

การดูดซับสีมาลาไคท์ กรีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก

Adsorption of malachite green using magnetic activated carbon

ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์^{1*}, ราตรี ฝาชัยภูมิ², ทัณญารัตน์ แก้วพิบูลย์²

Panjai Saueprasearsit^{1*}, Ratrei Fachaiyaphum², Tanyarat Kaewpitoon²

Received: 18 July 2022 ; Revised: 23 September 2022 ; Accepted: 10 October 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์ กรีน ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก (MAC) การศึกษาทั้งหมดอยู่ในรูปแบบการทดลองแบบกะ ปัจจัยการดูดซับที่สำคัญ ประกอบด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสีมาลาไคท์กรีนเริ่มต้น และอุณหภูมิ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ และอุณหพลศาสตร์การดูดซับ เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้น รวมถึงศึกษาการคายซับเพื่อประเมินวิธีการจัดการถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กที่ผ่านการดูดซับที่เหมาะสม

จากผลการศึกษา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีมาลาไคท์กรีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์ เชิงแม่เหล็ก คือ pH 5 ระยะเวลาสัมผัส 240 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับ ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่า สอดคล้องกับสมการอันดับสองเทียม แสดงว่ากระบวนการดูดซับทางเคมีเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ผลการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสของการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 357.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ พบว่า การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เองและเป็นปฏิกิริยา ดูดความร้อน นอกจากนี้ จากการศึกษาการคายซับ พบว่า สารละลายกรดสามารถใช้ในการชะสีมาลาไคท์ กรีน ออกจากถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กได้ อย่างไรก็ตาม จากประสิทธิภาพการคายซับที่ได้พบว่าไม่สูงมากนัก ดังนั้น วิธีการฝังกลบอย่างปลอดภัยจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะใช้ในการจัดการกับถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กหลังผ่านการดูดซับ จากผลการศึกษาทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กเป็นตัวดูดซับที่มีศักยภาพในการกำจัดสีมาลาไคท์ กรีน ออกจากน้ำเสีย

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก มาลาไคท์กรีน การดูดซับ

Abstract

This research studied the adsorption of malachite green (MG) in synthetic wastewater using magnetic-activated carbon (MAC). All experiments were conducted using the batch technique. Significant adsorption factors consisted of pH, contact time, initial MG concentration, and temperature. The adsorption isotherms, kinetics, and thermodynamics were investigated to explain the adsorption mechanisms. Furthermore, desorption was studied to evaluate the appropriate approach for management of spent adsorbent.

The results indicated that the optimal adsorption was pH 5, contact time of 240 minutes, initial MG concentration of 500 mg/L, and temperature of 60°C. The kinetics results indicated that the pseudo-second-order reaction model best described the adsorption process with chemisorption being the rate-limiting step. The equilibrium data fitted well with the Langmuir adsorption isotherm with a monolayer adsorption capacity of 357.14 mg/g at 333 K. Thermodynamic results showed that the sorption process was spontaneous and endothermic. Furthermore, the desorption results

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อาเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² นิสิตระดับปริญญาตรี, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อาเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Assistant Professor, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand

² Bachelor Degree Student, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand

* Corresponding author: Panjai Saueprasearsit, Email: panjai.s@hotmail.com

indicated that the acidic solution could leach adsorbed MG on MAC. However, the desorption efficiencies were not high so secured landfill is the suitable method for managing spent magnetic activated carbon. All the results suggested that MAC is a potential adsorbent for removing MG from wastewater.

Keywords: Magnetic activated carbon, Malachite green, Adsorption

บทนำ

สีมาลาโคท กรีน (Malachite green; MG) จัดเป็นสีสังเคราะห์ที่นิยมใช้สำหรับย้อมวัสดุต่างๆ เช่น ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ ฝ้าย และกระดาษ มีสูตรทางเคมี $C_{23}H_{25}N_2$ สีชนิดนี้เมื่อมีการปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำจะถูกดูดซึมและเปลี่ยนรูปเป็นลูโคมาลาโคท กรีน ในเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำและจะตกค้างเป็นระยะเวลานาน ซึ่งความเป็นพิษของมาลาโคท กรีน คือ ทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม ทำให้เกิดเนื้องอกที่ต่อมไทรอยด์/ตับ เป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสาหร่าย พืชน้ำ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำจืดและในทะเล (Almeida *et al.*, 2009) จากผลกระทบดังกล่าวจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการที่จะหาวิธีการที่เหมาะสมในการกำจัดสีมาลาโคท กรีน ออกจากน้ำเสีย ที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านที่ทำการศึกษากำจัดสีชนิดนี้โดยใช้วิธีการออกซิเดชันทางไฟฟ้าเคมี (Wang *et al.*, 2022) การสร้างและรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Getaye *et al.*, 2017) รวมถึงการดูดซับ (Sundararaman *et al.*, 2021 ; Jiang *et al.*, 2017) ในกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาการกำจัดสีมาลาโคท กรีน ด้วยการดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการดังกล่าวใช้หลักการขั้นพื้นฐาน เข้าใจง่าย ไม่จำเป็นต้องอาศัยผู้มีความรู้เชิงเทคนิคขั้นสูง ซึ่งโดยทั่วไปตัวดูดซับที่ใช้สำหรับวิธีการนี้ นิยมใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง มีรูพรุนและปริมาตรรูพรุนจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ ถ่านกัมมันต์แบบอนุภาคและแบบผง ซึ่งถึงแม้ว่าแบบผงจะมีพื้นที่ผิวที่สูงกว่ามากแต่ไม่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียเนื่องจากมีข้อจำกัดในการแยกออกจากน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดและหากใช้ในรูปแบบคอลัมน์ดูดซับถ่านกัมมันต์แบบผงจะอัดตัวกันแน่นจนยากที่น้ำเสียจะไหลผ่านได้ ในงานนี้ผู้วิจัยจึงสนใจนำถ่านกัมมันต์แบบผงมาทำการปรับสภาพให้เป็นถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก ซึ่งเป็นการสร้างให้เกิดอนุภาคของเหล็กออกไซด์จับอยู่ที่พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยใช้วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation Process) ซึ่งเป็นการตกตะกอนร่วมกันระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} เพื่อให้ได้เหล็กออกไซด์ที่มีความเสถียร (Mohan *et al.*, 2011) การจับของอนุภาคดังกล่าวทำให้ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กมีสภาพเหนียวนำเชิงแม่เหล็กเกิดขึ้น ดังนั้น หลังจากผ่านการดูดซับสามารถใช้แม่เหล็กเหนียวนำให้ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กที่ดูดซับอนุภาคสีไว้แล้วแยกออกจากน้ำเสียมารวมตัวกัน ทำให้

สามารถแยกน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดออกมาโดยง่ายวิธีการนี้สามารถลดระยะเวลา วัสดุและอุปกรณ์ และค่าใช้จ่าย เมื่อเทียบกับวิธีการแยกโดยวิธีอื่นเป็นอันมาก

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาคูณลักษณะของถ่านกัมมันต์ ศึกษาปัจจัยการดูดซับที่สำคัญ ศึกษากลไกการดูดซับ รวมถึงศึกษาการคายซับเพื่อหาวิธีการจัดการถ่านกัมมันต์หลังผ่านการดูดซับที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดดังนี้

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

สีมาลาโคท กรีน (Malachite green: MG) ในรูปของสารละลายเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้เป็น Stock Solution ทำการเตรียมโดยละลาย สีมาลาโคท กรีน หนัก 1.0 กรัม ด้วยน้ำกลั่น ใส่ในขวดวัดปริมาตร ปรับปริมาตรให้ได้เท่ากับ 1 ลิตรบรรจุลงในขวดเก็บสารเคมี เขียนรายละเอียดของข้อสาร เวลาการเตรียม ไว้บนฉลากหน้าขวด แล้วนำสารละลายดังกล่าวมาใช้เจือจางด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้ได้ความเข้มข้นต่างๆ ตามที่กำหนด

2. การเตรียมน้ำถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก

ทำการเตรียมโดยการนำสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3 \times 6H_2O$) 59.6 กรัมที่ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1,300 มิลลิลิตร และละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \times 7H_2O$) 73.18 กรัมที่ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร ผสมกันและให้ความร้อนจนอุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์แบบผง ของบริษัท DC FINE CHEMICALS) 164 กรัม ลงไปและคนให้เข้ากัน ปรับ pH โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 M-NaOH จน pH เพิ่มขึ้นเป็น 10-11 และกวนผสมต่ออีก 60 นาที จากนั้นยกลงจากเตาให้ความร้อนลดลง โดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล จากนั้นนำไปกรองแล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งข้ามคืน แล้วนำไปอบด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ (วัดถุดิบ) และถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM, Hitachi Model S3000N) with Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX), Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR, Bruker Model

Tensor 27), Vibrating Sample Magnetometer (VSM, LakeShore Model 7404), X-Ray Diffractometer (XRD, Bruker Model D2 phaser) และ Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer (Bel-Japan Model Bel Sorp mini II)

3. การศึกษาปัจจัยการดูดซับ

ปัจจัยการดูดซับที่สำคัญที่ทำการศึกษาคือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH 2-7) ระยะเวลาสัมผัส (0-600 นาที) ความเข้มข้นสีมาลาโคท์กรีนเริ่มต้น (100 - 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) และอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 องศาเซลเซียส) ทำการศึกษาในรูปแบบการทดลองแบบกะ มีการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและมีการทำ Blank เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเริ่มต้น ในการทดลองโดยแต่ละชุดการทดลองจะมีการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตรลงในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำแกมมันต์เชิงแม่เหล็ก 0.5 กรัม (ในขวดที่ไม่ใช่ Blank) การทดลองทำโดยใช้เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิได้ ทำการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ทุกการทดลองจะตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 30 องศาเซลเซียสยกเว้นการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาเขย่าจะมีการใช้แม่เหล็ก แรงดึงดูดสูงเหนี่ยวนำให้ถ่านแกมมันต์เชิงแม่เหล็ก รวมตัวกัน แล้วแยกเอาสารละลายส่วนที่ใสออก จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่อง Shimadzu Spectrophotometer UV-1900 ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับ (ร้อยละ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 (Kushwaha *et al.*, 2011)

$$\% \text{ Dye removal} = ((C_1 - C_2) / C_1) \times 100 \quad (1)$$

$$q = ((C_1 - C_2) \times V) / M \quad (2)$$

โดย C_1 คือ ความเข้มข้นของสีมาลาโคท์กรีนเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร), C_2 คือ ความเข้มข้นของสีมาลาโคท์กรีนที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร), V คือ ปริมาตรของ สีมาลาโคท์กรีน (ลิตร) และ M คือ มวลของถ่านแกมมันต์เชิงแม่เหล็ก (กรัม)

4. การศึกษากลไกการดูดซับ

การศึกษากลไกของการดูดซับ โดยใช้จลนพลศาสตร์การดูดซับ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับตั้งแต่การเคลื่อนที่ของอนุภาคสีมาลาโคท์กรีน ไปยึดจับ/ดูดซับบนพื้นที่ผิวของถ่านแกมมันต์เชิงแม่เหล็กกว่าขั้นตอนใดเป็นขั้นตอนในการควบคุมอัตราเร็วของการดูดซับ (จลนพลศาสตร์การดูดซับ) การ

ดูดซับมีรูปแบบเป็นอย่างไร มีปัจจัยใดที่มีผลต่อการดูดซับ (ไอโซเทอร์มของการดูดซับ) และการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบไหน เกิดขึ้นเองได้หรือไม่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอะคายความร้อนหรือดูดความร้อน ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ง่ายหรือยาก (อุณหพลศาสตร์การดูดซับ) จะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จะมีความเชื่อมโยงกันและสามารถอธิบายกลไกของการดูดซับได้อย่างครบถ้วน

4.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองระยะเวลาสัมผัสมาใช้หาความสัมพันธ์กับสมการ Pseudo First Order Reaction, Pseudo Second Order Reaction และ Intraparticle Diffusion ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Pseudo First Order Reaction: สมมติฐานของสมการนี้ คือ อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของสีมาลาโคท์กรีนที่อยู่ในสารละลายมายังพื้นที่ผิวของถ่านแกมมันต์เชิงแม่เหล็ก (Lagergren, 1898)

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1 / 2.303) t \quad (3)$$

Pseudo Second Order reaction: สมมติฐานของสมการนี้ คือ อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของสีมาลาโคท์กรีนผ่านชั้นฟิล์มบนพื้นที่ผิวของถ่านแกมมันต์เชิงแม่เหล็ก หรือทำปฏิกิริยาที่พื้นที่ผิวของถ่านแกมมันต์เชิงแม่เหล็ก (การดูดซับทางเคมี) (Ho and McKay, 1999)

$$t / q_t = (1 / (k_2 q_e^2)) + (1 / q_e) t \quad (4)$$

Intraparticle Diffusion: สมมติฐานของสมการนี้ คือ อัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับที่แพร่เข้าไปยังภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (Weber & Morris, 1963)

$$q_t = k_d t^{0.5} + C \quad (5)$$

โดยที่ k_1 (นาที⁻¹), k_2 (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที) และ k_d (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที^{0.5}) คือ ค่าคงที่อัตรา (Rate Constant) ในการดูดซับจากแบบจำลองทั้งสามข้างต้น q_t คือ ความสามารถในการดูดซับของถ่านแกมมันต์เชิงแม่เหล็ก ณ เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม), t คือ ระยะเวลา (นาที) และ C คือ ค่าคงที่ของสมการ Intraparticle Diffusion (มิลลิกรัมต่อกรัม)

4.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือการศึกษาความเข้มข้นของสีมาลาโคท์ กรีนเริ่มต้นและอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับมาใช้ในการคำนวณกับสมการของไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Langmuir Isotherm: สมมติฐานของไอโซเทอร์มรูปแบบนี้ คือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ปัจจัยการดูดซับที่สำคัญ คือ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดของรูพรุน และขนาดของตัวถูกดูดซับ ลักษณะสอดคล้องกับการดูดซับทางเคมีที่ตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ สมการที่ใช้ ประกอบด้วย

$$C_e / q_e = (1 / q_m) C_e + 1 / (q_m b) \quad (6)$$

หรือ

$$1 / q_e = (1 / (q_m b)) (1 / C_e) + 1 / q_m \quad (7)$$

Frundlich Isotherm: สมมติฐานของไอโซเทอร์มรูปแบบนี้ คือ เป็นการดูดซับแบบมากกว่าหนึ่งชั้น (Multilayer) ปัจจัยการดูดซับที่สำคัญนอกเหนือจากที่กล่าวใน การดูดซับแบบชั้นเดียวแล้วจะรวมถึงแรงปฏิริยาระหว่างชั้นของตัวถูกดูดซับด้วย

$$\log q_e = \log K_f + (1/n) \log C_e \quad (8)$$

โดยที่ q_e คือ ค่าความสามารถในการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม), C_e คือ ความเข้มข้นของสีมาลาโคท์ กรีน ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร), q_m และ K_f คือความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ ถ่านกัมมันต์ เชิงแม่เหล็ก, b ค่าคงที่ของสมการ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ $1/n$ คือ ค่าคงที่ของสมการ Freundlich ตามลำดับ (Kumar *et al.*, 2006)

4.3 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิมาใช้ในการคำนวณดังสมการ

$$\ln K_L = (\Delta S^0 / R) - (\Delta H^0 / R) T \quad (9)$$

โดยที่ ค่า K_L คำนวณได้จากค่าคงที่ของ Langmuir (พลวัฒน์ และคณะ, 2559) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

$$K_L = 1/b \quad (10)$$

จากสมการที่ (9) เมื่อทำการพล็อตกราฟหาค่า DS^0 และ ΔH^0 จะสามารถหาค่า ΔG^0 ได้จากสมการ

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (11)$$

โดยที่ K_L คือ ค่าคงที่สมดุล thermodynamics ของการดูดซับ, DS^0 คือ ค่าเอนโทรปี (จูลต่อโมล-เคลวิน), ΔH^0 คือ ค่าเอนทาลปี (กิโลจูลต่อโมล), ΔG^0 คือ พลังงานอิสระ (กิโลจูลต่อโมล), R คือ ค่าคงที่ของก๊าซในอุดมคติเท่ากับ 8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน (Nandi *et al.*, 2009)

5. การศึกษาการคายซับ

ในการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาการคายซับโดยใช้สารละลายจำนวนทั้งสิ้น 3 ชนิด ประกอบด้วย น้ำกลั่น สารละลายกรดแอสติกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยทำการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นและระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาปัจจัยการดูดซับ สำหรับอุณหภูมิทั้งดูดและคายซับใช้ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับประสิทธิภาพการคายซับ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$D = C_d / (C_1 - C_2) \times 100 \quad (12)$$

โดยที่ D คือ ประสิทธิภาพการคายซับ (ร้อยละ) และ C_d ความเข้มข้นของสีมาลาโคท์ กรีน ที่พบในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ผลการศึกษา

1. การศึกษาคูณสมบัติของวัสดุดูดซับ

การศึกษาคูณสมบัติของวัสดุดูดซับแสดงลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

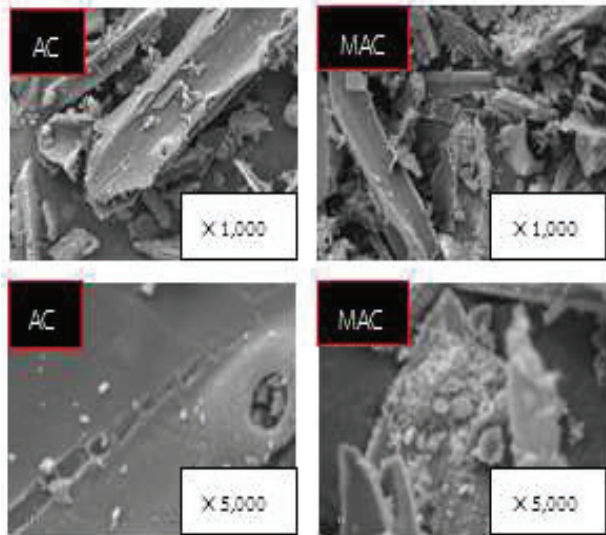


Figure 1 SEM Spectra of AC and MAC

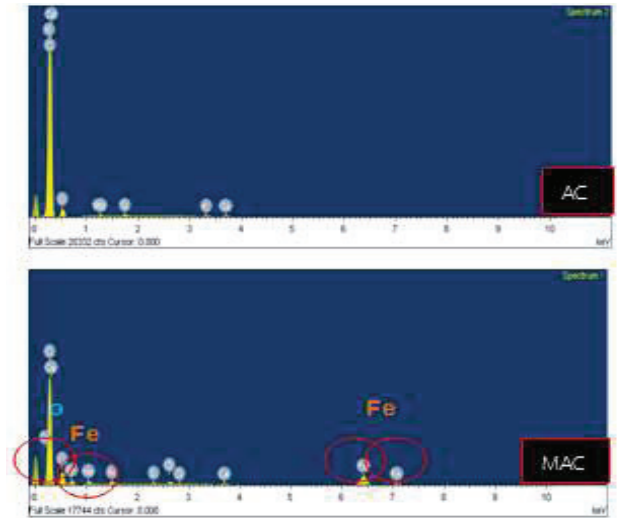


Figure 2 EDX spectra of AC and MAC

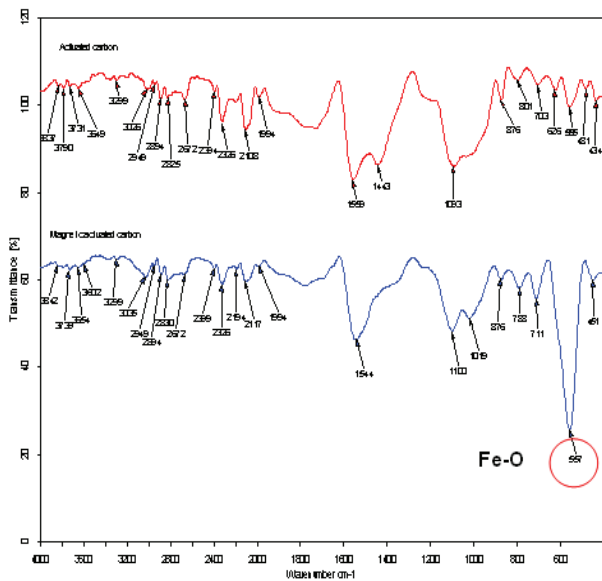


Figure 3 FTIR spectra of AC and MAC

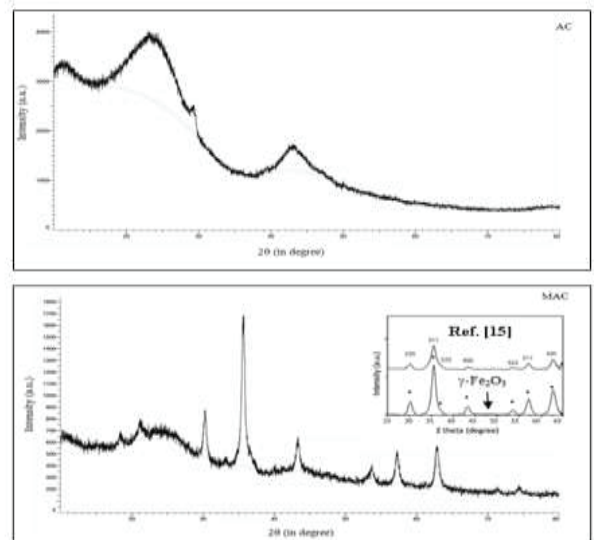
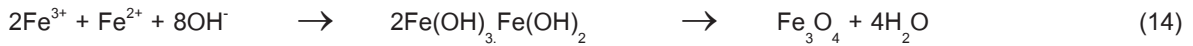


Figure 4 XRD spectra of AC and MAC

จาก Figure 1 พบว่า ภาพพื้นที่ผิวของ ถ่านกัมมันต์ (AC) และ ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก (MAC) ที่ใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า ไม่เห็นถึงความแตกต่างของพื้นที่ผิวของทั้งสองวัสดุ แต่เมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่า เห็นได้ว่าพื้นที่ผิวของ ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กมีอนุภาคขนาดเล็กมาจับเกาะบนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าอนุภาคนั้นเป็นอนุภาคของเหล็กออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเตรียม อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้มีการศึกษาองค์ประกอบของธาตุเพื่อยืนยันถึงการเกิดเหล็กออกไซด์ ซึ่งจากผลของเครื่อง EDX (Figure 2) พบว่า ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กมีร้อยละของธาตุออกซิเจนและธาตุเหล็กเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้

เมื่อพิจารณาจากผลที่ได้จากเครื่อง FTIR ใน Figure 3 พบว่า ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กพบพีคที่ความยาวคลื่น 557 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการแสดงถึงการมีอยู่ของพันธะ Fe-O (Chen *et al.*, 2019) ดังนั้น จึงยืนยันได้เบื้องต้นว่ามีการเกิดเหล็กออกไซด์บนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก สำหรับรูปของเหล็กออกไซด์สามารถอธิบายได้ด้วยผลจาก XRD ดัง Figure 4 จากที่ได้พบว่า มีพีคขึ้นที่ $2\theta = 30.24^\circ(877)$, $35.71^\circ(1685)$, $43.35^\circ(648)$, $53.75^\circ(411)$, $57.12^\circ(466)$, and $63.31^\circ(344)$ ซึ่งลักษณะของพีคสอดคล้องกับเหล็กออกไซด์ในรูปของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ โดยสมการที่ทำให้เกิดรูปดังกล่าวเป็นดังสมการ (14) - (15) (Ajinkya *et al.*, 2020)



จากการที่มีเหล็กออกไซด์จับอยู่ที่พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กทำให้เกิดความสามารถในการเหนี่ยวนำเชิงแม่เหล็ก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความสามารถในการเหนี่ยวนำเชิงแม่เหล็กที่ได้จากเครื่อง VSM ดัง Figure 5 จากภาพเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กที่ผลิตขึ้นมีความสามารถในการเหนี่ยวนำเชิงแม่เหล็กเท่ากับ 11.205 หน่วยสนามแม่เหล็กต่อกรัม (emu/g) แตกต่างจากถ่านกัมมันต์ที่มีค่าดังกล่าวอย่างมากอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการเตรียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถผลิตถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กได้จริง และนอกจากคุณสมบัติทั้งหมดข้างต้น เนื่องจากมักมีผู้ตั้งข้อสงสัยเกี่ยวกับการลดลงของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ เนื่องจากการดูดซับเหล็กออกไซด์ไว้บนพื้นที่ผิว ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ได้ผลดัง Table 1 จากตารางดังกล่าวเห็นได้ว่า

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนมีค่าลดลงทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเข้าไปยึดจับหรือดูดซับของอนุภาคเหล็กออกไซด์ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Mohan *et al.* (2011) พบว่า ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กมีพื้นที่ผิวลดลง แต่ด้วยผลของเหล็กออกไซด์ที่จับกับพื้นที่ผิวของ ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กที่สามารถเกิดกลุ่มฟังก์ชันนอลที่เป็นประจุลบที่พื้นที่ของถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก ทำให้เพิ่มขีดความสามารถในการดูดซับให้แก่ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กได้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนควรทำการศึกษาวัสดุทั้งสองชนิดไว้ควบคู่กัน แต่เนื่องจากคุณสมบัติการแยกออกที่ต่างกันมาก ทำให้มีข้อจำกัด ต่อการควบคุมสภาวะที่เกิดขึ้นในการทดลอง ขอบเขตในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเฉพาะในส่วนของถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กเท่านั้น

Table 1 Surface area, total pore volume and mean meter of AC and MAC

Absorbent	Surface Area (m ² /g)	Total Pore Volume (cm ³ /g)	Mean Pore Diameter (nm)
AC	749.93	0.68	3.92
MAC	571.45	0.56	3.91

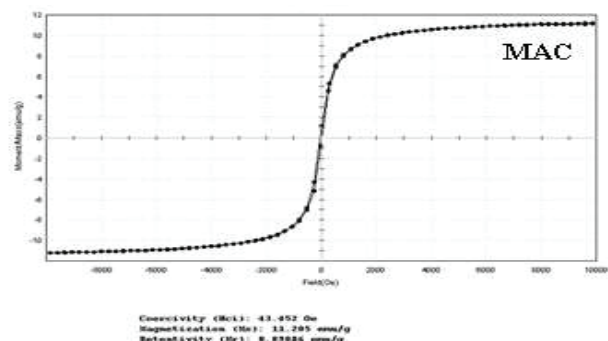
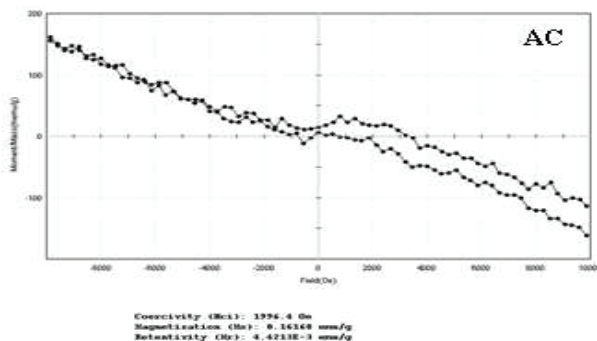


Figure 5 VSM spectra of AC and MAC

2. ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.1 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ในการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างในงานวิจัยนี้ เนื่องจากในขั้นตอนการทดลองไม่มีการเติมบัฟเฟอร์เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลง/ควบคุมของค่าความเป็นกรด-ด่างขณะทำการทดลอง ดังนั้น ค่าความเป็นกรด-ด่างที่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้จะเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ซึ่งจากผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ ค่าความเข้มข้นของสีมาลาโคท์

กรีน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ pH 2-7 ได้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงมากและไม่แตกต่างกันมากอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 98.06 - 99.10 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กมีพื้นที่ผิวสูงมาก ทำให้สามารถดูดซับได้เกือบ 100% เป็นผลให้สังเกตเห็นผลของค่าความเป็นกรด-ด่างไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงโดยการขยายสเกลพบ ค่าดัง Figure 6

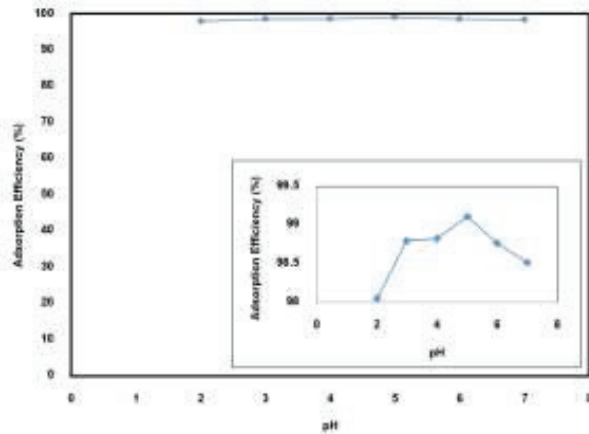


Figure 6 Effect of pH

จาก Figure 6 ที่ pH ต่ำ ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าต่ำทั้งนี้เนื่องจากในสารละลายมี H^+ สูงทำให้เกิดการแย่งจับระหว่างอนุภาคของสีที่เป็นประจุบวก (Muinde *et al.*, 2017) และสารละลาย H^+ กับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก และเมื่อค่า pH มากขึ้น H^+ มีปริมาณลดลง ประสิทธิภาพการดูดซับจึงสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อ pH ตั้งแต่ 6 ขึ้นไปเกิดการตกตะกอนของอนุภาคสี (สังเกตจากผลที่เกิดขึ้นกับ Blank) ทำให้ค่า pH ที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ pH 5 เนื่องจากในสภาวะดังกล่าว การลดลงของความเข้มข้นที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการดูดซับเท่านั้น

2.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัส

ผลการดูดซับสีมาลาโคทกรีน (Malachite green) ด้วยถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีมาลาโคทกรีนที่แตกต่างกัน เป็นดัง Figure 7 จากผลดังกล่าว พบว่า ในระยะแรกการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพื้นที่ว่างบนถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กยังมีเป็นปริมาณมาก จากนั้นอัตราเร็วในการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง พร้อมทั้งเกิดทั้งในส่วนของการดูดซับและการคายซับ โดยจุดที่อัตราการดูดซับ = อัตราการคายซับ จะเรียกว่า “จุดสมดุลของการดูดซับ” โดยหลังจากจุดนี้ ประสิทธิภาพการดูดซับจะคงที่ (Namcharee *et al.*, 2018) ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ จุดสมดุลของการดูดซับ ซึ่งเกิดที่ 240 นาที และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีมาลาโคทกรีนที่แตกต่างกัน พบว่า อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นมีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ

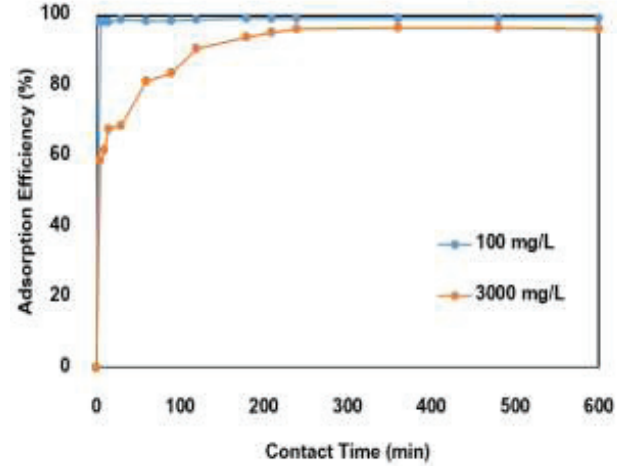


Figure 7 Effect of contact time

2.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสีมาลาโคทกรีน เริ่มต้น และอุณหภูมิ

ผลการศึกษาความเข้มข้นของสีมาลาโคทกรีน เริ่มต้นเป็นไปดัง Figure 8 จากภาพแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับสีมาลาโคทกรีน มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีมาลาโคทกรีนเริ่มต้นมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากในสภาวะที่มีความเข้มข้นสูง สารละลายเต็มไปด้วยอนุภาคของสีมาลาโคทกรีน ทำให้โอกาสที่อนุภาคของสีมาลาโคทกรีนเข้าไปยึดจับหรือดูดซับกับถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กมีมากขึ้น และเมื่อคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสีมาลาโคทกรีนเริ่มต้นต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาแล้วพบว่า ค่าความเข้มข้นของสีมาลาโคทกรีนเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงข้างต้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อ ความเข้มข้นสูงกว่าค่าดังกล่าว สำหรับผลของอุณหภูมินั้นจะเห็นได้ว่าให้ผลที่ไม่ชัดเจนนัก ทั้งนี้ปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนโดยเฉพาะที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้น อาจเนื่องมาจากที่สภาวะดังกล่าว อนุภาคของสีมาลาโคทกรีนเกิดการชนกันและจับตัวกันตกตะกอน ทำให้ความเข้มข้นของสีในสารละลายมีค่าลดลง (พิจารณาจากผลการทดลองที่ความเข้มข้น ของสีมาลาโคทกรีนที่วัดจาก Blank มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นและอุณหภูมิสูงขึ้น) อย่างไรก็ตามการสรุปอุณหภูมิที่ดีที่สุดจะพิจารณาร่วมกับผลที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับและ อุณหพลศาสตร์การดูดซับที่จะกล่าวถึงต่อไป

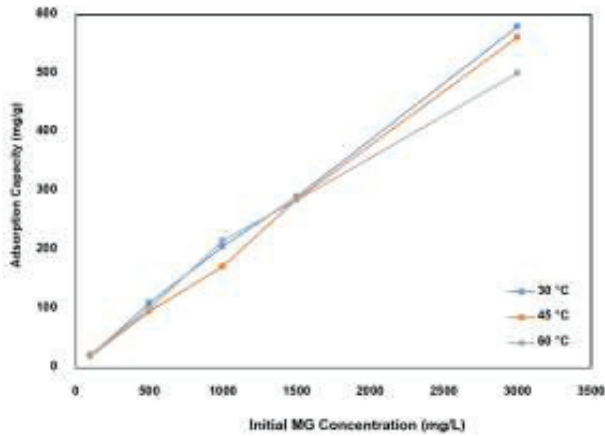


Figure 8 Effect of initial MG concentration and temperature

3. การศึกษากลไกของการดูดซับ

3.1 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้สมการ Pseudo-First-Order Reaction, Pseudo-Second-Order Reaction และ Intraparticle Diffusion พบว่า ได้ผลดัง Table 2

Table 2 The results of adsorption kinetics

Concentration (mg/L)	Pseudo-First-Order Reaction			Pseudo-Second-Order Reaction			Intraparticle Diffusion		
	q_e (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	q_e (mg/g)	k_2 (g/mg/min)	R^2	k_{id} (mg/(g.min ^{0.5}))	C (mg/g)	R^2
100	1.879	0.002	0.201	20.83	0.006	0.998	0.115	17.7	0.647
3,000	287.74	0.007	0.988	76.92	0.169	0.994	12.04	335	0.762

จาก Table 2 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับสมการ Pseudo-Second-Order Reaction แสดงให้เห็นว่า อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างอนุภาคสีมาลาโคท์ กรีนและถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก โดยค่าคงที่อัตราในการดูดซับที่ได้จากสมการดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.006 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที่ และ

0.169 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที่ ที่ความเข้มข้นของสีมาลาโคท์ กรีน เริ่มต้นเท่ากับ 100 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการ ไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich พบว่า ได้ผลดัง Table 3

Table 3 The results of adsorption isotherms

Temp. (°C)	Langmuir			Freundlich		
	q_m (mg/g)	b (L/mg)	R^2	K_f (mg/g)	1/n	R^2
30	263.16	0.088	0.997	22.39	0.605	0.990
45	312.50	0.067	0.997	23.50	0.575	0.969
60	357.14	0.050	0.996	26.30	0.553	0.948

Table 4 Monolayer adsorption capacity of different adsorbents for the elimination of MG dye

Absorbent	q_m (mg/g)	Reference
Alg-Fe ₃ O ₄ nanoparticles	47.84	Mohammadi <i>et al.</i> (2014)
Conch shell powder	92.3	Chowdhury and Das (2011)
Nylon microplastics	63.48	Lin <i>et al.</i> (2020)
Coconut AC	83.06	Qu <i>et al.</i> (2019)
Magnetic Activated Carbon	357.14	This reasearch

จาก Table 3 การดูดซับที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับไอโซเทอรั่มของ Langmuir แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งปัจจัยการดูดซับที่สำคัญคือ พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กและขนาดของอนุภาค สีมาลาไคท์ กรีน และจากผลการศึกษาข้างต้นเมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแนวโน้มที่การดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) และค่าสูงสุดอยู่ที่ 357.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเป็นค่าที่สูงมากดังแสดงไว้ใน Table 4

3.3 ผลการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ

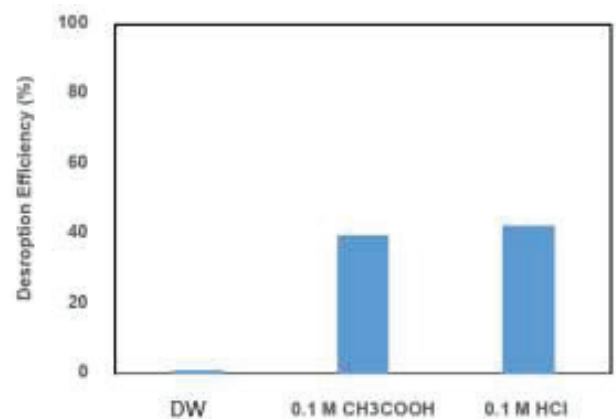
ผลการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้ค่าคงที่ของ Langmuir ในการคำนวณหาค่า K_L พบว่า สามารถหาค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ได้ดัง Table 5 จากตารางดังกล่าวจะให้เห็นว่า DG^0 มีค่าเป็นลบ แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เอง (Spontaneous Reaction) และ DH^0 มีค่าเป็นบวกแสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) นอกจากนี้ DS^0 มีค่าเป็นบวกแสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย และจากผลจากไอโซเทอรั่มการดูดซับและอุณหพลศาสตร์การดูดซับสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ คือ 60 องศาเซลเซียส

Table 5 The results of adsorption thermodynamics

Temp. (°C)	Temp. (K)	ΔG^0 (kJ/mol)	ΔH^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (J/mol.K)
30	303	-6.11		
45	318	-7.19	+15.78	+72.24
60	333	-8.28		

4. ผลการศึกษาคายซับ

จากการศึกษาคายซับสีมอลาไคท์ กรีน โดยใช้ น้ำกลั่น DI กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 M และกรดแอซิติก (CH₃COOH) 0.1 M ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ซึ่งผลการศึกษาแสดงได้ดัง Figure 9

**Figure 9** Desorption efficiencies of various leaching agents

จาก Figure 9 แสดงให้เห็นว่า สารละลายกรดสามารถใช้ในการชะสีมาลาโคท์ กรีน ได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่กรดมี H^+ ทำให้เข้าไปแทนที่สีที่มีประจุบวกที่ถูกดูดซับไว้บนถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก และเมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากการใช้กรดต่างชนิดกันที่ความเข้มข้นเดียวกันพบว่า กรดไฮโดรคลอริกซึ่งเป็น กรดแก่ มีความสามารถแตกตัวให้โปรตอน (H^+) ได้มากกว่า กรดแอซิติคซึ่งเป็นกรดอ่อนเมื่อนำมาใช้ในการศึกษาการคายซับจึงทำให้กรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพในการคายซับดีกว่าอย่างไรก็ตาม เนื่องจากประสิทธิภาพการคายซับไม่สูงมากนัก ดังนั้นการฝังกลบอย่างปลอดภัยเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการกับถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กหลังผ่านการดูดซับ สีมาลาโคท์ กรีนแล้ว

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก พบว่า ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กที่ผลิตได้มีอนุภาคของเหล็กออกไซด์ในรูปแบบของ $g-Fe_2O_3$ ยึดจับอยู่บนพื้นผิว และมีความสามารถในการเหนี่ยวนำเชิงแม่เหล็ก จากการศึกษาปัจจัยการดูดซับที่สำคัญ สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีมาลาโคท์ กรีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็ก คือ ที่ pH 5 ระยะเวลาสัมผัส 240 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษากลไกการดูดซับ พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second-order Reaction และสมการไอโซเทอร์มของ Langmuir แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับทางเคมีเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 357.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และการศึกษา อุณหพลศาสตร์การดูดซับพบว่า การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง (Spontaneous Reaction) และเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) นอกจากนี้ จากการศึกษาการคายซับ พบว่า สารละลายกรดสามารถใช้ในการชะสีมาลาโคท์ กรีน ออกจากถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กได้ แต่จากประสิทธิภาพการคายซับที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้น จึงควรจัดการถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กหลังผ่านการดูดซับโดยการนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย จากผลการศึกษาทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์เชิงแม่เหล็กเป็นตัวดูดซับที่มีศักยภาพในการกำจัดสีมาลาโคท์ กรีน ออกจากน้ำเสีย

เอกสารอ้างอิง

- Ajinkya, N., Yu, X., Kaithal, P., Luo, H., Somani, P., Ramakrishna, S. (2020). Magnetic iron oxide nanoparticle (IONP) synthesis to applications: Present and future. *Materials*, 13, 4644 (1-35). DOI: 10.3390/ma13204644
- Almeida, C.A.P., Debacher, N.A., Downs, A.J., Cottet, L., Mello, C.A.D. (2009). Removal of methylene blue from colored effluents by adsorption on montmorillonite clay. *Journal of Colloid and Interface Science*, 332, 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.12.012>.
- Chen, Q., Zheng, J., Yang, Q., Dang, Z., Zhang, L. (2019). Insights into the Glyphosate Adsorption Behavior and Mechanism by a $MnFe_2O_4@Cellulose$ -Activated Carbon Magnetic Hybrid. *Applied Materials & Interfaces*, 11, 15478-15488. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.8b22386>.
- Chowdhury, S., Das, P. (2011). Mechanistic, kinetic, and thermodynamic evaluation of adsorption of hazardous malachite green onto conch shell powder. *Separation Science and Technology*, 46(12), 1966-1976. DOI:10.1080/01496395.2011.584930.
- Getaye, M., Hagos, S., Alemu, Y., Tamene, Z., Yadav, O.P. (2017). Removal of malachite green from contaminated water using Electro-Coagulation technique. *Journal of Analytical & Pharmaceutical Research*, 6(4), DOI: 10.15406/japlr.2017.06.00184.
- Ho, Y.S., McKay, G. (1998). Sorption of dye from aqueous solution by peat. *Chemical Engineering Journal*, 70(2), 115-124. <https://doi.org/10.1016/S0923-00076-1>.
- Jiang, F., Dinh, D. M., Hsieh, Y. L. (2017). Adsorption and desorption of cationic malachite green dye on cellulose nanofibril aerogels. *Carbohydrate Polymers*, 173, 286-294. [https://doi.org/10.1016/0467\(98\)j.carbpol.2017.05.097](https://doi.org/10.1016/0467(98)j.carbpol.2017.05.097).
- Kumar, K.V., Ramamurthi, V., Sivanesan, S. (2006). Biosorption of malachite green, a cationic dye onto *Pithophora* sp, a fresh water algae. *Dyes Pigments*, 69, 102-107. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.02.005>

- Kushwaha, A.K., Gupta, N., Chattopadhyaya, M.C. (2014). Removal of cationic methylene blue and malachite green dyes from aqueous solution by waste materials of *Daucus carota*. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18(3), 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2014.05.019>.
- Lagergren, S. (1898). About the theory of so called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24, 1-39.
- Lin, L., Tang, S., Wang, X., Sun, X., Yu, A. (2020). Adsorption of malachite green from aqueous solution by nylon microplastics: reaction mechanism and the optimum conditions by response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 140, 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.019>.
- Mohammadi, A., Daemi, H., Barikani, M. (2014). Fast removal of malachite green dye using novel superparamagnetic sodium alginate-coated Fe₃O₄ nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 69, 447-455. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.05.042>.
- Mohan, D., Sarswat, A., Singh V.K., Franco M.A., Pittman Jr., U. (2011). Development of magnetic activated carbon from almond shells for trinitrophenol removal from water. *Chemical Engineering Journal*, 172(2-3), 1111-1125. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.06.054>.
- Muinde, V., Onyari J.M., Wamalwa, B.M., Wabomba, J. (2017). Adsorption of Malachite Green from Aqueous Solutions onto Rice Husks: Kinetic and Equilibrium Studies. *Journal of Environmental Protection*, 8(3), 215-230. DOI:10.4236/jep.2017.83017.
- Namcharee, N., Sueprasearsit, P., Prabamroong, T. (2018). Adsorption of Nickel (Ni²⁺) Using Rice Husk and Modified Rice Husk. *Journal of Science and Technology MSU*, 37(3), 248-259.
- Nandi, B.K., Goswami, A., Purkait, M.K. (2009). Adsorption characteristics of brilliant green dye on kaolin. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.110>.
- Qu, W., Yuan, T., Yin, G., Xu, S., Zhang, Q., Su, H. (2019). Effect of properties of activated carbon on malachite green adsorption. *Fuel*, 249, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.058>.
- Sundararaman, T. R., Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Millicent Mabel, M., Hemavathy, R. V., Karishma, S., Jeevanantham, S., Hemavathi, R., Ishwariya, A., Kowsalya, S. (2021). Adsorptive removal of malachite green dye onto coal-associated soil and conditions optimization. *Adsorption Science & Technology*, Article ID 5545683, <https://doi.org/10.1155/2021/5545683>.
- Wang, L., Wang, J., Yu, A., Yu, Z. (2002). Removal of malachite green by electrochemical oxidation polymerization and electrochemical reduction precipitation: its kinetics and intermediates. *Journal of Solid State Electrochemistry*, <https://doi.org/10.1007/s10008-022-05242-7>.
- Weber, J., Morris, J.C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89, 31-60.