

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษลำต้นกัญชงเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยใช้ กระบวนการไพโรไลซิสและการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อการกำจัดสีย้อมเมทิลเรด

Preparation of activated carbon from agricultural waste hemp stalks using pyrolysis and microwave activation processes for the removal of methyl red dye

ธนากร กีเรียง¹ อาทิตย์ หู้เต็ม¹ และปิยรัตน์ มุลศรี^{1*}

Thanakorn Keeriang¹, Artit Hutem¹ and Piya-rut Moonsri^{1*}

¹ สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000

¹Program of Science Education, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University, Phetchabun 67000

* Corresponding author E-mail: piyarut.m@pcru.ac.th

บทคัดย่อ

ถ่านกัมมันต์จากเศษลำต้นกัญชงเหลือทิ้งทางการเกษตรถูกเตรียมขึ้นโดยการไพโรไลซิสเศษลำต้นกัญชงด้วยเตาเผาถ่านแบบชุมชน และกระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ เมื่อใช้กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ นาน 3 นาที ผลถ่านกัมมันต์ที่ได้มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นโครงสร้างแบบรูพรุนขนาดไมครอนจำนวนมาก จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS และ FTIR แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากกว่าเศษลำต้นกัญชงและถ่านจากเศษลำต้นกัญชงตามลำดับ โดยพบธาตุคาร์บอนอยู่มากกว่าร้อยละ 92 จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับและการกำจัดสีย้อมเมทิลเรด (MR) ในสารละลาย MR สังเคราะห์เข้มข้น 300 mg L⁻¹ ปริมาตร 100 mL โดยใช้ปริมาณของตัวดูดซับเท่ากับ 0.100 g ที่ pH 3 อุณหภูมิ 30 °C และเขย่านาน 120 นาที พบว่าสามารถกำจัดสีย้อม MR ได้สูงกว่าร้อยละ 85 และมีค่าปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (q_m) เท่ากับ 270.27 mg/g มีความสอดคล้องกับ Langmuir model และ Freundlich isotherm มีเทอร์โมไดนามิกส์พารามิเตอร์มีค่า $\Delta G < 0$ และ ΔH^0 เท่ากับ -31.0412 kJ mol⁻¹K⁻¹ มีการดูดซับแบบหลายชั้นและความหนาแน่นของตัวดูดซับบนพื้นผิวของสารตัวดูดซับ และเป็นกระบวนการแบบคายความร้อน ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากเศษลำต้นกัญชงที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ มีคุณสมบัติเป็นสารตัวดูดซับที่ดีและสามารถนำไปใช้กำจัดสีย้อม MR ได้

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์; เศษลำต้นกัญชง; เมทิลเรด

Abstract

Activated carbon was prepared from agricultural waste derived from hemp stalks through a pyrolysis process using a traditional charcoal kiln. The resulting charcoal was subsequently activated using microwave irradiation. The study identified the optimal activation condition as microwave power of 800 Watt for a duration of 3 minutes. The activated carbon exhibited a highly porous microstructure with numerous micron-sized pores. Characterization by SEM-EDS and FTIR techniques revealed a significant increase in carbon content in the activated carbon compared to raw hemp stalks and unactivated biochar, with carbon content exceeding 92%. The adsorption

performance of the activated carbon was investigated using a synthetic solution of methyl red (MR) dye at an initial concentration of 300 mg L^{-1} (100 mL volume). Adsorption was conducted under conditions of pH 3 at 30°C , with 0.100 g of adsorbent, and agitation for 120 minutes. The activated carbon exhibited an MR removal efficiency of over 85%, with a maximum adsorption capacity (q_m) of 270.27 mg g^{-1} . The adsorption behavior was consistent with both the Langmuir and Freundlich isotherm models. Thermodynamic parameters demonstrated $\Delta G < 0$ and ΔH^0 of $-31.0412 \text{ kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$, indicating that the adsorption process was exothermic, multilayered, and characterized by a high density of adsorbed molecules on the surface of the adsorbent. Therefore, the microwave-activated carbon derived from hemp stalk waste exhibits excellent adsorption properties and can be effectively utilized for the removal of MR dye from aqueous solutions.

Keywords: Activated carbon, Hemp Stalks, Methyl red

บทนำ

การปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ พลาสติก และอาหาร ได้กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทวีความรุนแรงมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง สีย้อมเหล่านี้ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน ทนทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ ทำให้ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานานก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศ สัตว์น้ำ และสุขภาพของมนุษย์ (Christian et al., 2023) สีย้อมเมทิลเรด (Methyl red dye, MR) เป็นสีย้อมโมโนอะโซแอนไอออนิกสังเคราะห์ที่มีสูตรเคมี $\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$ และมีน้ำหนักโมเลกุล 269.30 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นสีแดงส้มละลายน้ำได้ดี มีโครงสร้างทางเคมีเป็นสารประกอบอะโซ ($-\text{N}=\text{N}-$) ซึ่งทำให้โมเลกุลมีความเสถียรสูง ทนทานต่อแสง ความร้อน และปฏิกิริยาเคมีทั่วไป นิยมใช้ในกระบวนการย้อมและตกแต่งสิ่งทอ การกำจัดสีย้อม MR จากน้ำทิ้งดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ (Bouzid et al., 2023; Dawadi et al., 2020) วิธีการดูดซับ (Adsorption) จึงเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายในการใช้งาน ไม่ก่อให้เกิดของเสียอันตรายเพิ่มเติม และสามารถกำจัดสีย้อมได้ในระดับความเข้มข้นต่ำ วัสดุดูดซับต่างๆ ถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำและน้ำเสีย ทั้งได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี วัสดุธรรมชาติ และวัสดุที่แปรรูปจากวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น (Christian et al., 2023; Hashmi et al., 2024; Hesas et al., 2013) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon, AC) เป็นวัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีโครงสร้างรูพรุน และสภาพพื้นผิวหน้าที่ช่วยในการดูดซับโมเลกุลของสีย้อม การใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากช่วยลดปริมาณของเสียทางการเกษตร และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ (Gul et al., 2022; Moonsri, 2021) เศษลำต้นกัญชง (Hemp stalk) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีศักยภาพสูงในการผลิต AC เนื่องจากมีลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้เอื้อต่อการเกิดรูพรุนเมื่อผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยวิธีต่างๆ (Staf et al., 2023; Toptas et al., 2024) จากรายงานที่ผ่านมาพบว่าการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ (MW) เป็นทางเลือกที่เป็นไปได้สำหรับวิธีการทั่วไปในการเตรียม AC เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว และปรับปรุงคุณภาพ AC รวมทั้งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Du et al., 2017; Hesas et al., 2013) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียม AC จากเศษลำต้นกัญชงเหลือทิ้งโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ และศึกษาสมบัติของ AC ที่เตรียมได้โดยการตรวจวัดความสามารถในการดูดซับรวมทั้งนำไปใช้ในการกำจัดสีย้อม MR ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษลำต้นกล้วย

1.1 การเตรียมถ่านชาร์จากเศษลำต้นกล้วยโดยการเผาด้วยเตาแบบภูมิปัญญาประดิษฐ์ทำโดยนำเศษลำต้นกล้วยแห้งจำนวน 12 กิโลกรัม (จากศูนย์วิจัยเกษตรพื้นที่สูงเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์) ไปเผาด้วยเตาเผาขนาดถึง 200 ลิตร (ช่วงอุณหภูมิของการเผาประมาณ 600-800 °C) นาน 5 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเตาประมาณ 2 ชั่วโมง นำถ่านชาร์ที่ได้ไปบดลดขนาดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 80 mesh นำผงถ่านที่ได้ไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบให้แห้งด้วยเตาอบแบบบอบลมร้อน (TOSHIBA รุ่น TM- MM10DZC) เมื่อใช้กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง และนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 การไพโรไลซิสเศษลำต้นกล้วยด้วยเตาเผาแบบภูมิปัญญาชาวบ้าน (ก) การบรรจุเศษลำต้นกล้วยลงในเตา และ (ข) การเผาที่อุณหภูมิ 600°C นาน 5 ชั่วโมง

1.2 การกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยไมโครเวฟ การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ นำถ่านชาร์จำนวน 10.0 g ที่เตรียมได้มากระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ (SAMSUNG รุ่น MG23K3575AS) แต่ละสถานะทำโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัม ที่กำลังไฟฟ้า 450, 600 และ 800 วัตต์ ระยะเวลา 1 นาที 3 นาที และ 5 นาที ตามลำดับ โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในแต่ละสถานะถูกทิ้งให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 1 ชั่วโมง) ในไมโครเวฟ จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้เก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

2. การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์

ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเศษลำต้นกล้วยทำโดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, รุ่น Phenom XL G2 Desktop SEM, Thermo Fisher Scientific, Netherland) ที่กำลังขยาย 800 ,2000 และ 5000 เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์และใช้เทคนิค SEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบในสารตัวอย่างทำโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (model Spectrum two, PerkinElmer, USA)

3. การศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลเรดและรูปแบบการดูดซับ

3.1. การหาความสามารถในการดูดซับ ทำโดยการปิเปตสารละลาย MR ความเข้มข้น 300 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL แต่ละขวด จำนวน 3 ขวด แล้วปรับ pH ของสารละลาย โดยใช้เครื่องวัด pH (pH meter, รุ่น GC700, Eutech, Singapore) ให้เท่ากับ 3 ด้วยสารละลาย HCl (0.1 mol L^{-1}) ซึ่งถ่านกัมมันต์ตัวอย่างปริมาณ 0.1000 g (บันทึกทศนิยมสี่ตำแหน่ง) ใส่ลงไปในแต่ละขวด นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 30°C นาน 120 นาที จากนั้นกรองเอาเฉพาะสารละลายไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer, รุ่น SPECORD 200 Plus, Analytikjena, Germany) ที่ความยาวคลื่น 443 nm เพื่อหาความเข้มข้นของ MR ที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุลจากการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ คำนวณหาร้อยละการกำจัดสีย้อม MR และความสามารถในการดูดซับจากปริมาณ MR ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

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

เมื่อ C_0 และ C_e คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของตัวถูกดูดซับ; (mg L^{-1})

ความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) ที่สภาวะสมดุล ของตัวถูกดูดซับคำนวณได้โดยใช้สมการ :

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

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

3.2 การหารูปแบบของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ทำโดยเตรียมสารละลาย MR ความเข้มข้น 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 และ 600 mg L^{-1} จากนั้นปิเปตสารละลาย MR แต่ละความเข้มข้น ปริมาตร 100 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL แล้วนำแต่ละขวดไปปรับ pH ให้เท่ากับ 3 จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1000 g (บันทึกทศนิยมสี่ตำแหน่ง) ใส่ลงไปในแต่ละขวด แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 120 นาที แล้วกรองเอาเฉพาะสารละลายไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 443 nm เพื่อหาความเข้มข้นของ MR ที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุลจากการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ (ทำซ้ำ 3 ครั้ง) ทำการคำนวณหาปริมาณ MR ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปหารูปแบบของการดูดซับจากสมการของ Langmuir model, Freundlich isotherm และ Dubinin-Radushkevich model (Dawadi et al., 2020; Gul et al., 2022)

4. เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption thermodynamic)

ปิเปตสารละลาย MR เข้มข้น 300 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL จำนวน 3 ขวด ปรับ pH ให้เท่ากับ 3 เติมถ่านกัมมันต์ตัวอย่างปริมาณ 0.1000 g ลงในสารละลายแต่ละขวด แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ควบคุมไว้ที่ 30°C เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นกรองเอาเฉพาะสารละลายไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 443 nm หาความเข้มข้นของ MR ที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุลจากการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ (ทำซ้ำ 3 ครั้ง) คำนวณหาปริมาณ MR ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ทดลองซ้ำตามวิธีการข้างต้น แต่เปลี่ยนอุณหภูมิในการเขย่าเป็น 40°C และ 50°C ตามลำดับ แล้วคำนวณหาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับโดยใช้สมการของ the Van' t Hoff (Atkin and De Paula, 2014)

ผลการวิจัย

1. ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์

ลักษณะทางกายภาพของเศษลำต้นกล้วยง ถ่านชาร์เศษลำต้นกล้วยง ผงถ่านชาร์ที่ขนาด 80 mesh (HEMP-C) และถ่านกัมมันต์ผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ (HEMP-WC) แสดงได้ดังภาพที่ 2



(ก)



(ข)



(ค)



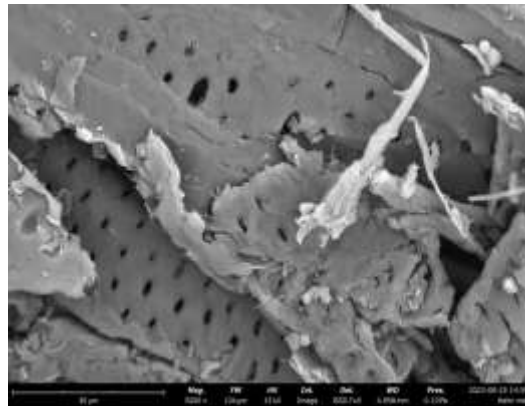
(ง)

ภาพที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) เศษลำต้นกล้วยง (ข) ถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสเศษลำต้นกล้วยง (ค) ผงถ่านชาร์ขนาด 80 mesh และ (ง) ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการกระตุ้นถ่านชาร์จากเศษลำต้นกล้วยงด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 1000X และ 5000X แสดงดังภาพที่ 3 โดยลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ประกอบไปด้วยรูพรุนระดับไมครอนจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟทำให้สารที่ระเหยได้หลุดออกจากโครงสร้างของถ่าน (Hesas et al., 2013) จากลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคที่มีความพรุนสูงในถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับดีขึ้น (Meethai et al., 2024)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3 สัณฐานวิทยาของ (ก) ผงถ่านชาร์จากเศษลำต้นักัญชง และ (ข) ผงถ่านกัมมันต์

2. องค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์

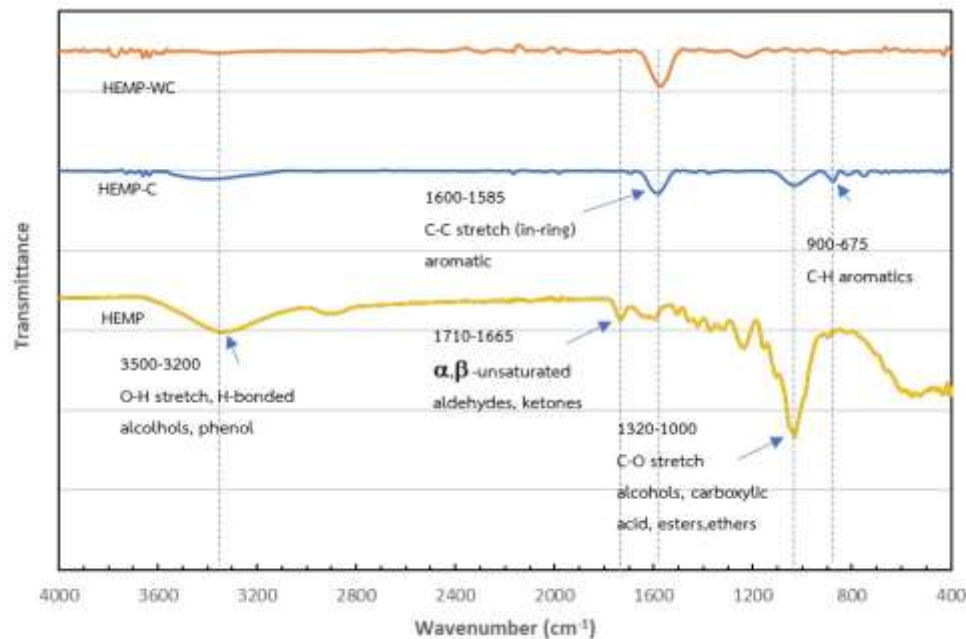
องค์ประกอบทางเคมีที่พบในผงเศษลำต้นักัญชง ถ่านชาร์จากเศษลำต้นักัญชง และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สภาวะต่าง ๆ โดยใช้เทคนิค SEM-EDS แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณองค์ประกอบของธาตุ C และ O ที่พบในสารตัวอย่าง

ชนิดตัวอย่าง	Atom Concentration (%)	
	C	O
HEMP	63.09	22.19
HEMP-C	83.77	5.47
HEMP-WC ที่ 450 วัตต์ นาน 5 นาที	86.07	11.81
HEMP-WC ที่ 600 วัตต์ นาน 5 นาที	86.95	10.93
HEMP-WC ที่ 800 วัตต์ นาน 1 นาที	87.02	11.88
HEMP-WC ที่ 800 วัตต์ นาน 3 นาที	92.49	5.68
HEMP-WC ที่ 800 วัตต์ นาน 5 นาที	90.74	7.65

จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนคงตัวสูงกว่าถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเตาเผาแบบแบบชุมชน และเศษลำต้นักัญชงตามลำดับ โดยการกระตุ้นที่สภาวะใช้กำลังไฟฟ้าที่ 800 วัตต์ นาน 3 นาที ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีองค์ประกอบของธาตุ C และ O ในสัดส่วนร้อยละ 92.49 และ 5.68 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นี้มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในปริมาณมากซึ่งมักพบในถ่านกัมมันต์ (Moonsri, 2021; Hesas et al., 2013) และการกระตุ้นโดยใช้รังสีไมโครเวฟที่สภาวะดังกล่าวนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุด

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเฉพาะของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน (HEMP-WC) เปรียบเทียบกับผงเศษลำต้นักัญชง (HEMP) และถ่านจากเศษลำต้นักัญชงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (HEMP-C) โดยใช้เทคนิค FTIR แสดงได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4. สเปกตรัมการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ของ HEMP-WC เปรียบเทียบกับ HEMP-C และ HEMP ตามลำดับ

จากสเปกตรัมของ HEMP แสดงพิกของการสั่นที่ช่วงความถี่ $3500-3200\text{ cm}^{-1}$ (O-H stretching, H-bonding of alcohols, phenol) ที่ช่วงความถี่ $1710-1665\text{ cm}^{-1}$ (α, β -unsaturated of aldehydes, ketones) ที่ช่วงความถี่ $1600-1585\text{ cm}^{-1}$ (C-C stretching (in-ring) aromatics) ที่ช่วงความถี่ $1320-1000\text{ cm}^{-1}$ (C-O stretching of alcohols, carboxylic acid, ester, ethers) แสดงให้ทราบว่าเศษลำต้นก่อนเผายังมีสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวปะปนอยู่ ขณะที่ HEMP-C สเปกตรัมที่ได้แสดงเพียงพิกของการสั่นที่ช่วงความถี่ $1600-1585\text{ cm}^{-1}$ ของ C-C stretching (in-ring) aromatics และพิกของการสั่นที่ช่วงความถี่ $900-675\text{ cm}^{-1}$ ของ C-H aromatics แสดงว่าสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของถ่านชาร์จากเศษลำต้นก่อนเผาได้ระเหยออกไป และจากสเปกตรัมของ HEMP-WC ที่ 800 วัตต์ นาน 3 นาที ได้แสดงพิกของการสั่นอย่างเด่นชัดที่ช่วงความถี่ $1600-1585\text{ cm}^{-1}$ (C-C stretching (in-ring) aromatics) เพียงตำแหน่งเดียว แสดงให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนคาร์บอน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาโดยใช้เทคนิค SEM-EDS ที่แสดงถึงร้อยละองค์ประกอบของธาตุ C ที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ (Meethai et al., 2024)

3. ความสามารถในการดูดซับและการกำจัดสีย้อม

ความสามารถในการดูดซับและการกำจัดสีย้อม MR จากคาร์บอนของ MR ที่ถูกกำจัดไปจากสารละลาย ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

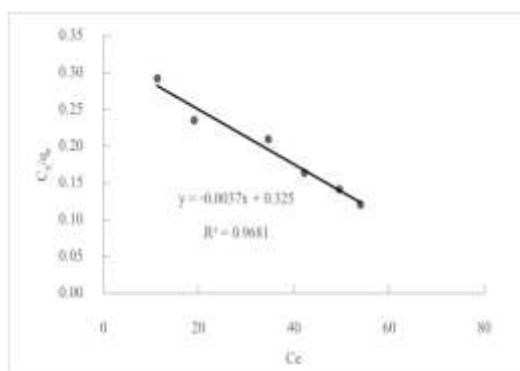
ตารางที่ 2 ความสามารถในการดูดซับและการกำจัดสีย้อม MR ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

ชนิดของตัวดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับและการกำจัด MR	
	MR removal (%)	qe (mg/g)
HEMP-C	77.41	232.24
HEMP-WC ที่ 800 W 1 นาที	81.97	245.91
HEMP-WC ที่ 800 W 3 นาที	85.94	257.81
HEMP-WC ที่ 800 W 5 นาที	80.51	241.54

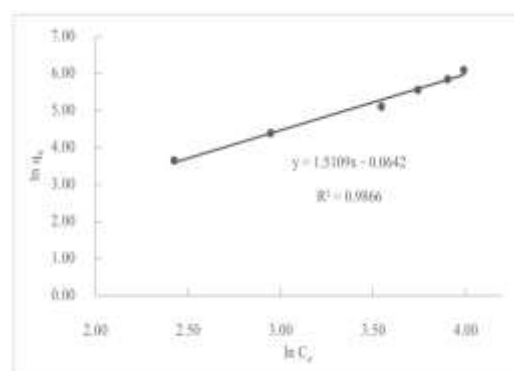
จากผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟมีความสามารถในการดูดซับและการกำจัดสีย้อม MR สูงกว่าถ่านที่เตรียมได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสจากเตาเผาแบบชุมชน โดยการกระตุ้นด้วยรังสีไมโครเวฟที่สภาวะ 800 วัตต์ นาน 3 นาที ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับและร้อยละของการกำจัดสีย้อม MR สูงสุด

4. การหารูปแบบของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

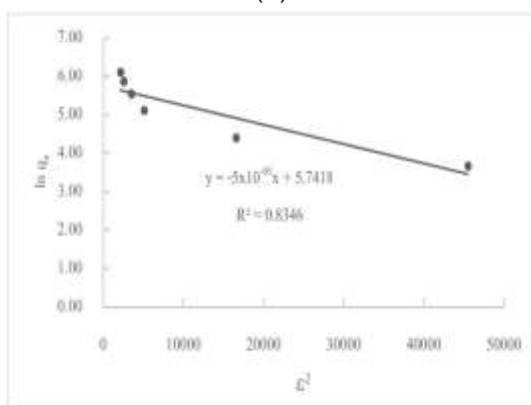
รูปแบบของการดูดซับสีย้อม MR โดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการของ Langmuir model, Freundlich isotherm และ Dubinin-Radushkevich model บนพื้นผิวของ HEMP-WC ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สภาวะ 800 วัตต์ นาน 3 นาที ซึ่งให้ข้อมูลความจุของตัวดูดซับและธรรมชาติของอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับ โดยค่าคงที่ไอโซเทอร์มที่คำนวณได้จากสมการสามารถนำไปหาความสามารถในการดูดซับสูงสุดรวมทั้งอธิบายความสัมพันธ์และคุณสมบัติพื้นผิวของตัวดูดซับได้ โดยผลที่ได้จากการสร้างกราฟไอโซเทอร์มแสดงได้ดังภาพที่ 5 ซึ่งพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมของ Langmuir model และ Freundlich isotherm จากค่า R^2 ที่มีค่าสูง และตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการพล็อตกราฟและที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 5 กราฟเชิงเส้นของแบบจำลอง (ก) Langmuir (ข) Freundlich และ (ค) Dubinin-Radushkevich สำหรับการดูดซับสีย้อม MR บนตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ HEMP-WC

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์การดูดซับที่ได้จากกราฟและการคำนวณตามสมการของ Langmuir, Freundlich และ Dubinin-Radushkevich

Isotherm Model	Parameter	Values of Methyl Red adsorption
The Langmuir isotherm	R^2	0.9681
$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m}$	Slope	-0.0037
	intercept	0.3250
	q_m (mg/g)	270.2703
	K_L (L/mg)	0.0114
The Freundlich isotherm	R^2	0.9866
$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e$	Slope	1.5109
	intercept	0.0642
	n	0.6619
	K_F (L/mg)	1.0663
The Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherm	R^2	0.8346
$\ln q_e = \ln q_m - K_D \mathcal{E}^2$	Slope	-0.00005
	intercept	5.7418
	q_m (mg/g)	311.6248
$\mathcal{E} = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right)$	K_D (L/mg)	0.00005

จากความสัมพันธ์ของกราฟไอโซเทอมตามรูปแบบการดูดซับของ Langmuir model แสดงได้ดังภาพที่ 5 (ก) พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9681 แสดงให้ทราบว่าการดูดซับ MR บนถ่านกัมมันต์เป็นไปตามรูปแบบของ Langmuir model ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) สำหรับรูปแบบการดูดซับตาม Freundlich isotherm แสดงถึงความหลากหลายของตัวดูดซับและการเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นผิว แสดงได้ดังภาพที่ 5 (ข) ซึ่งพบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9866 แสดงให้ทราบว่าการดูดซับ MR บนถ่านกัมมันต์เป็นไปตามรูปแบบการดูดซับของ Freundlich isotherm โดยค่า K_F และค่า n คือค่าคงที่ของ Freundlich ซึ่งแสดงถึงปริมาณการดูดซับและความหนาแน่นของการดูดซับ แสดงได้ดังตารางที่ 3 ซึ่งหากค่า K_F มีค่ามากแสดงถึงปริมาณการดูดซับมีมาก ส่วนค่า n หากมีค่าสูงแสดงว่ามีแรงดึงดูดที่แข็งแกร่งระหว่างสารตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (Meethai et al., 2024; Gul et al., 2022) สำหรับรูปแบบการดูดซับตาม Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherm จากภาพที่ 5 (ค) พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.8346 แสดงซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบของการดูดซับทั้งสองข้างต้นจึงนำไปใช้ในการอธิบายลักษณะของการดูดซับได้ไม่ดีเท่ากับการอธิบายลักษณะการดูดซับของทั้งสองรูปแบบข้างต้น โดยค่าคงที่ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากสมการ แสดงได้ดังตารางที่ 3

5. การหาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption thermodynamics)

เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์กันระหว่างพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ เช่น พลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) เอนทาลปี (ΔH^0) และเอนโทรปี (ΔS^0)

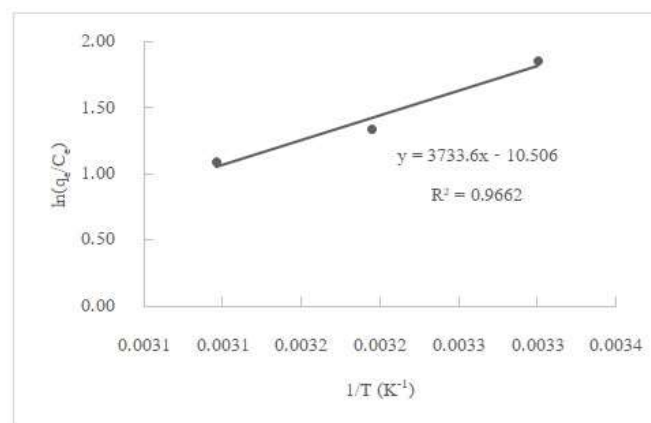
เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกถึงกระบวนการดูดซับ (Atkin and De Paula, 2014) โดย ΔH^0 และ ΔS^0 คำนวณหาได้โดยใช้ the Van't Hoff equation ดังนี้

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

เมื่อ K คือ q_e/C_e , R คือ the universal gas constant ($8.314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$) และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ซึ่ง ΔG^0 สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ(4)

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

จากผลของอุณหภูมิที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อม MR บนถ่านกัมมันต์ (HEMP-WC) ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สภาวะ 800 วัตต์ นาน 3 นาที ช่วงอุณหภูมิ 30-50°C พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด MR เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำๆ แสดงให้ทราบได้ว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน จากความสัมพันธ์ตามสมการของ the Van' t Hoff equation กราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln q_e/C_e$ และ $1/T$ สามารถใช้หาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS^0) และเอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH^0) ของการดูดซับจากความชันและจุดตัดที่ได้จากกราฟ (ภาพที่ 6) ซึ่งพบว่าค่า ΔH^0 เท่ากับ $-31.0412 \text{ kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ แสดงถึงกระบวนการแบบคายความร้อนที่เกิดขึ้น และเป็นการดูดซับทางกายภาพ สำหรับค่า ΔS^0 ซึ่งเท่ากับ $-0.0873 \text{ kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ แสดงถึงการลดลงของระดับความเป็นอิสระหรือความไม่เป็นระเบียบ (disorder) ของ MR ที่ถูกดูดซับบนผิวของ HEMP-WC ในสารละลาย (Gul et al., 2022; Meethai et al, 2024) โดยค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์แสดงดังตารางที่ 4 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพลังงานอิสระของกิบส์ที่คำนวณได้มีค่าเป็นลบ แสดงให้ทราบว่ากระบวนการดูดซับนี้เกิดขึ้นได้เอง โดยค่า ΔG^0 มีค่าเป็นลบน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นบ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับนี้เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิที่ต่ำ และอุณหภูมิที่ 303 K เป็นอุณหภูมิที่เกิดการดูดซับสีย้อม MR บนตัวดูดซับ HEMP-WC ได้มาก และอุณหภูมิของการดูดซับที่แตกต่างกันมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม MR บนถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 6 กราฟเชิงเส้นที่พล็อตระหว่าง $\ln q_e/C_e$ และ $1/T$ โดยใช้สมการของ Van't Hoff

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Adsorbate	ΔH (kJ/mol.K)	ΔS (kJ/mol.K)	ΔG (kJ/mol.K)		
			T=303 K	T = 313 K	T = 323 K
Methyl Red	-31.0412	-0.0873	-4.5750	-3.7016	-2.8281

สรุปผล

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษลำต้นกล้วย โดยการเผาด้วยเตาเผาแบบชุมชนและนำผงถ่านชาร์ที่ได้มากระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟจากเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ นาน 3 นาที ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟจะกระตุ้นให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีลักษณะโครงสร้างแบบรูพรุนขนาดไมครอน มีพื้นผิวสำหรับการดูดซับสูง มีองค์ประกอบของคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 92 สามารถกำจัดสีย้อม MR ในสารละลายสังเคราะห์ที่สภาวะที่กำหนดได้มากกว่าร้อยละ 85 จากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับพบว่าเข้ากันได้กับไอโซเทอมของ Langmuir model และ Freundlich isotherm มีค่าเทอร์โมไดนามิกส์พารามิเตอร์ $\Delta G < 0$ และ ΔH^0 เท่ากับ $-31.0412 \text{ kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบหลายชั้นและมีความหนาแน่นของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารตัวดูดซับ โดยกระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน ดังนั้นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษลำต้นกล้วยซึ่งเหลือทิ้งด้วยการไพโรไลซิสและผ่านการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้ มีคุณสมบัติเป็นสารตัวดูดซับที่ดีและสามารถนำไปใช้กำจัดสีย้อมเมทิลเรดได้ดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการเป็นสารดูดซับต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยเกษตรพื้นที่สูง อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบตัวอย่าง คุณประสิทธิ์ ตระการฤทธิ์ ที่สนับสนุนเตาเผาประดิษฐ์แบบชุมชน ตลอดจนศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Atkins, P. W., and De Paula, J., 2014, Atkins' physical chemistry. Oxford university press., 832-839.
- Bouزيد, T., Grich, A., Naboulsi, A., Regti, A., Tahiri, A. A., El Himri, M., and El Haddad, M. (2023). Adsorption of Methyl Red on porous activated carbon from agriculture waste: Characterization and response surface methodology optimization. *Inorganic Chemistry Communications*, 158, 111544.
- Christian, D., Gaekwad, A., Dani, H., Shabiimam, M. A., and Kandya, A. (2023). Recent techniques of textile industrial wastewater treatment: a review. *Materials Today: Proceedings*, 77, 277-285.
- 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 Res. J.* 1(1): 37-44.

- Du, C., Xue, Y., Wu, Z., and Wu, Z., 2017, Microwave-assisted one-step preparation of macadamia nut shell-based activated carbon for efficient adsorption of Reactive Blue. *New. J. Chem.* 41(24): 15373-15383.
- Gul, S., Kanwal, M., Qazi, R. A., Gul, H., Khattak, R., Khan, M. S., and Krauklis, A. E., 2022, Efficient removal of methyl red dye by using bark of hopbush. *Water*, 14(18): 2831.
- 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.
- Hesas, R. H., Arami-Niya, A., & Daud, W. M. A. W. (2013). Preparation and Characterization of Activated Carbon from Apple Waste by Microwave-Assisted Phosphoric Acid Activation: Application in Methylene Blue Adsorption. *BioResources*, 8(2).
- Meethai, S. Sikhamchin P., and 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., 2021, Properties of macadamia shell charcoal prepared by a small artificial furnace. *Journal of Vocational Institute of Agriculture*, 5(1): 28-39. (in Thai)
- Staf, M., Šrámek, V., and Pohořelý, M. (2023). The Preparation of a Carbonaceous Adsorbent via Batch Pyrolysis of Waste Hemp Shives. *Energies*, 16(3), 1202.
- Toptaş, Y., Yavuz, B., Aksoğan Korkmaz, A., and Önal, Y. (2024). Sustainable approach to dye adsorption: hemp-based activated carbon as an effective adsorbent. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-26.