วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 26 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 26 (No.2) May – August 2021
บทความวิจัย

ประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการดูดซับไอออนของเหล็ก (III)

Efficiency of Biochar Derived from Elephant Dung for Adsorption of Iron (III) Ions

ญาณสินี สุมา[1*], นิตย์ตะยา ผาสุขพันธุ์[2] และ น้ำฝน เอกตาแสง[2]

Yanasinee Suma[1*], Nittaya Pasukphun[2] and Numfon Eaktasang[2]

[1] *คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์ลำปาง)*

[2] *คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)*

[1]*Faculty of Public Health, Thammasat University* (*Lampang Center*)

[2]*Faculty of Public Health, Thammasat University* (*Rangsit Center*)

Received : 23 July 2020

Revised : 8 September 2020

Accepted : 21 September 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์ และที่ไม่ปรับสภาพ มาใช้ในการดูดซับไอออนของเหล็ก (III)ในน้ำเสียสังเคราะห์ การดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ของตัวดูดซับทั้งสองจะเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 90 นาที โดยถ่านชีวภาพมูลช้างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์ สามารถดูดซับเหล็กได้มากกว่าถ่านชีวภาพมูลช้างที่ไม่ปรับสภาพ ปริมาณดูดซับที่สมดุลแปรผกผันกับมวลของถ่านชีวภาพมูลช้างที่ใช้ ในการวิจัยนี้ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) คือ 7 อัตราการดูดซับของไอออนของเหล็ก (III) บนตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสองเสมือน ปริมาณดูดซับสมดุลของไอออนของเหล็ก (III) บนตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นไปตามไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียวและมีปริมาณดูดซับสูงสุดของถ่านชีวภาพมูลช้างที่ไม่ปรับสภาพ และถ่านชีวภาพมูลช้างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 13.57 และ 37.45 mg/g ตามลำดับ ปฏิกิริยาการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองสามารถเกิดได้เอง และเป็นแบบปฏิกิริยาคายความร้อน ตัวดูดซับจากงานวิจัยนี้สามารถดูดซับเหล็กได้ดี จึงมีความน่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

คำสำคัญ : มูลช้าง ; ไอออนของเหล็ก (III) ; ไอโซเทอร์มของการดูดซับ ; อุณหพลศาสตร์ ; จลนศาสตร์

Abstract

The objective of this study was to investigate the ability of NaCl-treated and untreated biochar derived from elephant dung for adsorption of iron (III) ions in synthesized wastewater. The iron (III) ions adsorption of both adsorbents reached equilibrium within 90 minutes, with the adsorption of NaCl-treated biochar being higher than that of untreated biochar. The adsorbed amount at equilibrium was inversely proportional of the mass of adsorbents. The optimum pH for iron (III) ions adsorption was 7. The adsorption rate could be described by the pseudo-second order kinetic model while the adsorbed amount of iron (III) ions at equilibrium agreed with Langmuir isotherm (monolayer adsorption). The maximum iron adsorption of untreated and NaCl-treated biochars was 13.57 and 37.45 mg/g, respectively. The adsorption reaction of both adsorbents can occur spontaneously and was an exothermic reaction. The adsorbents of this study can be used to adsorb iron; therefore, it is interesting to apply in the wastewater treatment process further.

Keywords : elephant dung ; iron (III) ion ; adsorption isotherm ; thermodynamic ; kinetics

***Corresponding author. E-mail :** yanasinee.s@fph.tu.ac.th

บทนำ

มนุษย์ต้องการเหล็กในการสร้างเม็ดเลือดแดง โดยหากมนุษย์ขาดธาตุเหล็กจะทำให้เป็นโรคโลหิตจาง แต่หากได้รับธาตุเหล็กในปริมาณที่มากเกินจะทำให้เหล็กก่อตัวเป็นตะกอน และทำลายอวัยวะต่างๆ เช่น ตับ และตับอ่อน เป็นต้น ในภาคอุตสาหกรรม หากในน้ำที่นำมาใช้มีปริมาณเหล็กมากจะทำให้เกิดปัญหา เช่น น้ำจะขุ่น และเกิดตะกรันขึ้นภายในหม้อน้ำ นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ เหล็กจะทำให้กระดาษมีสีเหลือง ในการผลิตเสื้อผ้า เหล็กทำให้เกิดจุดสีเหลืองบนเสื้อผ้า และโรงงานผลิตอาหาร เหล็กจะทำให้รสชาติของอาหารเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น ในการผลิตน้ำประปาหากไม่กำจัดเหล็กออก จะทำให้ท่ออุดตัน โดยค่ามาตรฐานน้ำบาดาลหรือน้ำบริโภคต้องมีเหล็กไม่เกิน 0.5 mg/L ค่าที่อนุโลมให้มีได้ไม่เกิน 1.0 mg/L การกำจัดเหล็กไอออนมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี การแยกด้วยไฟฟ้า การเติมอากาศ การใช้เยื่อเลือกผ่าน และการแลกเปลี่ยนประจุ เป็นต้น (Maneechakr, 2017) เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ จะเห็นว่าการดูดซับเป็นวิธีที่ใช้งบประมาณในกระบวนการบำบัดน้อยที่สุดและสามารถทำได้ง่ายที่สุด สามารถควบคุมสภาวะได้ง่ายที่สุดและมีวิธีการไม่ยุ่งยาก ตัวดูดซับที่นำมาใช้เพื่อการบำบัดน้ำโดยวิธีการดูดซับ มีทั้งตัวดูดซับธรรมชาติ เช่น เปลือกมังคุด ถ่านกัมมันต์ และตัวดูดซับสังเคราะห์ที่เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการ เช่น ซีโอไลต์ (zeolite) และโลหะออกไซด์ (metal oxides) (Haron *et al*., 2019) ทั้งนี้ที่ผ่านมาผู้วิจัยใช้ตัวดูดซับไอออนโลหะหนักจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เปลือกข้าว เปลือกผลไม้ ขี้เลื่อย กากชา วัชพืช เป็นต้น เพื่อผลิตเป็นถ่านชีวภาพ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่รับความนิยม ซึ่งลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพมีคาร์บอนสูงและมีรูพรุนตามธรรมชาติ โดยบริเวณพื้นผิวและภายในรูพรุนจะมีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนชนิดต่างๆ และกลุ่มอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบ (Regmi *et al*., 2012) นอกจากนี้ยังสามารถดักจับไอออนโลหะหนักที่เป็นพิษได้อีกด้วย (Uchimiya *et al*., 2010)

วัสดุที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้คือถ่านชีวภาพจากมูลช้างและศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น ความน่าสนใจของงานวิจัยนี้ คือไม่มีนักวิจัยกลุ่มใดศึกษาการนำมูลช้างมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับเหล็ก และการใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นในการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพปรับสภาพและเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์มาก่อน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเรื่องนี้ โดยกำหนดวัตถุประสงค์ 4 ข้อ

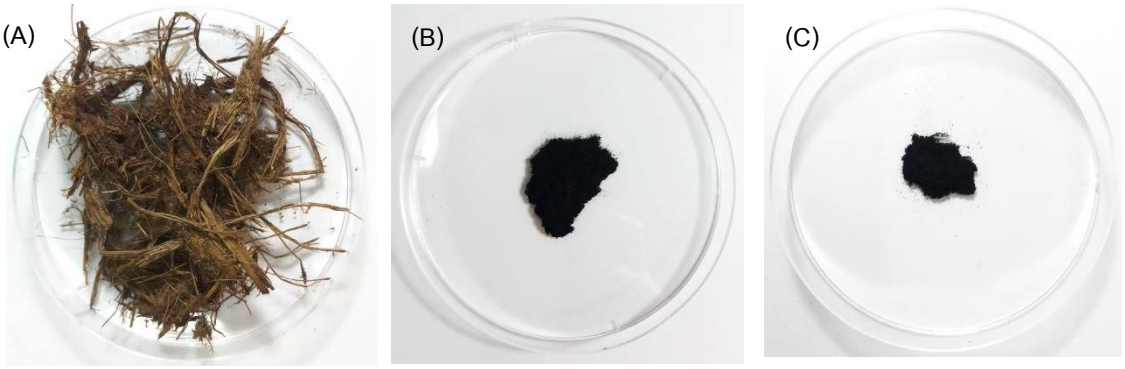
(1) เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับเหล็กของมูลช้างที่ไม่ปรับสภาพและมูลช้างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์ในสภาวะต่าง ๆ
(2) เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของของมูลช้างที่ไม่ปรับสภาพและมูลช้างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์
(3) เพื่อศึกษารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์กับไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช
(4) เพื่อศึกษารูปแบบจลนศาสตร์การดูดซับของเหล็กบนของมูลช้างที่ไม่ปรับสภาพและมูลช้างที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมคลอไรด์

ทั้งนี้คณะวิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กำจัดเหล็กได้และสามารถนำไปใช้ได้จริงในกระบวนการบำบัดเหล็กในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรม

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวดูดซับ

งานวิจัยนี้ใช้มูลช้างสายพันธุ์เอเชีย (*Elephas maximus)* ในศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย จังหวัดลำปาง ดังภาพที่ 1 (A) การเตรียมถ่านมูลช้างแห้ง (Elephant dung bio-char; ED) ทำได้โดยนำมูลช้างแห้งที่ทราบน้ำหนัก ใส่ลงในถ้วยและเผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ถ่านมูลช้างแห้งที่เผาเสร็จ เก็บไว้ในโถดูดความชื้น ทิ้งให้อุณหภูมิลดลง ทำการบดถ่านมูลช้างแห้งให้ละเอียดเป็นผง ให้สามารถผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 250 µm ได้ ดังภาพที่ 1(B) การปรับสภาพถ่านมูลช้าง (Elephant dung activated carbon; EDA) ด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ทำได้โดยนำผงถ่านมูลช้างแห้งที่ผ่านการร่อนแล้ว นำไปผสมกับโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:1 ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น 4-5 ครั้ง ใช้น้ำกลั่นประมาณ 100-150 มิลลิลิตร ด้วยวิธีการการกรอง และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 250 µm จะได้ EDA (ภาพที่ 1 (C)) เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับเหล็กต่อไป



ภาพที่ 1 มูลช้างแห้ง (A) ผงตัวอย่าง ED(B) และผงตัวอย่าง EDA(C)

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

การศึกษาของอนุภาคตัวดูดซับและวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบแบบ Proximate analysis ได้แก่ ความชื้น (Moisture) เถ้า (Ash) และสารระเหย (Volatile matter) ทำโดยวิธีมาตรฐาน ASTM D3173, ASTM D3174 และ ASTM D3175 ตามลำดับ และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สามารถหาได้จากการคำนวณดังสมการที่ 1 ดังนี้

ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%) = 100 - (%เถ้า + %ปริมาณความชื้น + %ปริมาณสารระเหย) (1)

การศึกษาลักษณะและโครงสร้าง

การศึกษารูปร่าง โดยใช้ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) พื้นที่ผิว (Surface area) และการกระจายตัวของช่องว่างภายในอนุภาคถ่านชีวภาพ โดยวิธี Brunauer-Emmet-Teller method (BET) หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของอนุภาคถ่านชีวภาพโดยใช้ Fourier Transform infrared (FT-IR) spectrometer

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) และสภาวะการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ที่เหมาะสม

การเตรียมสารละลายไอออนของเหล็ก (III) และการวิเคราะห์ไอออนของเหล็ก (III)

สารละลายเหล็ก (III) ($Fe(NO_3)_3$) ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สั่งซื้อจากบริษัท Fisher Scientific ความบริสุทธิ์เป็นแบบเกรดวิเคราะห์ การเตรียมสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ ทำโดยนำสารละลายเหล็ก (III) เจือจางด้วยน้ำกลั่น การวิเคราะห์ไอออนของเหล็ก (III) จะใช้วิธีมาตรฐาน 1,10-Phenanthroline และวัดค่าดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer, Hitachi U-2900) ที่ความยาวคลื่น 510 nm (APHA, 2005)

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ที่เหมาะสม

การทดลองแบบ Batch ทำได้โดยชั่งตัวดูดซับ ปริมาณ 0.02-0.10 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ตวงสารละลายไอออนของเหล็ก (III) ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด จนกระทั่งถึงสมดุลของการดูดซับ วิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็ก (III) ที่เหลืออยู่ในสารละลาย นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะทดสอบมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ได้แก่ (1) pH (ค่า pH ช่วง 3-7) โดยใช้ 0.1 M HNO_3 และ 0.1 M $NH_3{\cdot}H_2O$ ในการปรับค่า pH (2) ระยะเวลาการดูดซับ (0-100 นาที) และ (3) อุณหภูมิต่างๆ (298 308 318 และ 328 K)

การคำนวณการร้อยละการดูดซับไอออนของเหล็ก (III)

คำนวณความสามารถในการดูดซับจากร้อยละการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) จากร้อยละ โดยใช้สมการที่ (2)

$$\% \text{ ร้อยละการดูดซับ} = (C_0\text{-}C_e)/C_0 \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนของเหล็ก (III) (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_e หมายถึง ความเข้มข้นสมดุลของไอออนของเหล็ก (III) (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับไอออนของเหล็ก (III)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับเหล็กด้วยตัวดูดซับ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไอออนของเหล็ก (III) ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของไอออนของเหล็ก (III) ที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่ เพื่อหาไอโซเทอร์มที่เหมาะสม และใช้อธิบายลักษณะการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ เขียนได้ดังสมการที่ (3) (Chen *et al*., 2010)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m}\frac{1}{C_e} \quad (3)$$

เมื่อ q_m หมายถึงปริมาณสูงสุดของไอออนของเหล็ก (III) ที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียวต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_L หมายถึงค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) เมื่อนำข้อมูลผลปริมาณตัวดูดซับระหว่าง $1/q_e$ กับ

$1/C_e$ ควรได้กราฟเส้นตรง โดยค่า q_m หาได้จากจุดตัดแกนตั้ง และความชันของเส้นตรงหาค่า K_L ได้ เมื่อพิจารณาแบบจำลองไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช เขียนได้ดังสมการที่ (4) (Chen *et al.*, 2010)

$$logq_e = logK_F + \frac{1}{n}logC_e \quad (4)$$

เมื่อ K_F หมายถึงค่าคงที่ฟรุนดลิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ 1/n หมายถึงปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อ 1/n น้อยกว่าหนึ่ง แสดงว่าการดูดซับเป็นไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และเมื่อ 1/n มากกว่าหนึ่ง แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นร่วมกัน

<u>จลนศาสตร์ของการดูดซับไอออนของเหล็ก (III)</u>

การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาของการดูดซับเหล็กด้วยถ่านมูลช้างและถ่านมูลช้างปรับสภาพใช้แบบจำลอง Pseudo first order และ Pseudo-second order สมการ Pseudo-first order แสดงได้ดังสมการที่ (5) (Hameed, 2008)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (5)$$

เมื่อ q_t หมายถึงความสามารถในการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ต่อตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) k_1 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที) เมื่อนำผลความเข้มข้นและอุณหภูมิของการดูดซับเหล็กมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง log (q_e - q_t) กับ t ได้กราฟเส้นตรง ค่าคงที่อัตราเร็วของ Pseudo-first order (k_1) หาได้จากความชัน และ q_e พิจารณาจากจุดตัดของเส้นตรง ตามลำดับ สมการ Pseudo-second order แสดงดังสมการที่ (6) (Yagub *et al.*, 2014)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 {q_e}^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

เมื่อ k_2 หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม -นาที) เมื่อนำข้อมูลผลความเข้มข้นและอุณหภูมิของการดูดซับเหล็ก มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชันเป็น $1/q_e$ และจุดตัดแกนตั้งสามารถหาค่าคงที่ k_2

พารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมี

ในการทดลองนี้ มีพารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ (ΔH^0) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ การคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเอนโทรปี และพลังงานอิสระของกิบส์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ (Lakshmi *et al.*, 2019)

$$log\frac{q_e}{C_e} = \frac{\Delta S^0}{2.303R} - \frac{\Delta H^0}{2.303RT} \quad (7)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (8)$$

เมื่อ ΔH^0 หมายถึงการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ (กิโลจูลต่อโมล) ΔS^0 หมายถึง การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (จูลต่อโมลเคลวิน) ΔG^0 หมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (กิโลจูลต่อโมล) R หมายถึงค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน) และ T หมายถึงอุณหภูมิ (เคลวิน)

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

จากตารางที่ 1 พบว่าถ่านทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณสารระเหยมากที่สุด แสดงว่า มีสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยที่อุณหภูมิสูงได้อยู่มาก ปริมาณคาร์บอนคงตัวไม่แตกต่างกันมากนัก

***ตารางที่** 1* ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

สมบัติทางกายภาพ	ED	EDA
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.2750	0.2694
ความชื้น (%)	2.99	4.29
สารระเหย (%)	64.73	60.99
ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)	16.78	18.72
เถ้า (%)	15.50	16.00

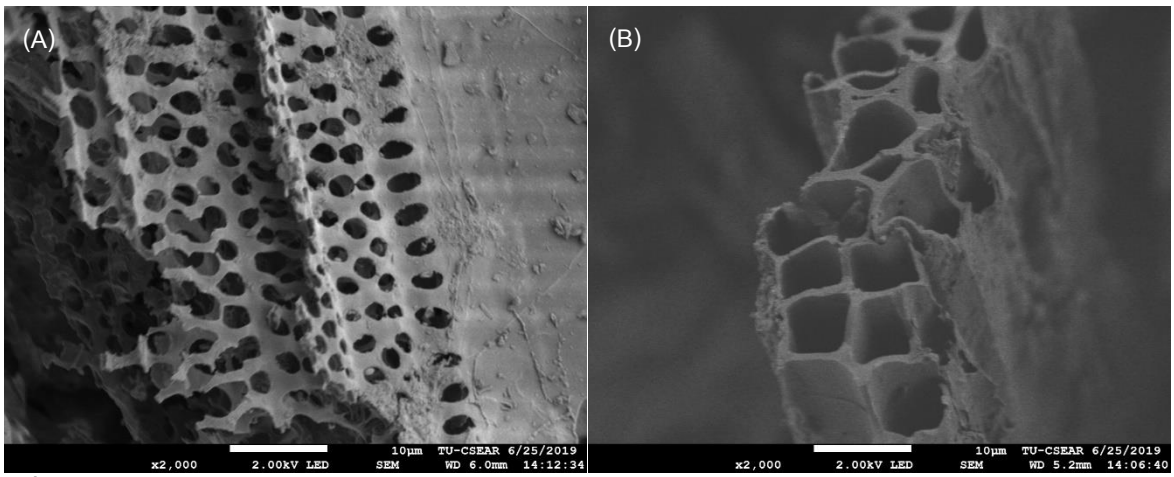
ผลการศึกษาลักษณะและโครงสร้างของตัวดูดซับ

รูปร่างของอนุภาคตัวดูดซับประเภทต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2 ผลการทดสอบพื้นที่ผิว โดยวิธี Brunauer-Emmet-Teller method (BET) แสดงดังตารางที่ 2 ผลการทดลองพบว่าจากการถ่านมูลช้าง (ED) และถ่านมูลช้างปรับสภาพ ด้วย NaCl ที่อัตราส่วน 1:1 (EDA) ทำให้พื้นที่ผิวของถ่าน EDA สูงขึ้น ประมาณร้อยละ 50.12 และ 34.21 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของอนุภาคถ่าน ED และ EDA โดยใช้ Fourier Transform infrared (FT-IR) spectrometer แสดง

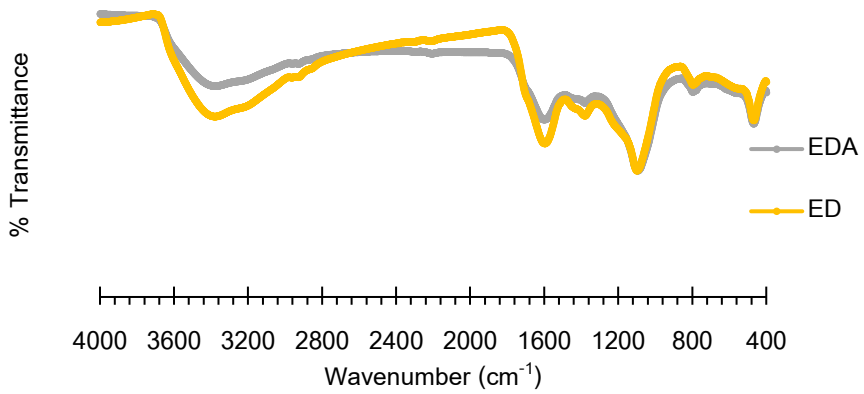
ดังภาพที่ 3 พบว่า ในขณะที่ถ่าน EDA จะปรากฏหมู่ที่ทำหน้าที่เพียงเล็กน้อยเนื่องจากผลของความไม่รุนแรงในการทำปฏิกิริยาของ NaCl ต่อคาร์บอน ได้แก่หมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ที่ 3400 cm^{-1} และหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ 1600 cm^{-1} ซึ่งในปริมาณต่ำมาก

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบพื้นที่ผิว โดยวิธี Brunauer-Emmet-Teller method (BET)

พื้นที่ผิว	ED	EDA
Single point surface area at p/p (m^2/g)	5.5276	8.4351
BET surface area (m^2/g)	5.6947	8.6564
Langmuir surface area (m^2/g)	9.6174	14.3873



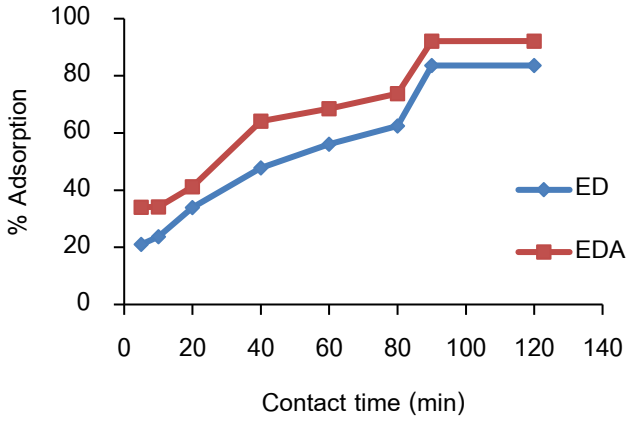
ภาพที่ 2 รูปร่างของอนุภาคตัวดูดซับ ED (A) และ EDA (B) โดยField Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)



ภาพที่ 3 หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ED และ EDA โดย FT-IR spectrometer

ผลการศึกษาระยะเวลาที่ดูดซับไอออนของเหล็ก (III)

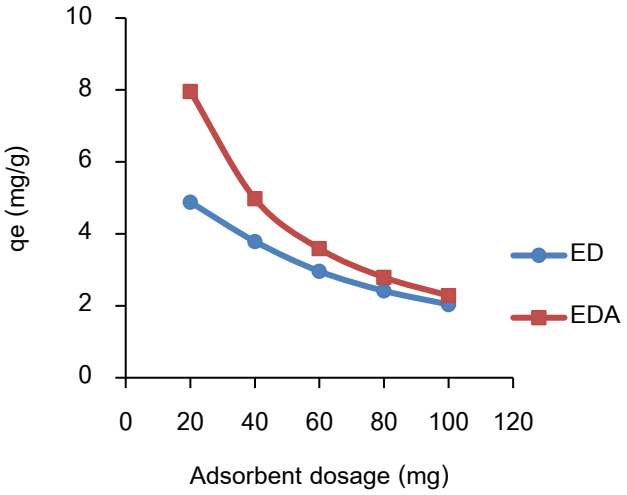
ผลการศึกษาระยะเวลาที่ดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ของตัวดูดซับแสดงได้ดังภาพที่ 4 พบว่า การดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดแสดงพฤติกรรมต่างกัน 2 ช่วง คือช่วงแรกที่ปริมาณดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและช่วงที่สองที่ปริมาณดูดซับลู่เข้าสู่ค่าคงที่หรือเข้าสู่สมดุลในช่วงเวลาประมาณ 90 นาที



ภาพที่ 4 ระยะเวลาที่ดูดซับเหล็กของตัวดูดซับ ED และ EDA

ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับ

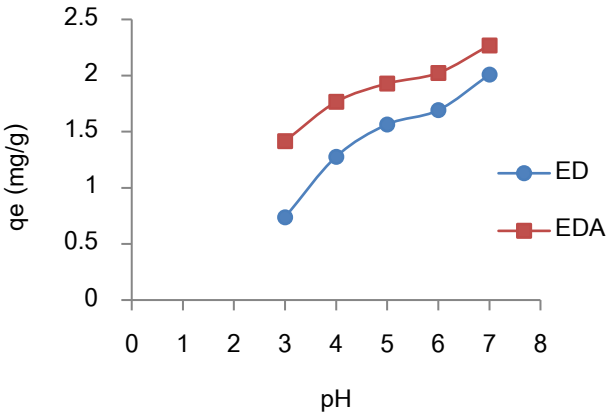
ภาพที่ 5 แสดงผลของปริมาณตัวดูดซับเหล็กที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าความสามารถในการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ลดลง เมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5 ผลปริมาณตัวดูดซับ ED และ EDA

ผลการศึกษาค่า pH ของการดูดซับไอออนของเหล็ก (III)

การทดสอบผลของค่า pH ที่ส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดเหล็กจะทดสอบค่า pH ในช่วง 2 ถึง 7 ไอออนของเหล็ก (III) ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรจะถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับแต่ละตัว ที่ค่า pH แตกต่างกัน โดยผลของค่า pH ต่อการดูดซับของไอออนของเหล็ก (III) แสดงในภาพที่ 6 ซึ่งพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่า pH การศึกษาครั้งนี้พบว่า pH 7 เป็นปริมาณสูงสุดสำหรับการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) โดยมีความสามารถในการดูดซับเฉลี่ยสูงสุด



ภาพที่ 6 ผลของค่า pH ต่อความสามารถในการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) ของตัวดูดซับ

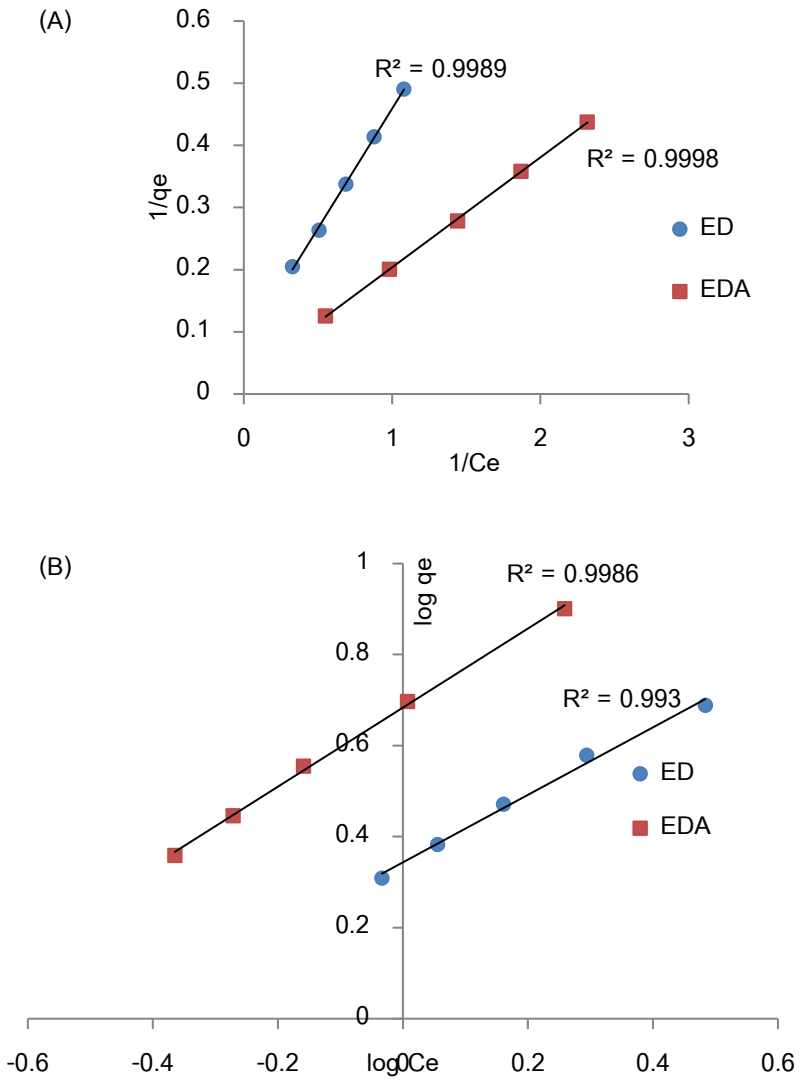
ไอโซเทอร์มการดูดซับของไอออนของเหล็ก (III) ของตัวดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) โดยใช้ตัวดูดซับเมื่อใช้สมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช แสดงดังภาพที่ 7 (a) และ (b) ตามลำดับ ในขณะที่ค่าคงที่ของแลงเมียร์และฟรุนดลิช แสดงในตารางที่ 3 ความถูกต้องของไอโซเทอร์มจากการดูดซับ พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีความใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่าสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดลิช อธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนของเหล็ก (III) บนผิวหน้าของตัวดูดซับที่มีลักษณะเหมือนกันได้หนึ่งชั้น (Monolayer) ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์และความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนของเหล็ก (III) นำมาใช้สำหรับคำนวณหาปัจจัยการแยก (Separation factor; R_L) เขียนได้ดังสมการที่ 9 (Moussavi & Khosravi, 2011) ดังต่อไปนี้

$$R_L = \frac{1}{1+K_L C_0} \quad (9)$$

การคำนวณปัจจัยการแยกนำมาแปลความหมายได้ 4 แนวทางดังนี้ R_L>1 อธิบายว่าไม่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับ (Unfavorable) R_L=1 อธิบายว่าไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear) 0<R_L<1 อธิบายว่าสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับ (Favorable) และ R_L=0 อธิบายว่าไอโซเทอร์มการดูดซับผันกลับไม่ได้ (Irreversible) จากตารางที่ 3 พบว่าค่าปัจจัยแยกอยู่ระหว่าง 0-1 จึงอธิบายได้ว่า สมดุลการดูดซับสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า ตัวดูดซับทุกประเภทเกิดการดูดซับเหล็กได้ดี

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณดูดซับไอออนเหล็ก (III) สูงสุดจากตัวดูดซับชนิดต่างๆ พบว่า การใช้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากมูลช้างโดยกระตุ้นด้วย NaCl เพื่อดูดซับไอออนเหล็ก (III) สูงกว่าตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากวัสดุเหลือทิ้ง เช่น ลูกหูกวาง ต้นกระถินและเปลือกเฮเซลนัท เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ Raw clinoptilolite ซึ่งเป็นตัวดูดซับในกลุ่ม zeolite พบว่า EDA มีปริมาณดูดซับไอออนเหล็ก (III) สูงสุดนั้นน้อยกว่าประมาณ 2.6 เท่า



ภาพที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับของไอออนเหล็ก (III) บนตัวดูดซับแบบแลงเมียร์ (A) และ แบบฟรุนดลิช (B)

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับของไอออนเหล็ก (III) แบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

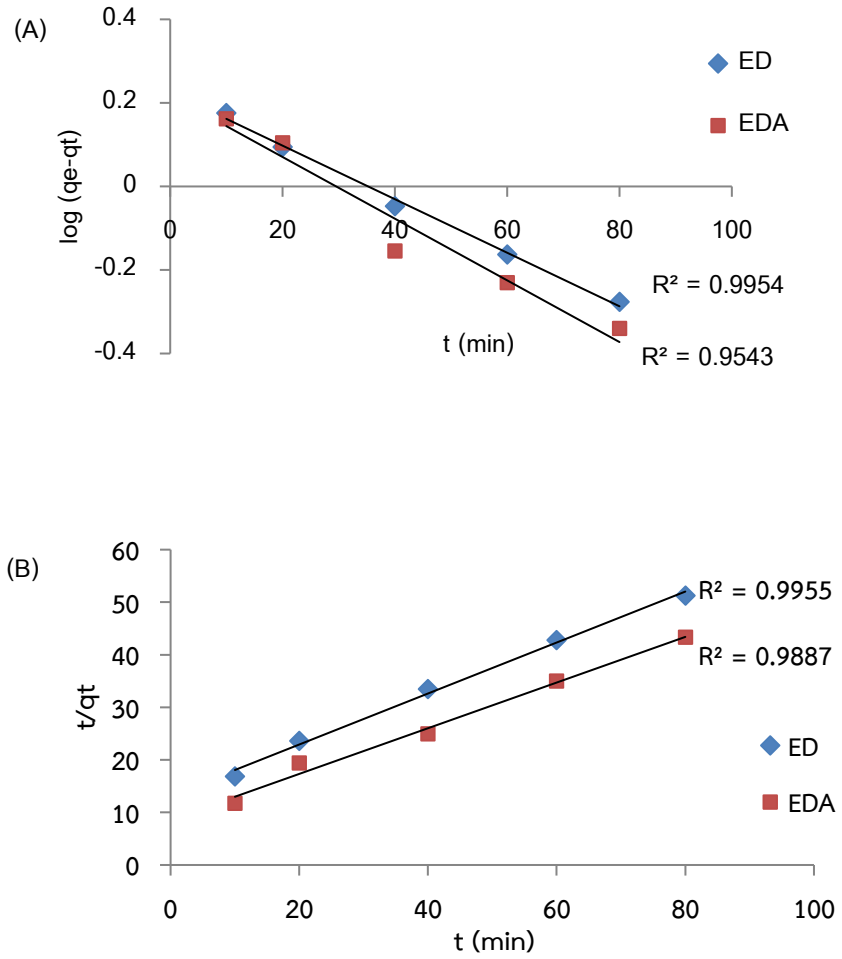
Adsorbents	Langmuir isotherms				Freundlich isotherms		
	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R_L	R^2	K_F (mg/g)(L/mg)$^{1/n}$	1/n	R^2
ED	13.57	0.1913	0.5111	0.9983	2.2060	0.7412	0.9930
EDA	37.45	0.1508	0.4407	0.9998	4.8250	0.8686	0.9986

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบปริมาณดูดซับไอออนเหล็ก (III) สูงสุดจากตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	ปริมาณดูดซับไอออนเหล็ก (III) สูงสุด (mg/g)	References
Periwinkle shell activated carbon	48.25	Gunorubon & Chukwunonso, 2018
Clay	30.00	Bhattacharyya & Gupta, 2006
Raw clinoptilolite	98.00	Öztaş *et al*., 2008
Rice hull activated carbon	45.45	Abdel-Ghani *et al*, 2015
เปลือกเฮเซลนัท	13.59	Sheibani *et al*.,2012
ถ่านคาร์บอไนซ์จากลูกหูกวาง	23.67	Maneechakr, 2017
ถ่านคาร์บอไนซ์จากต้นกระถิน	28.18	Maneechakr, 2017
ED	13.57	This study
EDA	37.45	This study

จลนศาสตร์การดูดซับของไอออนเหล็ก (III) บนตัวดูดซับ

จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเหล็ก (III) ด้วยตัวดูดซับเมื่อใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order แสดงดังภาพที่ 8 (A) และ (B) ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความสามารถและค่าคงที่ของอัตราเร็วการดูดซับไอออนเหล็ก (III) แสดงในตารางที่ 5 พบว่าสมการจลนศาสตร์ของ Pseudo-second order มีความเป็นเส้นตรงมากกว่า Pseudo-first order ดังนั้นเห็นว่าการดูดซับเหล็กของตัวดูดซับนี้เป็นไปตาม Pseudo-second order ซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี



ภาพที่ 8 จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเหล็ก (III) ของตัวดูดซับตามแบบจำลอง Pseudo-first order (A) และ Pseudo-second order (B) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 mg/L

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบค่าความสามารถและค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับไอออนเหล็ก (III) จากตัวดูดซับ

Adsorbent	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
	q_e	k_1 (min^{-1})	R^2	q_e	k_2 ($g\ mg^{-1}min^{-1}$)	R^2
ED	1.6823	0.0147	0.9954	2.0619	0.0079	0.9955
EDA	1.6527	0.017	0.9543	2.3015	0.0095	0.9887

พารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมี

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 25 - 55 องศาเซลเซียส (298-328 องศาเคลวิน) ของการดูดซับเหล็กความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e/C_e$ กับ 1/T จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\Delta H^0/2.303R$ และจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $\Delta S^0/2.303R$ ค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมีแสดงในตารางที่ 6 พบว่า ΔG^0 ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าเป็นลบที่ทุกอุณหภูมิที่ทดลอง ΔH^0 และ ΔS^0 ที่คำนวณจากสมการดังกล่าวเป็นลบ อย่างไรก็ตาม ค่าของ ΔH^0 และ ΔS^0 ที่ได้จาก EDA นั้นสูงกว่าที่ได้จาก ED ประมาณ 2.2 เท่า

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมีการดูดซับไอออนเหล็ก (III)

Adsorbent	ΔH^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (kJ/mol-K)	ΔG^0 (kJ/mol)			
			298 K	308 K	318 K	328 K
ED	-6.3785	0.0276	-14.5966	-14.8724	-15.1482	-15.4239
EDA	-14.1455	0.0605	-32.1709	-32.7758	-33.3806	-33.9855

วิจารณ์ผลการวิจัย

EDA สามารถดูดซับไอออนเหล็ก (III) ได้มากกว่า ED ภายใต้สภาวะเดียวกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาก รายงานว่าการปรับสภาพ ED ด้วย NaCl ทำให้หมู่ฟังก์ชันออกซิเจนซึ่งจะเกิดเป็นสารตัวกลาง เช่น –O-Na และ –COONa และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสารตัวกลางจะสลายเป็นสารระเหยและเกิดช่องว่างบนผิวอนุภาค ทำให้พื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจึงเพิ่มขึ้น (Liu *et al*., 2019) ระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด พบว่าในช่วงแรกที่ปริมาณดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและช่วงที่สองที่ปริมาณดูดซับลู่เข้าสู่ค่าคงที่หรือเข้าสู่สมดุล ทั้งนี้เกิดจากในช่วงแรกเหล็กจะถูกดูดซับที่พื้นที่ผิวภายนอกของตัวดูดซับ เมื่อเวลาการดูดซับเพิ่มขึ้น เหล็กจะถูกแพร่ผ่านเข้าไปในโครงสร้างภายในที่เป็นรูพรุนอย่างช้าๆ ซึ่งระยะเวลาการดูดซับ 90 นาทีสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา (Kouakou *et al*., 2013)

ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนเหล็ก (III) ขึ้นอยู่กับปริมาณตัวดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับไอออนเหล็ก (III) ของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดลดลง เมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยอธิบายว่า ความสามารถในการดูดซับเหล็กลดลง เนื่องจากเกิดการการซ้อนทับ (Overlapping) หรือการรวมกัน (Aggregation) ของ adsorption site จึงทำให้พื้นที่ผิวรวมของตัวดูดซับลดลง (Kılıç, *et al*., 2013)

ค่า pH เป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมกระบวนการดูดซับเนื่องจากค่า pH ส่งผลกระทบต่อประจุพื้นผิวของตัวดูดซับและระดับไอออนไนซ์ (Gunorubon & Chukwunonso, 2018) ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่า pH อาจอธิบายได้ว่าค่า pH ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นประจุลบบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิด deprotonization ของกลุ่มประจุบวกบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Kouakou *et al*., 2013)

อัตราการดูดซับของ ED และ EDA เป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสองเสมือน หมายความว่าเมื่อมวลของตัวดูดซับคงที่ อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณไอออนเหล็ก (III) ที่ถูกดูดซับยกกำลังสอง ในแง่ของกลไกการดูดซับจะ

เกิดจากแรงทางเคมี (Chemisorption) โดยไอออนของโลหะจะยึดติดกับพื้นผิวดูดซับโดยสร้างพันธะเคมี (มักจะเป็นพันธะโควาเลนต์) ที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Gunorubon & Chukwunonso (2018) ที่ศึกษาการดูดซับไอออนเหล็ก (Fe^{3+}) ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกหอย และ Akbar *et al*., (2016) ศึกษาการดูดซับเหล็กด้วยปูนขาวคุณภาพสูงในน้ำใต้ดิน โดยรายงานตรงกันว่าอัตราการดูดซับเหล็กของตัวดูดซับดังกล่าวเป็นไปตามจลนศาสตร์อันดับสองเสมือน

ปริมาณดูดซับสมดุลของไอออนเหล็ก (III) เป็นไปตามไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ในกรณีของ ED และ EDA ดังนั้นกระบวนการดูดซับ ที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ไม่มีการซ้อนทับกัน (Monolayer adsorption) และมีค่าความสามารถในการดูดซับไอออนเหล็ก (III) สูงสุดของ ED และ EDA เท่ากับ13.57 และ 37.45 mg/g ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่า R_L มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี และเมื่อพิจารณาค่า 1/n จากสมการฟรุนดลิช พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณตำแหน่งที่เกิดการดูดซับมีจำกัด (Kannan *et al*., 2009) ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาเช่นเดียวกัน (Gunorubon & Chukwunonso, 2018; Akbar *et al*., 2016)

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°)ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการดูดซับเกิดได้เอง เครื่องหมายลบของเอนทาลปีของการดูดซับ (ΔH°) แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาคายความร้อน การที่การดูดซับบน EDA มีการคายความร้อนที่สูงกว่าการดูดซับบน ED บ่งชี้ว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและEDA มีความแข็งแรงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและ ED เอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าเป็นลบ แสดงว่าระบบมีความไม่เป็นระเบียบลดลงหลังเกิดการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับทำให้โมเลกุลของเหล็กที่เคยกระจายตัวอย่างอิสระในสารละลายถูกตรึงไว้บนผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้ค่าของ ΔS° สำหรับ EDA สูงกว่า ED มาก อาจแสดงถึงการยึดเกาะที่สม่ำเสมอของโมเลกุลเหล็กบนผิวของ EDA พิจารณาความสัมพันธ์ในสมการที่ 8 ($\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ}$) เนื่องจาก ΔH° และ ΔS° ของการดูดซับในครั้งนี้มีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นกระบวนการดูดซับจะถูกขับเคลื่อนให้ดำเนินไปข้างหน้าโดย ΔH° (การคายความร้อน) แต่ถูกต้านด้วยอิทธิพลของΔS° (การลดลงของเอนโทรปี) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เครื่องหมายลบของทั้ง ΔH° และ ΔS° ที่ได้จากการดูดซับเหล็กบน ED และ EDA ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับ ΔH° และ ΔS° ที่ได้จากการดูดซับเหล็กบนขี้เถ้าแกลบในงานวิจัยที่ผ่านมา (Adekola *et al*., 2016)

สรุปผลการวิจัย

ถ่านชีวภาพมูลช้างที่ปรับสภาพด้วย NaCl และถ่านชีวภาพมูลช้างที่ไม่ปรับสภาพต่างก็เป็นตัวดูดซับไอออนเหล็ก (III) ในน้ำที่ดี โดยถ่านชีวภาพมูลช้างที่ปรับสภาพด้วย NaCl สามารถดูดซับไอออนเหล็ก (III) ได้มากกว่าถ่านชีวภาพมูลช้างที่ไม่ปรับสภาพ ปริมาณดูดซับที่สมดุลแปรผกผันกับมวลของถ่านชีวภาพที่ใช้ ค่า pH เป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมกระบวนการดูดซับในการวิจัยนี้ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนเหล็ก (III) คือ 7 อัตราการดูดซับของไอออนเหล็ก (III) บนตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสองเสมือน ปริมาณดูดซับสมดุลของไอออนเหล็ก (III) บนตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นไปตามไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ ดังนั้นกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว และมีปริมาณการดูดซับไอออนเหล็ก (III) ของ ED และ EDA เท่ากับ13.57 และ 37.45 mg/g ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์

(ΔG°)ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการดูดซับเกิดได้เอง และเครื่องหมายลบของเอนทาลปีของการดูดซับ (ΔH°) แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาคายความร้อน ตัวดูดซับจากงานวิจัยนี้สามารถดูดซับเหล็กได้ดี จึงมีความน่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้มอบทุนสนับสนุนนักวิจัยรุ่นใหม่ ปีงบประมาณ 2561 (เลขที่ทุน 8/2561) เพื่อสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณสาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และครุภัณฑ์ของห้องปฏิบัติการอนามัยสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย จังหวัดลำปางที่ให้ความอนุเคราะห์มูลช้างเพื่อใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Abdel-Ghani, N. T., El-Chaghaby, G. A., & Zahran, E. M. (2015). Cost effective adsorption of aluminium and iron from synthetic and real wastewater by rice hull activated carbon (RHAC). *American Journal of Analytical Chemistry*, *6*, 71-83.

Adekola, F. A., Hodonou, D. S. S. & Adegoke, H. I. (2016). Thermodynamic and kinetic studies of biosorption of iron and manganese from aqueous medium using rice husk ash. *Applied Water Science*, *6*, 319–330.

Akbar, N., A., Aziz, H., A., & Adlan, M. N. (2016). Potential of high quality limestone as adsorbent for iron and manganese removal in groundwater. *Jurnal Teknologi*, *78*(9-4), 77-82.

APHA. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington DC: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.

Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. S. (2006). Adsorption of Fe(III) from water by natural and acid activated clays: studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions. *Adsorption, 12,* 185–204.

Chen, S., Zhang, J., Zhang, C., Yue, Q., Li, Y., & Li, C. (2010). Equilibrium and kinetic studies of methyl orange and methyl violet adsorption on activated carbon derived from *Phragmites australis*, *Desalination*, *252*, 149-156.

Gunorubon, A.J., & Chukwunonso, N. (2018). Kinetics, Equilibrium and Thermodynamics studies of Fe3+ ion removal from aqueous solutions using periwinkle shell activated carbon. *Advances in Chemical Engineering and Science*, *8,* 49-66.

Hameed, B.H. (2008). Equilibrium and kinetic studies of methyl violet sorption by agricultural waste, *Journal of Hazardous Materials*, *154,* 204-212.

Haron, W., Thongchai, A., Benhawan, A. & Waema, S. (2019). Removal of toxic heavy metals in water by using natural products as adsorbent. *Burapha Science Journal*, *24*(2), 644-664. (in Thai)

Kannan, C., Buvaneswari, N., & Palvannan, T. (2009). Removal of plant poisoning dyes by adsorption on tomato plant root and green carbon from aqueous solution and its recovery. *Desalination*, *249*(8), 1132-1138

Kouakou, U., Ello, A. S., Yapo, J.A., & Trokourey, A. (2013). Adsorption of iron and zinc on commercial activated carbon. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, *5*(6), 168-171.

Lakshmi, U.R., Srivastava, V.C., Mall, I.D. & Lataye, D.H. (2009). Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive characteristics for indigo carmine dye. *Journal of Environmental Management*, *90*, 710-720.

Liu, D., Su, R., Hao, Z., Jia, B. & Dong, L. (2019). Catalytic effect of NaCl on the improvement of the physiochemical structure of coal-based activated carbon for SO_2 adsorption. *Process*, *7*(338), 1-16.

Maneechakr, P. (2017). Preparation of low-cost activated carbon by carbonization using muffle furnace for iron(III) removal. *APHEIT journal 6*(2), 72-84. (in Thai)

Moussavi, G. & Khosravi, R. (2011). The removal of cationic dyes from aqueous solutions by adsorption onto pistachio hull waste. *Chemical Engineering Research and Design*, *89,* 2182-2189.

Öztaş, N.A., Karabakan, A., & Topal, Ö. (2008). Removal of Fe(III) ion from aqueous solution by adsorption on raw and treated Clinoptilolite samples. *Microporous and Mesoporous Materials*, *111*, 200-205.

Regmi, P., Moscoso, G. J. L., Kumar, S., Cao, X., Mao, J. & Schafran, G. (2012). Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. *Journal of Environmental Management*, *109,* 61 – 69.

Sheibani, A., Shishehbor, M. R., & Alaei, H. (2012). Removal of Fe(III) ions from aqueous solution by hazelnut hull as an adsorbent. *International Journal of Industrial Chemistry*, *3*, 1-4.

Uchimiya, M., Lima, I.M., Klasson, T.K. & Wartelle, L.H. (2010). Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: roles of natural organic matter. *Chemosphere*, *80,* 935 – 940.

Yagub, M.T., Sen, T.K., Afroze, S., & Ang, H.M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, *209,* 172–184.