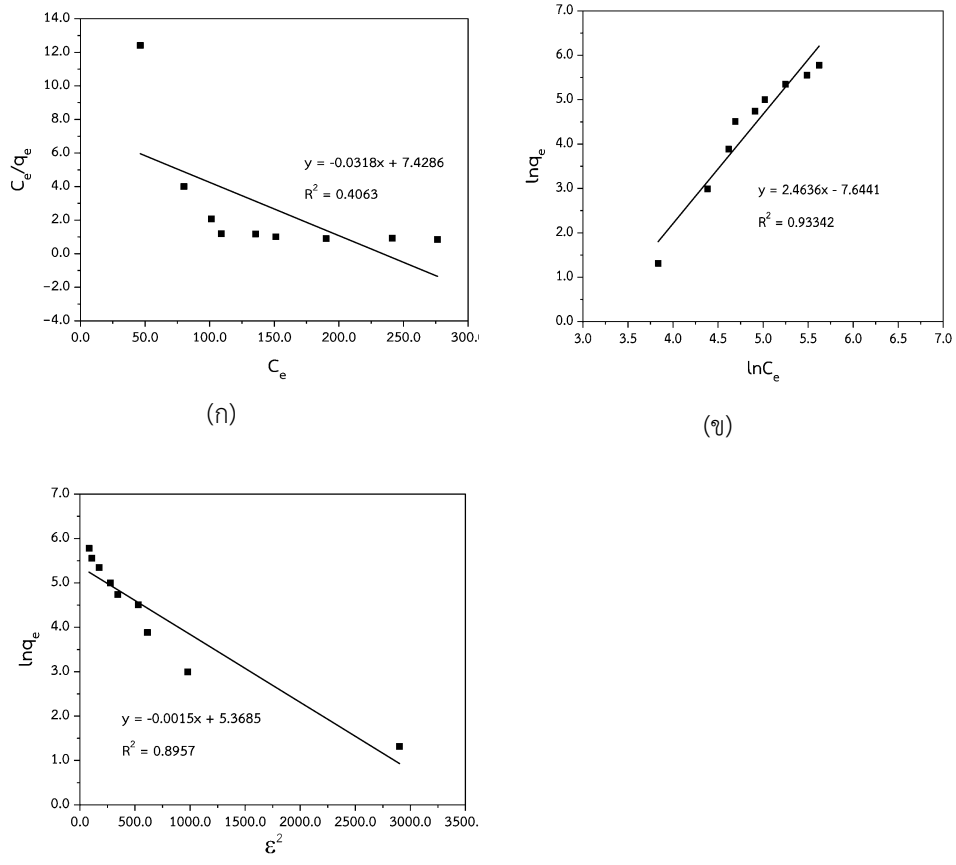


Figure 4. กราฟแสดงแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ MO บนถ่านกัมมันต์ ตามรูปแบบของ (ก) Langmuir model (ข) Freundlich model และ (ค) Dubinin-Radushkevich model

จากข้อมูลในภาพที่ 4 พบว่าความสัมพันธ์ของกราฟไอโซเทอมตามรูปแบบการดูดซับของ Freundlich isotherm มีความเป็นเส้นตรงมากที่สุด (R^2 = 0.93342) รองลงมาคือความสัมพันธ์ของกราฟไอโซเทอมตามรูปแบบของ Dubinin-Radushkevich model และ Langmuir model ตามลำดับ ดังนั้นการดูดซับ MO บนถ่านกัมมันต์จึงเป็นไปตามรูปแบบการดูดซับของ Freundlich isotherm มากที่สุด แสดงให้ทราบว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวและมีลักษณะเป็นการดูดซับแบบ

หลายชั้น โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการดูดซับที่คำนวนได้ตามความสัมพันธ์ของไอโซเทอมของการดูดซับแสดงได้ดังตารางที่ 2

Table 2 พารามิเตอร์ของการดูดซับที่ได้จากความสัมพันธ์ของกราฟไอโซเทอมและการคำนวณจากความสัมพันธ์ตามสมการของ Langmuir, Freundlich and Dubinin-Radushkevich

Isotherm Model	Parameter	Values of Methyl Orange adsorption
The Langmuir isotherm $\frac{C_e}{q_e}=\frac{1}{q_m K_L}+\frac{C_e}{q_m}$	R^2	0.4063
	Slope	-0.0318
	intercept	7.4286
	q_m (mg/g)	-31.4465
	K_L (L/mg)	-0.0043
The Freundlich isotherm $\ln q_e=\ln K_F+\frac{1}{n}\ln C_e$	R^2	0.9334
	Slope	2.4636
	intercept	-7.6441
	n	0.4059
	K_F (L/mg)	0.0005
The Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherm $\ln q_e=\ln q_m-K_D\varepsilon^2$ $\varepsilon=RT\ln\left(1+\frac{1}{C_e}\right)$, $E=\frac{1}{\sqrt{2K_D}}$	R^2	0.8957
	Slope	-0.0015
	intercept	5.3685
	q_m (mg/g)	213.5776
	K_D (L/mg)	0.0015
	E (kJ/mol)	18.2574

จากความสอดคล้องของแบบจำลอง Freundlich isotherm กับข้อมูลดีที่สุด สะท้อนพื้นผิวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวและแนวโน้มการดูดซับหลายชั้น โดยค่า K_F คือค่าคงที่ของ Freundlich ซึ่งแสดงถึงปริมาณการดูดซับและความหนาแน่นของการดูดซับเฉพาะตำแหน่ง ซึ่งหากค่า K_F มีค่ามากแสดงถึงปริมาณการดูดซับมีมาก ส่วนค่าคงที่ n หากมีค่าสูงแสดงว่ามีแรงดึงดูดที่แข็งแรงระหว่างสารตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (Rattanapan et al., 2017; Meethai et al., 2024) ขณะที่ Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherm ให้ความสอดคล้องรองลงมา (R^2 = 0.8957) ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณสูงสุดของ MO ที่สามารถถูกดูดซับบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (q_m) ได้เท่ากับ 213.58 mg/g โดยค่า KD แสดงถึงศักย์ความยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล MO กับพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่นำไปคำนวณหาค่า E คือพลังงานอิสระของการดูดซับ (the mean free energy of adsorption) ได้ ซึ่งสามารถคาดการณ์ได้ว่าการดูดซับนั้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ (E < 8 kJ/mol) การแลกเปลี่ยนไอออน (E = 8-16 kJ/mol)

หรือเป็นการดูดซับทางเคมี (E > 20 kJ/mol) ซึ่งพบว่าค่า E มีค่าเท่ากับ 18.2574 kJ mol^{-1} แสดงว่าการดูดซับมีแนวโน้มเป็นแบบการแลกเปลี่ยนไอออนและแบบ chemisorption (Chen et al., 2010; Chudoba et al., 2022) มากกว่าการดูดซับทางกายภาพ โดยกลไกดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์กับหมู่ซัลโฟเนตของเมทิลออเรนจ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับ Langmuir isotherm ให้ความสอดคล้องต่ำมากและให้ค่าพารามิเตอร์บางค่าที่เป็นลบ ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดของสมมติฐาน Langmuir ที่กำหนดให้พื้นผิวมีความเป็นเนื้อเดียวและเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งไม่สอดคล้องกับลักษณะจริงของถ่านกัมมันต์จากชีวมวลที่มีโครงสร้างรูพรุนและหมู่ฟังก์ชันหลากหลาย

เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption thermodynamics)

เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับของ MO ด้วยถ่านกัมมันต์ MAC-MC ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสร่วมกับไมโครเวฟ 800 วัตต์ 15 นาที สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์โดยใช้ the Van' t Hoff equation เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ เช่น พลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) เอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH^0) และเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS^0) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการทำนายและระบุกระบวนการดูดซับ (Atkins & De Paula, 2014)

$$\ln K = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (3)$$

เมื่อ K คือ q_e/C_e, R คือ the universal gas constant (8.314 J $mol^{-1}K^{-1}$) และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ซึ่ง ΔG^0 สามารถคำนวณหาได้ดังสมการด้านล่างนี้

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (4)$$

จากความสัมพันธ์ตามสมการของ the Van' t Hoff equation กราฟที่พล๊อตระหว่าง $\ln q_e/C_e$ และ 1/T สามารถใช้หา ΔS^0 และ ΔH^0 ของการดูดซับจากความชันและจุดตัดที่ได้จากกราฟดังภาพที่ 5 และค่าค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับแสดงได้ดังตารางที่ 3

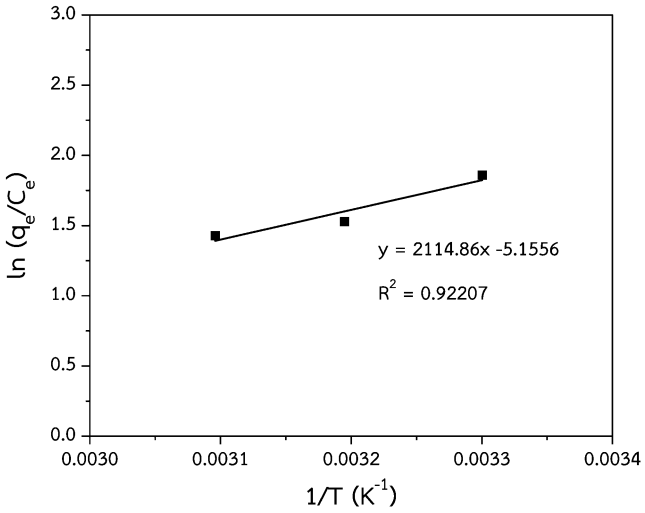


Figure 5 The linear plot of $\ln q_e/C_e$ และ 1/T using the Van' t Hoff equation

Table 3 Thermodynamic parameters of MO adsorption on MAC-AC

Adsorbate	ΔH (kJ $mol^{-1}K^{-1}$)	ΔS (kJ $mol^{-1}K^{-1}$)	ΔG (kJ $mol^{-1}K^{-1}$)		
			T=303 K	T = 313 K	T = 323 K
Methyl Orange	-17.5833	-0.0429	-4.5956	-4.1670	-3.7383

จากการวิเคราะห์เชิงเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าค่า ΔH^0 เท่ากับ -17.5833 kJ $mol^{-1}K^{-1}$ สะท้อนว่ากระบวนการแบบคายความร้อนที่เกิดขึ้น และด้วยขนาดค่าที่ต่ำกว่า 20 kJ mol^{-1} จึงสอดคล้องกับลักษณะการดูดซับเชิงแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับค่า ΔS^0 ซึ่งเท่ากับ -0.0429 kJ $mol^{-1}K^{-1}$ แสดงถึงการลดลงของระดับความเป็นอิสระหรือความไม่เป็นระเบียบ (disorder) ของ MO ที่ถูกดูดซับบนผิวของ MAC-MC ในสารละลาย (Smoczynski et al., 2020; Chudoba et al., 2022) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานจลน์ของโมเลกุลเมทิลออเรนจ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับพื้นผิวถ่านกัมมันต์ลดลง และรบกวนการเกิดปฏิสัมพันธ์เชิงเคมีหรือการแลกเปลี่ยนไอออน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพลังงานอิสระของกิบส์มีค่าเป็นลบในทุกช่วงอุณหภูมิแสดงให้ทราบว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้เอง โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าลบของ ΔG^0 มีแนวโน้มลดลง บ่งชี้ได้ว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิที่ต่ำ และที่อุณหภูมิ 303 K เป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการดูดซับสีย้อม MO บนตัวดูดซับ MAC-MC ได้สูงสุด (Gupta et al., 2011; Alghamdi et al., 2019; Smoczynski et al., 2020)

สรุปผลการวิจัย

ถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย MAC-MC ที่เตรียมด้วยการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH ร่วมกับไมโครเวฟ 800 วัตต์ 15 นาที เป็นตัวดูดซับที่มีศักยภาพสูงสำหรับการกำจัดเมทิลออเรนจ์ เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ MAC-PC ที่ผ่านการไพโรไลซิสที่ 800 °C 3 ชั่วโมง โดย MAC-MC สามารถกำจัด MO ได้ถึง 81.97% ซึ่งสูงกว่า MAC-PC (77.41%) สอดคล้องกับภาพ SEM ที่แสดงโครงสร้างพรุน และผล EDS/FTIR ที่บ่งชี้การเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนและการลดลงของหมู่ฟังก์ชันที่พบในวัสดุเศษกะลาแมคคาเดเมียเริ่มต้น การวิเคราะห์ไอโซเทอมพบว่าแบบจำลอง Freundlich ให้ความสอดคล้องดีที่สุด แสดงให้ทราบว่าพื้นผิววัสดุถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวและมีแนวโน้มการดูดซับแบบหลายชั้น ขณะที่แบบจำลอง D–R ให้ความสอดคล้องรองลงมาและมีค่าความจุของการดูดซับ (q_m) ≈ 213.58 mg g^{-1} พร้อมพลังงานเฉลี่ยของการดูดซับ (E) ≈ 18.26 kJ mol^{-1} บ่งชี้กลไกของกระบวนการดูดซับเป็นแบบการแลกเปลี่ยนไอออน/chemisorption มากกว่าการดูดซับทางกายภาพ จากเทอร์โมไดนามิกส์พารามิเตอร์พบว่ามีค่า ΔH^0 เท่ากับ -17.5833 kJ mol^{-1} ซึ่งแสดงให้ทราบว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการคายความร้อน และค่า ΔS^0 เท่ากับ -0.0429 kJ $mol^{-1}K^{-1}$ แสดงถึงการลดลงของความไม่เป็นระเบียบของ MO บนผิวถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้พบว่าค่า $\Delta G < 0$ ทุกอุณหภูมิแสดงว่าเป็นกระบวนการเกิดขึ้นได้เอง และกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบในเชิงอรรถประโยชน์ การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH ร่วมกับการใช้คลื่นรังสีไมโครเวฟจึงมีความได้เปรียบทั้งในด้านการประหยัดพลังงานและการลดระยะเวลาในการผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับการเตรียมโดยวิธีการไพโรไลซิสโดยใช้ความร้อน เนื่องจากสามารถถ่ายเทพลังงานเข้าสู่วัสดุได้โดยตรงและพัฒนาโครงสร้างรูพรุนได้อย่างรวดเร็ว ขณะที่ยังคงให้สมรรถนะการดูดซับสูง กระบวนการดังกล่าวจึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการยกระดับของเสียทางการเกษตรสู่ตัวดูดซับสมรรถนะสูงเพื่อการบำบัดมลพิษทางน้ำอย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

References

Abbas, M., & Ahmed, R. (2016). Microwave-assisted production of activated carbon: A sustainable and efficient approach. *Renewable Energy*, 90, 180-190.

Alghamdi, A. A., Al-Odayni, A. B., Saeed, W. S., Almutairi, M. S., Alharthi, F. A., Aouak, T., & Al-Kahtani, A., (2019), Adsorption of azo dye methyl orange from aqueous solutions using alkali-activated polypyrrole-based graphene oxide. *Molecules*, 24(20), 3685.

Atkins, P. W., & De Paula, J., (2014), Atkins' physical chemistry. *Oxford university press*., 832-839.

Chen H, Zhao J, Dai G, Wu J, Yan H. (2010). Adsorption characteristics of Pb(II) from aqueous solution onto a natural biosorbent, fallen cinnamomum camphora leaves. *Desalination*, 262, 174.

Chudoba D, Łudzik K, Jazdzewska M. (2022). Carbon fibres as potential bone implants with controlled doxorubicin release. *Scientific Reports*, 12(1), 2607.

Dawadi, K. B., Bhattarai, M., and Homagai, P. L., (2020), Adsorptive removal of methyl red from aqueous solution using Charred and Xanthated Sal (Shorea robusta) Sawdust. Amrit Research Journal, 1(1), 37-44.

Du, C., Xue, Y., Wu, Z., & Wu, Z., (2017). Microwave-assisted one-step preparation of macadamia nut shell-based activated carbon for efficient adsorption of Reactive Blue. *New Journal of Chemistry*, 41(24), 15373-15383.

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2011). Microwave-assisted production of activated carbon from agricultural residues: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 276-285.

Gupta, V. K., Suhas, I., & Ali, I. (2011). Adsorption of methyl orange using activated carbon derived from waste materials: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2343-2374.

Hashmi, Z., Jatoi, A. S., Nadeem, S., Anjum, A., Imam, S. M., and Jangda, H. (2024). Comparative analysis of conventional to biomass-derived adsorbent for wastewater treatment: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(1), 45-76.

Kong, L., Lu, C., Liu, Z., & Zheng, H. (2013). Characteristics of activated carbon prepared from Macadamia nutshell. *Chemical Engineering Journal*, 32(5), 349-355.

Meethai, S., Sikhamchin, P., & Moonsri, P. (2024). The effective removal of the metal ion Pb^{2+} from an aqueous solution by activated carbon prepared from macadamia nut shell: isotherm and thermodynamic studies. *Journal of Vocational Education in Agriculture*, *8*(2), 32-47. (in Thai)

Moonsri, P., Pongpian, W., & Moonsri, K., (2017). Production of Activated Carbon from Moldy Damaged Tamarind-Pod. *Applied Mechanic and Material*, 855, 137-142.

Moonsri, P., (2021). Properties of macadamia shell charcoal prepared by a small artificial furnace. *Journal of Vocational Institute of Agriculture*, 5(1), 28-39. (in Thai)

Piechocki, J., Hoffmann, J., & Schmidt, H. (2014). Utilization of Macadamia nutshells for activated carbon production. *Biomass and Bioenergy*, 60, 321-327.

Putro, J. N., Ju, Y. H., Soetaredjo, F. E., Santoso, S. P., & Ismadji, S., (2021). Biosorption of dyes. In Green Chemistry and Water Remediation*: Research and Applications*, 5(3), 67-84.

Rattanapan, S., Srikram, J., & Kongsune, P. (2017). Adsorption of methyl orange on coffee grounds activated carbon. *Energy Procedia*, *138*, 949-954.

Rengaraj, S., Kyeong-Ho, Y., & Seung-Hyun, K. (2001). Adsorption characteristics of methyl orange onto activated carbon derived from palm-tree materials. *Water Research*, 35(4), 1306-1314.

Smoczynski, L., Pierozynski, B., & Mikołajczyk, T., (2020). The effect of temperature on the biosorption of dyes from aqueous solutions. *Processes*, 8(6), 636.

Tahir SS, Rauf N. (2006). Removal of a cationic dye from aqueous solutions by adsorption onto bentonite clay. *Chemosphere*, 2006(63), 1842–1848.

Wattanasiriwech, S., Naradisorn, M., & Wattanasiriwech, D., (2023). Adsorption performance of macadamia husk-activated carbon from a household pyrolysis kiln. *Green Materials*, 11(3), 137-144.