



จลนศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยตัวดูดซับไมยราบยักษ์

Kinetic and Isotherms Studies of Hexavalent Chromium Adsorption by

Mimosa pigra L. Adsorbents

ณัฐพงศ์ ดิษฐเจริญ¹ ทักษพร นิลละอ² วิลัยลักษณ์ สวนมะลิ³ กฤษณะ จันท⁴ และปรีชา ปัญญา^{2*}

Nutthapong Discharoen¹, Taksaporn Nillaor², Wilailak Suanmali³, Kritsana Janthorn⁴ and Preecha Panya^{2*}

¹โปรแกรมวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62000

²โปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62000

³โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62000

⁴คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62000

¹Physics Program, Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet 62000

²Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet 62000

³Environmental Science Program, Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet

⁴Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet 62000

*Corresponding author, e-mail: preecha@kpru.ac.th

(Received: Oct 10, 2022; Revised: Dec 13, 2022; Accepted: Dec 14, 2022)

บทคัดย่อ

เฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นสารอันตรายต่อชีวิตที่สามารถปนเปื้อนได้ทั้งในดินและน้ำ การกำจัดสารนี้จึงมีความสำคัญและทำได้หลายวิธี การดูดซับซึ่งสามารถใช้ตัวดูดซับจากวัชพืชจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความสนใจมากในปัจจุบัน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตตัวดูดซับไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์โดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น ศึกษาพื้นที่ผิวตัวดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์มบีโธของการดูดซับแก๊สไนโตรเจน วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพื้นที่ผิวของไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์มีค่าเท่ากับ 406.20 และ 796.75 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ นำไปศึกษาจลนศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้วิธีการดูดซับแบบกะ วิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมหลังการดูดซับโดยใช้เครื่องเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่า แบบจำลองจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับของทั้งสองตัวดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และปริมาณการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลหลังจากเวลา 60 นาที ปริมาณการดูดซับสูงสุดมีค่า 77.52 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ย พฤติกรรมการดูดซับของทั้งสองเป็นแบบไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ การเตรียมตัวดูดซับทั้งสองชนิดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับและเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียและเป็นการนำต้นไมยราบยักษ์มาใช้ให้เกิดประโยชน์

คำสำคัญ : ไมยราบยักษ์ เฮกซะวาเลนต์โครเมียม ถ่านกัมมันต์ การดูดซับ ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

Abstract

Hexavalent chromium is a dangerous substance to living things and can contaminate into soil and water. Disposal this substance is very important and can be done in several ways. Adsorption by using adsorbent made from weed is another way which getting a lot of attention nowadays. This study is aimed to produce adsorbent from modified *Mimosa pigra* L. and activated carbon from *Mimosa pigra* L. using $ZnCl_2$ as an activated agent. BET isotherm of nitrogen adsorption was conducted to identify the surface area value of the adsorbents. Scanning electron microscope was used to analyze the surface morphology of the adsorbents. The results showed that the surface area of modified *Mimosa pigra* L. and activated carbon from *Mimosa pigra* L. are 406.20 and 796.75 m^2/g , respectively. The batch adsorption method was used to study kinetic and isotherm adsorption of hexavalent chromium. The flame atomic adsorption spectrophotometer was used to analyze the concentration of hexavalent chromium solution after

adsorption. The result indicated that the kinetic model of the adsorption process of both adsorbents was found to follow a pseudo second order model. The adsorption quantity will enter into an equilibrium state after 60 minutes. The maximum adsorption value is 77.52 mg/g for the activated carbon from *Mimosa pigra* L. which correspond to its surface area and average pore size value. Therefore, the adsorption behavior of both adsorbents is fitted with the Langmuir isotherm model. The preparation of both adsorbents can increase the adsorption efficiency and is another alternative way to treat wastewater and to utilize the *Mimosa pigra* L. to its benefits.

Keywords: *Mimosa pigra* L., hexavalent chromium, activated carbon, adsorption, Langmuir isotherm

บทนำ

ต้นไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) เป็นพืชตระกูลถั่วยืนต้นที่มีระบบรากลึก ออกดอกได้ตลอดปี เมล็ดของไมยราบยักษ์สามารถงอกได้เป็นระยะเวลานาน เพื่อรอโอกาสที่ปัจจัยสภาวะแวดล้อมเหมาะสมต่อการงอกขึ้นใหม่ จัดเป็นวัชพืชที่มีการระบาดอย่างรวดเร็วและสามารถขึ้นได้ในทุกสภาพดิน (Koodkaew, et al., 2018) ความเสียหายที่เกิดจากต้นไมยราบยักษ์ ได้แก่ พื้นที่ทำการเกษตรตามคลองชลประทานหรือแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีต้นไมยราบยักษ์ขึ้นอย่างหนาแน่นทำให้ขวางกั้นทางเดินของน้ำ นอกจากนี้ไมยราบยักษ์ที่ขึ้นปกคลุมอยู่อย่างแน่นทึบทำให้พรรณไม้อื่นไม่สามารถเจริญเติบโตได้ทำให้พรรณพืชดั้งเดิมสูญหายไปจากพื้นที่ ปัจจุบันการนำต้นไมยราบยักษ์มาใช้ประโยชน์ยังมีน้อย มีการนำมาเผาให้เป็นถ่านเพื่อการประกอบอาหาร และเมื่อมีการระบาดในพื้นที่จำนวนมากก็จะกำจัดโดยวิธีการเผาทำให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ ดังนั้นการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ (Singhasiri, 2014) เนื่องจากลักษณะของเนื้อไม้ไมยราบยักษ์มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง เป็นการนำวัชพืชมาใช้ประโยชน์และแก้ไขปัญหาวัชพืชในท้องถิ่นได้ (Okonkwo et al., 2016)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นโดยผ่านกระบวนการคาร์บอนในซีโดยการเผาและอัดแรงดันที่อุณหภูมิสูงภายใต้การควบคุมปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากนั้นจึงกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีหรือทางกายภาพ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้ผิวของคาร์บอนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้าง เกิดร่างแห รูพรุน ภายใน และร่างหุ้มฟังก์ชันบนพื้นผิวในแต่ละส่วน ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่สัมผัสผิวมากจึงมีสมบัติในการดูดซับสูง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก (Mahaninia et al., 2015) จึงนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ เช่น การบำบัดน้ำ ตัวดูดซับกลิ่น ตัวดูดซับสี และสารกรอง ตัวเร่ง เป็นต้น แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาแพง ปัจจุบันจึงได้มีการวิจัยศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งหลายชนิดที่ราคาถูก ส่วนใหญ่มักใช้วัตถุดิบที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว ลูกหว้า กากชา และต้นไมยราบยักษ์ เป็นต้น ในกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ZnCl_2 , H_3PO_4 , H_2SO_4 , HNO_3 , H_2O_2 , KMnO_4 , NaOH และ KOH เป็นต้น โดยในบรรดาสารกระตุ้นทางเคมีทั้งหมด ZnCl_2 เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่ผิวมากกว่าตัวอื่น ๆ (Uner et al., 2019)

โลหะโครเมียมที่มีการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมมี 2 ชนิด ได้แก่ โครเมียม (III) ซึ่งไม่มีพิษต่อร่างกาย และโครเมียม (VI) หรือเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Hexavalent chromium) ซึ่งมีพิษต่อร่างกายทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนังเป็นอันตรายต่อระบบหายใจ ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ทำให้เสียชีวิต หน่วยงานระหว่างประเทศเพื่อการวิจัยโรคมะเร็งถือว่าเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นสารก่อมะเร็ง (Sinha et al., 2022) เมื่อได้รับเป็นเวลานานจะมีโอกาสเป็นมะเร็งปอด โครงสร้างดีเอ็นเอถูกทำลายได้ง่ายมากขึ้น นอกจากนี้เฮกซะวาเลนต์โครเมียมยังถูกสั่งห้ามและจำกัดการใช้ให้มีปริมาณลดน้อยลง มีอุตสาหกรรมจำนวนมากยังคงใช้เป็นวัตถุดิบในหลายผลิตภัณฑ์ จึงมีโอกาสดังกล่าวที่เฮกซะวาเลนต์โครเมียมจะเกิดการปนเปื้อนทั้งในดินและในน้ำ จึงควรมีวิธีการป้องกันและการเผยแพร่ถึงภัยอันตรายจากการปนเปื้อนของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเพื่อสุขภาพอนามัยของประชาชน

ที่ผ่านมามีรายงานการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์โดยการกระตุ้นด้วย NaCl และ ZnCl_2 (Singhasiri, 2014) แต่ยังไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้ ต่อมา Ninjiranai & Noirod (2016) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ไมยราบยักษ์ที่ไม่ปรับสภาพ จากนั้น Thammasom (2017) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ที่กระตุ้นด้วย NaCl และ KOH จะเห็นได้ว่ายังไม่มีรายงานการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพและถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่สามารถหาได้ตามท้องถิ่น ได้แก่ ไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพ และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ จากนั้นศึกษาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับที่เตรียมได้ และนำไปศึกษาจลนศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งเป็นแนวทางการนำต้นไมยราบยักษ์ที่เป็นปัญหาวัชพืชในท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพ และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ จากนั้นนำตัวดูดซับที่ได้ไปศึกษาจลนศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

วิธีดำเนินการวิจัย

สารเคมี

สารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมจากโพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) 99% (A.R) Merck, Germany ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) 99% (A.R) Ajax, Australia ต้นไมยราบยักษ์จากหมู่บ้านวังไทร ตำบลวังไทร อำเภอลองของ จ.จังหวัดกำแพงเพชร

วิธีการวิจัย

1. วิธีการเตรียมตัวดูดซับ

1.1 ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ (Modified *Mimosa pigra* L., MMPL)

นำต้นไมยราบยักษ์มาตัดเป็นท่อนๆ แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง แล้วนำไปตากแดดให้แห้ง (ภาพที่ 1) นำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชมีค่าเท่ากับน้ำกลั่นที่ใช้ล้าง นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ไม่ปรับสภาพ (*Mimosa pigra* L., MPL) ส่วนตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ ให้นำต้นไมยราบยักษ์ 500 กรัม ไปแช่ด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ อิมตัวที่ความเข้มข้น 1.85 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชมีค่าเท่ากับน้ำกลั่นที่ใช้ล้าง นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.2 ตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ (Activated carbon from *Mimosa pigra* L., ACMPL)

นำต้นไมยราบยักษ์มาตัดเป็นท่อนๆ แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วนำไปตากแดดให้แห้ง นำไปเผาแบบดินกลบ ควบคุมอากาศจนกลายเป็นถ่านไมยราบยักษ์ นำถ่านที่ได้มาบดให้ละเอียดร่อนผ่านตะแกรงร่อน จากนั้นนำไปแช่ด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ อิมตัว เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชเท่ากับน้ำกลั่นที่ใช้ล้าง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็น นำไปเผากระตุ้นโดยใช้อัตราส่วนต่อน้ำหนักของถ่านไมยราบยักษ์ต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 3.11 : 1 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชเท่ากับน้ำล้าง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส (Singhasiri, 2014) จะได้ถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การเตรียมตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ (ซ้าย) และถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ (ขวา)

2. การศึกษาสัณฐานวิทยาของพื้นผิวดูดซับไมยราบยักษ์

นำตัวดูดซับไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT200 ประเทศญี่ปุ่น) เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับและวัดขนาดรูพรุนโดยใช้ SEM หา ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากทั้งหมด 10 ชิ้นงานต่อตัวอย่าง (Onsaikaw & Panya, 2021)

3. การศึกษาหาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพและถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์

เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface Area Analyzer รุ่น Autosorb-1C, Quantachrome) โดยใช้เทคนิคการดูดซับ แก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน วิเคราะห์พื้นที่ผิวจากไอโซเทอร์มแบบบีอีที ตามรูปแบบสมการของบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller, BET)

4. การศึกษาการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพและถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์

4.1 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

ชั่งน้ำหนักตัวดูดซับ 0.1 กรัม ในขวดโพลีเอทิลีน เติมสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปรับพีเอชเท่ากับ 5 ลงในขวดที่มีตัวดูดซับอยู่ขวดละ 25 มิลลิตร ปิดฝาแล้วนำไปผสมด้วยเครื่องหมุนแบบลูกกลิ้ง (Roller mixer ยี่ห้อ Stuart รุ่น SRT6D ประเทศอังกฤษ) ที่ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาที่กำหนดไว้ 0 15 30 45 60 75 90 และ 105 นาทีจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่ 120 นาทีตามลำดับ เมื่อครบกำหนดเวลาในแต่ละขวดให้นำสารละลายมากรองแล้วนำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer, AAS) รุ่น PinAAcle 900F ของบริษัท Perkin-Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ความยาวคลื่น 357.90 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยไปคำนวณความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่เวลาใดๆ โดยใช้สมการจากกราฟมาตรฐาน จากนั้นคำนวณปริมาณการดูดซับ ดังนี้

ปริมาณการดูดซับที่เวลาใด ๆ (q_t) สามารถคำนวณโดยใช้สมการ (1)

$$q_t = \frac{[C_0 - C_t]V}{W} \quad (1)$$

เมื่อ q_t คือ ปริมาณการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่เวลาใดๆ (โมลต่อกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเริ่มต้น

C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่เวลาใดๆ

V คือ ปริมาตรที่ใช้ในการดูดซับ

W คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) สามารถคำนวณโดยใช้สมการ (2) (Panya, 2014; Suanjaidee & Panya, 2016)

$$q_e = \frac{[C_0 - C_e]V}{W} \quad (2)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่สมดุล (โมลต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่สมดุล

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ่านไปศึกษาแบบจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมว่าสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first-order) ดังสมการ (3) หรือปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second-order) ดังสมการ (4) ตามลำดับดังนี้ (Rajoriya *et al.*, 2021)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (3)$$

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

เมื่อ t คือ เวลาใดๆ (นาที)

k_1 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

k_2 คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ค่า r^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีพฤติกรรมดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และความชันเท่ากับ $-\frac{k_1}{2.303}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

และเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t จะได้ค่า r^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีพฤติกรรมดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_e}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

4.2 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

เตรียมสารละลายมาตรฐานเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ที่มีความเข้มข้น 5 – 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อทดลองการดูดซับแบบกะ (Batch method) โดยชั่งน้ำหนักตัวดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ในขวดโพลีเอทิลีนขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ที่ที่เอชเท่ากับ 5 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงในขวดที่มีตัวดูดซับอยู่จำนวน 25 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วนำไปผสมด้วยเครื่องหมุนแบบลูกกลิ้งที่ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (จากผลการทดลองเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับภายใน 60 นาที) เมื่อครบกำหนดเวลา นำสารละลายทั้งหมดไปกรองแล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 357.9 นาโนเมตร ทดลองซ้ำสามครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่สมดุลตามสมการ (2) และคำนวณหาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ดังสมการ (5) และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช ดังสมการ (6) ดังนี้ (Panya, 2014.; Suanjaidee & Panya, 2016)

สูตรการคำนวณสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

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

นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง C_e กับ C_e/q_e จะได้ค่า r^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีพฤติกรรมดูดซับเป็นไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{q_m K_L}$

สูตรการคำนวณสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช ดังนี้

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n}$$

$$\text{Log} q_e = \text{Log} K_F + \frac{1}{n} \text{Log} C_e \quad (6)$$

เมื่อ q_m คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุดตามสมการแลงเมียร์

K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์

K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับของฟรุนดิช

n คือ ค่าคงที่

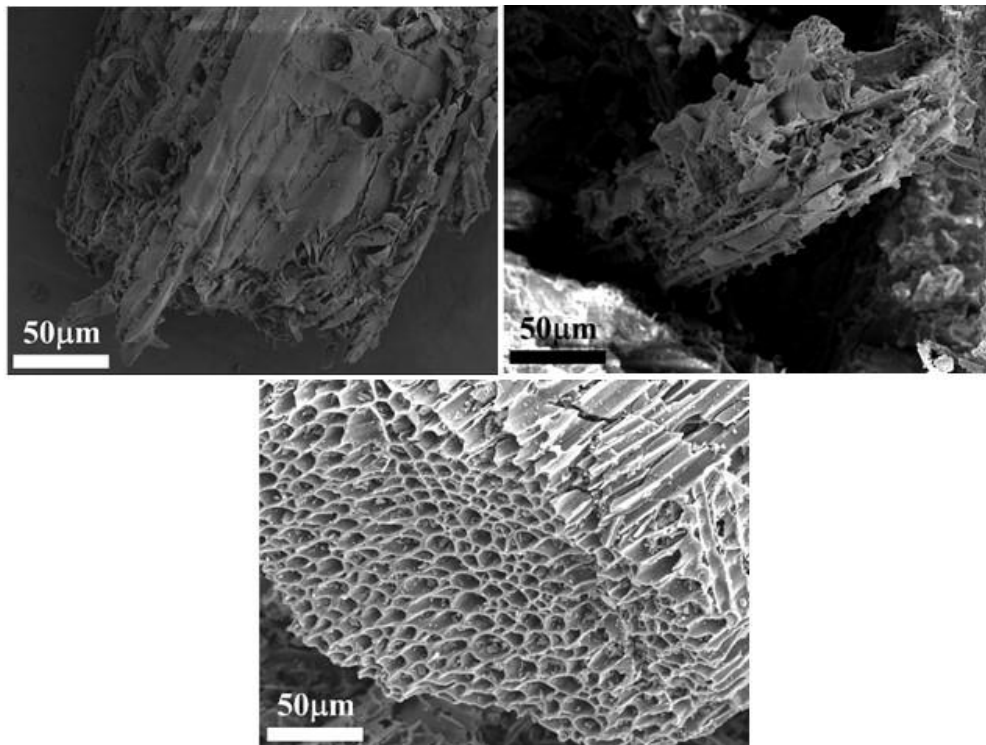
นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้ค่า r^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีพฤติกรรมดูดซับเป็นไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช และความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\text{Log} K_F$

ผลการวิจัย

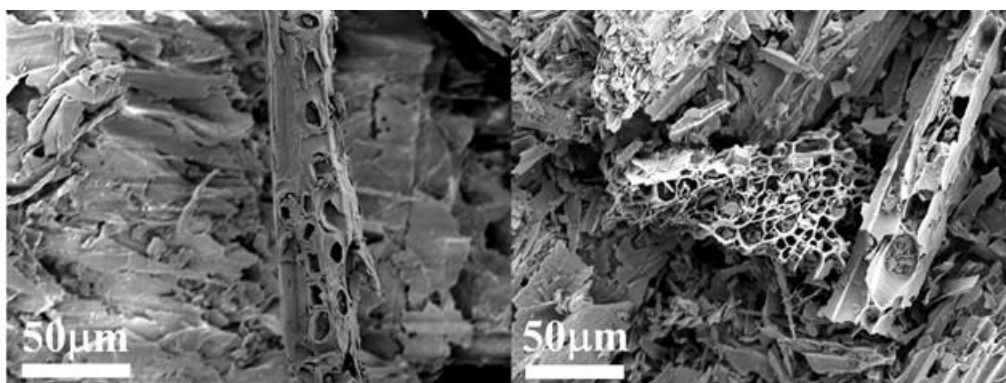
1. สัณฐานวิทยาและพื้นที่ผิวตัวดูดซับไมยราบยักษ์และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์

พื้นที่ผิวของตัวดูดซับไมยราบยักษ์พบว่า มีลักษณะเรียบไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวของไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพพบว่า มีรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่ และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ พบว่า มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากดังภาพที่ 2 โดยขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดแสดงดังตารางที่ 1

สำหรับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพและถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ หลังจากการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมพบว่า ตัวดูดซับจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพมีลักษณะเรียบมีรูพรุนเหลือเพียงเล็กน้อย ถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ พบว่า มีรูพรุนเหลือเพียงเล็กน้อยดังภาพที่ 3 โดยขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัสดุดูดซับทั้งก่อนและหลังการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม แสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ภาพ SEM แสดงโครงสร้างสัณฐานวิทยาของตัวอย่างเนื้อไม้ก่อนดัดสีและเคลือบของตัวอย่างไม้จากไม้ยางพาราที่ยังไม่ปรับปรุงสภาพ, MPL (ซ้าย) ตัวอย่างไม้จากไม้ยางพาราที่ปรับปรุงสภาพ, MMPL (ขวา) แผ่นกั้นมันต์จากไม้ยางพารา, ACMPL (ล่าง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า



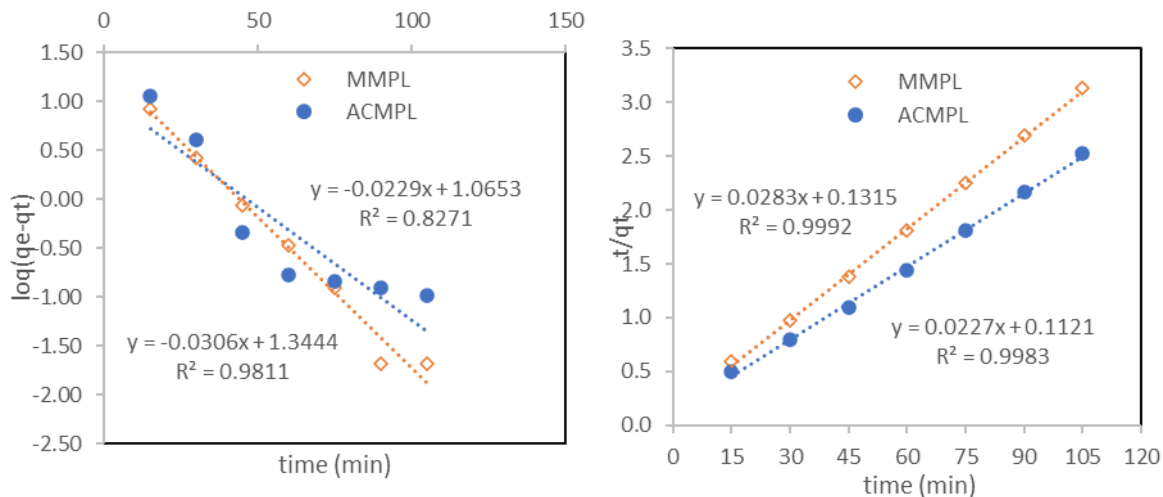
ภาพที่ 3 ภาพ SEM โครงสร้างสัณฐานวิทยาหลังดัดสีและเคลือบของตัวอย่างไม้จากไม้ยางพาราที่ปรับปรุงสภาพ, MMPL (ซ้าย) และแผ่นกั้นมันต์จากไม้ยางพารา, ACMPL (ขวา) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ตารางที่ 1 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนจาก SEM ของตัวอย่างไม้จากต้นไม้ยางพาราที่ยังไม่ปรับปรุงสภาพ (MPL) ที่ปรับปรุงสภาพ (MMPL) และตัวอย่างที่เป็นแผ่นกั้นมันต์จากต้นไม้ยางพารา (ACMPL)

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (μm)		Ref
		ก่อนดัดสี	หลังดัดสี	
MPL	20.18 ± 1.46	15.54 ± 0.85	-	งานวิจัยนี้
MMPL	406.20 ± 1.15	8.50 ± 0.66	5.15 ± 0.40	งานวิจัยนี้
ACMPL	796.75 ± 0.96	2.15 ± 0.42	0.35 ± 0.22	งานวิจัยนี้
ACMPL-ZnCl ₂	816.52	-	-	Singhasiri, T., 2014

2. จลนศาสตร์การดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

จลนศาสตร์การดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เนื่องจากค่าความเป็นเส้นตรงมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการอันดับหนึ่งเทียม และมีค่าปริมาณการดูดซับจากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังแสดงในภาพที่ 4 และตารางที่ 2



ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ซ้าย) และอันดับสองเทียม (ขวา) ของการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ (MMPL) และตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ (ACMLP)

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์จากปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ (MMPL) และตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ (ACMLP)

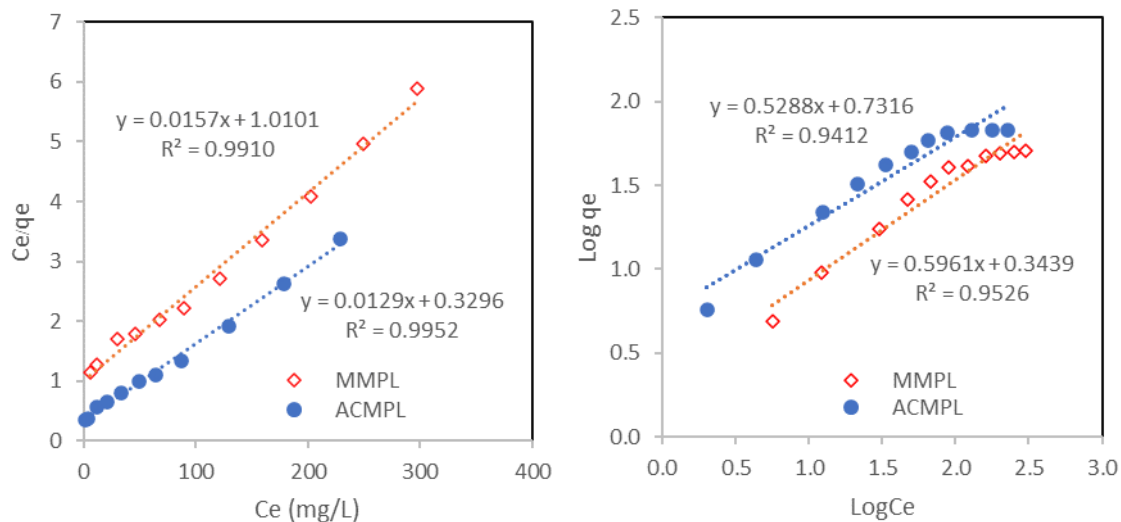
ชนิดของตัวดูดซับ	$q_{e, \text{exp}}$ (mg/g)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
		q_e (mg/g)	k_1 (min^{-1})	r^2	q_e (mg/g)	k_2 (mg/g.min)	r^2
MMPL	33.52	22.10	0.0705	0.9811	35.34	0.0061	0.9992
ACMLP	41.71	11.62	0.0527	0.8271	44.05	0.0046	0.9983

3. ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียม

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ และตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์พบว่า พฤติกรรมการดูดซับของทั้งสองตัวดูดซับเป็นแบบไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบฟรุนดิช เนื่องจากค่าความเป็นเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบฟรุนดิช ดังแสดงในภาพที่ 5 และตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าคงที่จากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดิชของการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ (MMPL) และตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ (ACMLP)

ชนิดของตัวดูดซับ	ค่าคงที่แบบแลงเมียร์			ค่าคงที่แบบฟรุนดิช		
	q_m (mg/g)	K_L (mg/L)	r^2	K_F	n	r^2
MMPL	63.69	0.0155	0.9910	2.207	1.678	0.9412
ACMLP	77.52	0.0391	0.9952	5.390	1.891	0.9526



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (ซ้าย) และแบบฟรันทิช (ขวา) ของการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ (MMPL) และตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ (AC MPL)

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการวิเคราะห์การดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ (MMPL) และตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ (AC MPL) โดยใช้สถิติ t-test ดังสมการ

$$t_{\text{test}} = \frac{\bar{D}}{S_d} \sqrt{N} \quad (7)$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{N-1}}$$

โดยที่ D_i = ความแตกต่างของผลการทดลองโดยวิธีวิเคราะห์ทั้งสองต่อสารตัวอย่าง
 $\bar{D}$ = ค่าเฉลี่ยของ D_i (คิดเครื่องหมายบวกลบ)
 N = จำนวนสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

แสดงผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการใช้สถิติ t-test ทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยปริมาณการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ (MMPL) และตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ (AC MPL)

ที่	ความเข้มข้นเริ่มต้น ของโครเมียม (mg/L)	MMPL (mg/g)	AC MPL (mg/g)	D_i	$D_i - \bar{D}$	$(D_i - \bar{D})^2$
1	25	4.854	5.750	0.90	-9.76	95.247
2	50	9.479	11.417	1.94	-8.72	76.000
3	100	17.542	21.917	4.38	-6.28	39.442
4	150	25.875	32.188	6.31	-4.34	18.860
5	200	33.188	41.667	8.48	-2.18	4.735
6	250	40.188	50.125	9.94	-0.72	0.515
7	300	44.688	58.792	14.10	3.45	11.895
8	350	47.583	65.646	18.06	7.41	54.867
9	400	49.438	67.563	18.13	7.47	55.796
10	450	50.146	67.854	17.71	7.05	49.745
11	500	50.542	67.813	17.27	6.62	43.765

จากตารางที่ 4 พบว่า ค่า t_{test} มีค่า 5.263 ซึ่งเปรียบเทียบกับ t_{table} ที่ขีดความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ที่ระดับชั้นเสรี = 10 มีค่าเท่ากับ 3.17 จึงสรุปได้ว่า ค่า $t_{test} > t_{table}$ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับทุกความเข้มข้น ดังนั้นผลการวิเคราะห์การดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ และถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ร้อยละ 99

อภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นที่ผิวตัวดูดซับไมยราบยักษ์และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์จากภาพ SEM แสดงโครงสร้างสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมของตัวดูดซับจากไมยราบยักษ์ที่ไม่ปรับสภาพไม่มีรูพรุน พื้นผิวมีลักษณะเรียบ ตัวดูดซับจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพจะมีรูพรุนแต่ไม่มาก ส่วนถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์มีรูพรุนขนาดเล็ก ๆ เป็นจำนวนมาก เนื่องจากในการกระตุ้นและการปรับสภาพพื้นผิวทางเคมี สารเคมี $ZnCl_2$ ที่ใช้จะแทรกอยู่ในถ่านเมื่อทำการปรับสภาพโดยการแช่ หรือการเผากระตุ้นถ่านให้เป็นถ่านกัมมันต์ โดยทำให้เกิดรูพรุนและพื้นที่ผิวภายในถ่านเพิ่มขึ้นอย่างมาก และสุดท้าย $ZnCl_2$ จะหลุดออกเมื่อล้างด้วยน้ำ (Yahya *et al.*, 2015; Singhasiri, 2014) และจากภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาหลังการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมพบว่า ตัวดูดซับจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพจะมีพื้นที่ผิวมีลักษณะเรียบมีรูพรุนน้อย ส่วนถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์จะเหลือรูพรุนเล็กน้อย สาเหตุของการลดลงของรูพรุนเนื่องจากเฮกซะวาเลนต์โครเมียมไอออนถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมด้วยต้นไมยราบยักษ์ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด โดยมีพื้นที่ผิว 796.75 ± 0.96 ตารางเมตรต่อกรัม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Singhasiri (2014) ที่รายงานไว้ว่า พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ มีค่าเท่ากับ 816.52 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับตัวดูดซับที่ถูกเตรียมด้วยต้นไมยราบยักษ์ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 406.20 ± 1.15 และ 20.18 ± 1.46 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยถ่านกัมมันต์ และตัวดูดซับที่ปรับสภาพ และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ คือ 2.15 ± 0.42 8.50 ± 0.66 และ 15.54 ± 0.85 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งพบว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวสูงกว่า เนื่องจากการกระตุ้นและการปรับสภาพพื้นผิวทางเคมี สารเคมี $ZnCl_2$ ที่ใช้ไปกระตุ้นคาร์บอนทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นและมีรูพรุนที่เล็กลง

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมพบว่า เป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เนื่องจากค่าความเป็นเส้นตรงมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการอันดับหนึ่งเทียม และมีค่าปริมาณการดูดซับจากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Krishnamoorthi *et al.* (2021) ที่รายงานไว้ว่า จลนศาสตร์การดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก *Merremia emarginata* เป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เมื่อพิจารณาค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (k_2) พบว่า การดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมบนถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ จะเกิดได้เร็วกว่า เนื่องจากมีค่า $k_2 = 0.0046$ มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวินาที ต่ำกว่าตัวดูดซับจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพซึ่งมี $k_2 = 0.0061$ มิลลิกรัมต่อกรัมต่อวินาที สอดคล้องกับ Masinga *et al.* (2022) ที่ได้รายงานไว้ว่า จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสองจะเร็วขึ้น เมื่อ k_2 มีค่าต่ำกว่า

สำหรับพฤติกรรมของการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับทั้งสองชนิด ทั้งจากไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพและถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์พบว่า ปริมาณการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลหลังจากเวลา 60 นาที และมีพฤติกรรมของการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอรัมแบบฟรุนดลิช เพราะมีค่า r^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับทั้งสองชนิด เป็นการกระจายตัวที่เป็นเนื้อเดียวกันของแอคทีฟไซต์บนพื้นผิวตัวดูดซับและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Pant *et al.*, 2022; Morifi *et al.*, 2022) การวิเคราะห์การดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพ และถ่านกัมมันต์จากต้นไมยราบยักษ์ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ร้อยละ 99 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสูงสุดตามสมการแลงเมียร์ (q_m) พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์มีปริมาณการดูดซับ 77.52 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าสูงกว่าตัวดูดซับไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพที่มีปริมาณการดูดซับสูงสุด 63.69 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์มีพื้นที่ผิวสูงกว่า และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยต่ำกว่า โดยที่ q_m ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดอยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยมีค่าสูงกว่าการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมียที่มีรายงานไว้ก่อนหน้านี้ ที่มีค่า q_m เท่ากับ 26.2 มิลลิกรัมต่อกรัม (Pakade *et al.*, 2017) จึงสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมตัวดูดซับจากไมยราบยักษ์ทั้งสองชนิดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม และ

เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียและเป็นการนำต้นไมยราบยักษ์ที่เป็นวัชพืชมาร่วมใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

สรุปผลการวิจัย

การเตรียมตัวดูดซับสองชนิดจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยซิงค์คลอไรด์ และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ มีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนที่เหมาะสมสามารถนำไปศึกษาไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์การดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า จลนศาสตร์การดูดซับทั้งสองชนิดเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม พฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และถ่านกัมมันต์จากไมยราบยักษ์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีปริมาณการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมสูงกว่าและเกิดได้เร็วกว่าตัวดูดซับจากต้นไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยซิงค์คลอไรด์ การเตรียมตัวดูดซับจากไมยราบยักษ์ทั้งสองชนิดเป็นการนำไมยราบยักษ์ที่เป็นปัญหาวัชพืชในท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

ตัวดูดซับที่ผลิตได้ทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายเฮกซะวาเลนต์โครเมียมได้ดี สามารถเป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียและเป็นแนวทางการนำต้นไมยราบยักษ์ที่สามารถหาได้ตามท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์

2. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในครั้งต่อไป

ควรศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ สารเคมีชนิดอื่นๆ ที่ใช้กระตุ้นการเตรียมถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิ และค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร งบประมาณปี 2565

เอกสารอ้างอิง

- Koodkaew, I., Senaphan, C., Sengseang, N. & Suwanwong, S. (2018). Characterization of phytochemical profile and phytotoxic activity of *Mimosa pigra* L. *Agriculture and Natural Resources*, 52(2), 162-168.
- Krishnamoorthi, K., Shanmugam, A. & Murugan, A. (2021). Adsorption of hexavalent chromium by activated carbon *Merremia emarginata* (ACME) from synthetic aqueous solutions. *Journal of Advanced Scientific Research*, 12(2), 159-164.
- Mahaninia, M., Rahimian, P. & Kaghazchi, T. (2015). Modified activated carbons with amino groups and their copper adsorption properties in aqueous solution. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(1), 50-56.
- Masinga, T., Moyo, M. & Pakade, V. E. (2022). Removal of hexavalent chromium by polyethyleneimine impregnated activated carbon: intra-particle diffusion, kinetics and isotherms. *Journal of materials research and technology*, 18, 1333-1344.
- Morifi, E., Chimuka, L., Richards, H., Senyolo, L. & Pillay, K. (2022). Modified macadamia nutshell nanocomposite for selective removal of hexavalent chromium from wastewater. *South African Journal of Chemical Engineering*, 42, 176-187.
- Ninjiaranai, P. & Noirot, P. (2016) Adsorption efficiency of chromium (VI) on cottonseed fruit and giant mimosa. *Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal*, 2(2), 28-36. (in Thai)
- Okonkwo, C. J., Tochukwu, U. N., Okonkwo, J. N., Afieroho, O. E. & Proksch, P. (2016). Two new acylated flavonol glycosides from *Mimosa pigra* L. leaves sub-family Mimosoideae. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2(2), 71-75.



- Onsaikaew, K. & Panya, P. (2021). Electrochemical resistance of activated carbons from preparation with cucurbit peel activated by different activators. *VRU Research and Development Journal Science and Technology*, 16(3), 105-119. (in Thai)
- Pakade, V.E., Nchoe, O.B., Hlungwane, L. & Tavengwa, N.T. (2017). Sequestration of hexavalent chromium from aqueous solutions by activated carbon derived from Macadamia nutshells. *Water Sci Technol*, 75, 196-206.
- Pant, B. D., Neupane, D., Paudel, D. R., Lohani, P. C., Gautam, S. K., Pokhrel, M. R. & Poudel, B.R. (2022). Efficient biosorption of hexavalent chromium from water by modified arecanut leaf sheath. *Heliyon*, 8(4), e09283 1-10.
- Panya, P. (2014). *Surface Chemistry* (1st Ed.). Kamphaeng Phet: Kamphaeng Phet Rajabhat University. (in Thai)
- Rajoriya, S., Saharan, V. K., Pundir, A. S., Nigam, M. & Roy, K. (2021). Adsorption of methyl red dye from aqueous solution onto eggshell waste material: kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100180, 1-7.
- Singhasiri, T. (2014). Optimum conditions of activated carbon production from *Mimosa pigra* L. using sodium chloride and zing chloride activation. *KKU Engineering Journal*, 41(4), 527-535. (in Thai)
- Sinha, R., Kumar, R., Sharma, P., Kant, N., Shang, J. & Aminabhavi, T. M. (2022). Removal of hexavalent chromium via biochar-based adsorbents: state-of-the-art, challenges, and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 317, 115356, 1-33.
- Suanjaidee, T. & Panya, P. (2016). Removal of phenol by adsorption on modified activated carbon with cetylpyridinium chloride. *The Golden Teak Science and Technology Journal* 3(2), 69-76. (in Thai)
- Thammasom, T. (2017). Study adsorption of cadmium by activated carbon from *Mimosa Pigra* Linn. *Science and Technology RMUTT Journal*, 7, 59-66. (in Thai)
- Uner, O., Gecgel, U. & Bayrak, Y. (2019). Preparation and characterization of mesoporous activated carbons from waste watermelon rind by using the chemical activation method with zinc chloride. *Arabian Journal of Chemistry*, 12, 3621-3627.
- Yahya, A. Y., Al-Qodah, Z. & Zanariah Ngah, C. W. (2015). Agricultural bio-mass materials as potential stainable precursors used for activated carbon production: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 218-235.