Research Article
Journal of Vocational Education in Agriculture Vol. 8 ● No. 2 • July – December 2024

ศักยภาพการกำจัดไอออนโลหะ Pb^{2+} จากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาแมคคาเดเมีย: การศึกษาไอโซเทอมและเทอร์โมไดนามิกส์

The effective removal of the metal ion Pb^{2+} from an aqueous solution by activated carbon prepared from macadamia nut shell: isotherm and thermodynamic studies

ศุภกานต์ มีไทย[1] พัชรินทร์ สีคำจีน[1] และ ปิยรัตน์ มูลศรี[2*]
Suphakan Meethai[1], Patcharin Sikhamchin[1] and Piyarut Moonsri[2*]

Received: 23 September 2023
Revised: 12 May 2024
Accepted: 13 June 2024

บทคัดย่อ

ปัญหาการปนเปื้อนไอออนโลหะหนักตะกั่ว (Pb^{2+}) ทั้งแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดินเป็นปัญหาที่ร้ายแรงและมีผลต่อสุขภาพต่อทั้งคนและสัตว์ที่ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำในการอุปโภคและบริโภค และควรได้รับการแก้ไขโดยเร่งด่วน วิธีการที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำคือการใช้กระบวนการดูดซับด้วยสารตัวดูดซับ โดยถ่านกัมมันต์เป็นสารตัวดูดซับอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจนำมาใช้สำหรับการกำจัดไอออนโลหะหนัก Pb^{2+} งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะและศักยภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเศษกะลาแมคคาเดเมียในการกำจัดไอออนตะกั่วจากสารละลาย จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนขนาดไมครอนจำนวนมาก มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนอยู่มากกว่าร้อยละ 80 มี pH_{pzc} เท่ากับ 6 ที่สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าการดูดซับ Pb^{2+} สูงสุดเท่ากับ 37.03 mg g^{-1} สามารถกำจัด Pb^{2+} ได้มากกว่าร้อยละ 81 โดยไอโซเทอมของการดูดซับเข้ากันได้ดีกับไอโซเทอมของ Langmuir มีค่าเทอร์โมไดนามิกส์พารามิเตอร์ $\Delta G < 0$ และ ΔH^0 เท่ากับ -6.39 kJ mol^{-1} บ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับนี้เป็นแบบคายความร้อน

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ กะลาแมคคาเดเมีย ไอออนตะกั่ว

[1]สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์ ประเทศไทย 67000
[1]Program of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University, Phetchabun, Thailand 67000
[2]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์ ประเทศไทย 67000
[2]Program of Science Education, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University, Phetchabun, Thailand 67000
*ผู้นิพนธ์ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: piyarut.m@pcru.ac.th

ABSTRACT

The problem of lead heavy metal ion (Pb^{2+}) contamination in both surface and underground water sources is a serious problem that affects the health of both people and animals that use the water sources for consumption and should be resolved urgently. A commonly used and effective method for removing heavy metal ions contaminated with water is by using an adsorbent process. Activated carbon is another adsorbent that has received interest in removing the heavy metal ion Pb^{2+}. This research aims to study the characteristics and potential of activated carbon prepared from macadamia nut shells for removing lead ions from solutions. From the study, it was found that the prepared activated carbon has a surface with many micron-sized pores. Contains more than 80 % of the carbon element and has a pH_{pzc} of 6 at conditions suitable for adsorption. The prepared activated carbon had the highest Pb^{2+} adsorption value of 37.03 mg g^{-1}, able to remove more than 81% of Pb^{2+}. The adsorption isotherm matched well with the Langmuir isotherm. The thermodynamic parameters $\Delta G < O$ and ΔH^0 are equal to -6.39 kJ mol^{-1}, indicating that this adsorption process is exothermic.

Keywords: Activated carbon; Macadamia nut shell; Lead ion

บทนำ

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่สามารถปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมทั้งในดิน น้ำ อากาศและสะสมอยู่ได้เป็นเวลานานโดยมีแหล่งที่มา เช่น กระบวนการทำเหมืองแร่และการถลุงแร่ กระบวนการในอุตสาหกรรมหนัก การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล การทิ้งและการทำลายแบตเตอรี่อย่างไม่ถูกต้อง ชิ้นส่วนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และวัสดุที่เคลือบผิวด้วยตะกั่ว [1,2] โดยไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) ที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดินก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ได้ เช่น ผลกระทบต่อระบบประสาท หัวใจและหลอดเลือด ไต และระบบสืบพันธุ์ [3,4] วิธีการกำจัดไอออน Pb^{2+} ออกจากน้ำเสียสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการไฟฟ้าเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน วิธีการทางเคมี และการดูดซับ [5-10] ซึ่งวิธีการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ได้รับความนิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากมีพื้นผิวสำหรับใช้ในการดูดซับสูง มีต้นทุนต่ำ สามารถทำได้ในปริมาณมาก และยังสามารถนำถ่าน กัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ได้ [11,12] โดยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่เตรียมจาก ถ่านหิน ไม้ พีท และกะลามะพร้าว แต่อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากชีวมวลและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่างๆ ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความสนใจและนำมาใช้ในการเป็นสารดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสีย เนื่องจากสามารถนำมาใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดี มีความสามารถในการดูดซับสูง เป็นการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [13,14] ทั้งนี้คุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัสดุเหล่านี้ขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุและสภาวะในการเตรียม โดยชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้มีการศึกษาและมีศักยภาพในการนำมาใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ได้แก่ ฟางข้าว แกลบ เปลือกถั่ว เปลือกปาล์ม ก้านกล้วย กะลามะพร้าว ซังข้าวโพด ฝักมะขามขึ้นรา และเศษกะลาแมคคาเดเมีย เป็นต้น [15-25] ทั้งนี้เศษกะลาแมคคาเดเมียเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่มีความน่าสนใจเพื่อใช้เป็นทางเลือกต้นทุนต่ำสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นของเหลือทิ้ง

ทางการเกษตรที่มีปริมาณมาก มีองค์ประกอบของสารลิกนินอยู่มาก ที่สามารถนำไปแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าได้ โดยกระตุ้นด้วยความร้อนเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์สำหรับนำไปใช้ในการเป็นสารดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสีย หรือการกรองน้ำบาดาล หรือน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อนำไปใช้ในการอุปโภค บริโภคได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะและศักยภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเศษกะลาแมคคาเดเมียในการกำจัดไอออนของตะกั่วจากสารละลาย

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมียโดยการเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติทางเคมีของพื้นผิว สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ รูปแบบและเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้

1.การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

เศษกะลาแมคคาเดเมียจากกลุ่มเกษตรกรแปรรูปผลไม้เมืองหนาวหนองแม่นา อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ถูกเตรียมโดยล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น นำไปตากให้แห้งด้วยแสงแดดและนำไปอบด้วยเครื่องอบลมร้อน (รุ่น UM500, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 80 ^{0}C นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดลดขนาดและทำการร่อนด้วยตระแกรงร่อนเพื่อคัดขนาดของอนุภาค 5-10 mesh ล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง แล้วนำไปอบให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนนาน 24 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นนำไปเผาด้วยเตาเผา (รุ่น CWF1300, Carbolite Gero, Germany) ที่อุณหภูมิ 800 ^{0}C นาน 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นในเตา แล้วนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด 2-3 ครั้ง แล้วนำไปอบให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 ^{0}C นาน 24 ชั่วโมงจะได้ถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย นำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

2. การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์

สัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ถูกตรวจสอบโดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, รุ่นPhenom XLG2 Desktop SEM, Thermo Fisher Scientific, Netherland) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ และใช้เทคนิค SEM-EDS (energy dispersive spectroscopy) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

3. การวิเคราะห์ความเป็นกรดด่าง/และค่า pH_{pzc} ของพื้นผิวถ่านกัมมันต์

การตรวจหาความเป็นกรดและความเป็นด่างของพื้นผิวของถ่านกัมมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย ทำโดยการใช้เทคนิคการไทเทรต โดยการนำถ่านกัมมันต์ 0.2 g แช่ทิ้งไว้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH)0.05 M ปริมาตร 25 mL นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารสารละลาย และนำไปไทเทรตด้วยสารละลายไฮโดรคลอลิก (hydrochloric acid, HCl) 0.05 M เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เหลืออยู่ การหาความเป็นด่างของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ทำโดยนำถ่านกัมมันต์ 0.2 g แช่ทิ้งไว้ในสารละลาย 0.05 M HCl ปริมาตร 25 mL นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารสารละลาย และนำไปไทเทรตด้วยสารละลาย0.05 M NaOH เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย HCl ที่เหลืออยู่สำหรับการค่า pH_{pzc} (point of zero charge) ทำโดยการปรับสภาพ pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride, NaCl) 0.1 M ปริมาตร 50 mL ด้วยสารละลาย NaOH หรือสารละลายกรด HCl เพื่อให้มี pH อยู่ในช่วง 2-12 วัดโดยใช้เครื่องวัด pH (รุ่น LF300, WTW, USA) จากนั้นทำการเติมถ่านกัมมันต์ลงไปในแต่ละสารละลายอย่างละ 0.15 g และทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง แล้วตรวจวัดหาค่า pH สุดท้ายของสารละลาย ทำการพล็อตกราฟระหว่างค่า pH เริ่มต้น และค่า pH ของสารละลาย โดยค่า pH ที่จุดตัด pH = 0 คือค่า pH_{pzc} [15]

4. การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ

4.1 การหา pH ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไอออน Pb^{2+} บนถ่านกัมมันต์ทำที่ช่วงค่า pH เท่ากับ 2-12 โดยค่า pH ของสารละลายถูกปรับโดยใช้สารละลาย NaOH (0.1 mol L^{-1}) และ HCl (0.1 mol L^{-1}) โดยแต่ละการทดลองที่แต่ละค่า pH ใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1 g ใส่ลงไปในสารละลายปริมาตร 100 mL ของสารละลาย Pb^{2+} ความเข้มข้น 50 mg L^{-1} แล้วนำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 30 ^{0}C นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตรวจวัดความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายที่สภาวะสมดุลของสารละลาย Pb^{2+} โดยใช้เครื่อง atomic adsorption spectrophotometer (AAS, รุ่น PinAAcle 900F, PerkinElmer, USA) และร้อยละของไอออน Pb^{2+} ที่ถูกกำจัดออกไปจากสารละลายโดยตัวดูดซับคำนวณโดยใช้สมการ[20]

$$\%Pb^{2+}\ \text{removal} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

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

ความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) ที่สภาวะสมดุลของตัวถูกดูดซับสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

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

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

4.2 การหาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไอออน Pb^{2+} บนถ่านกัมมันต์ทำโดยการเติมถ่านกัมมันต์ลงไปในสารละลาย Pb^{2+} ความเข้มข้น 50 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL (ที่ pH7) โดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ในช่วง 0.05 g – 0.4 g นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 30 ^{0}C นาน 2 ชั่วโมง แล้วตรวจวัดหาความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายที่สภาวะสมดุลของไอออน Pb^{2+} ในสารละลายและคำนวนหาความสามารถในการกำจัดไอออน Pb2+และความสามารถในการดูดซับไอออน Pb^{2+} ของถ่านกัมมันต์ตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ [28]

4.3 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไอออน Pb^{2+} บนถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 ^{0}C 40 ^{0}C และ 50 ^{0}C โดยแต่ละการทดลองทำโดยการนำถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1 g ใส่ลงไปในสารละลาย Pb^{2+} ความเข้มข้น 50 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL (ที่pH7) จากนั้นนำไปเขย่าที่อุณหภูมิที่กำหนดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปตรวจวัดความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายที่สภาวะสมดุลของ Pb^{2+} และคำนวนหาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ตามสมการที่ 2

5. การหารูปแบบของการดูดซับ (adsorption isotherm)

นำถ่านกัมมันต์ 0.1 g ใส่ลงไปในสารละลาย Pb^{2+} ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10, 25, 50, 75, และ 100 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL (ที่ pH 7) จากนั้นนำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 40 ^{0}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงทำการตรวจวัดความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายที่สภาวะสมดุลของ Pb^{2+} โดยใช้เครื่อง AAS แล้วนำผลที่ได้ไปหารูปแบบของการดูดซับจากสมการของ Lagmuir, Freundlich และ Dubinin-Radushkevich

6. เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (adsorption thermodynamic)

นำถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1 g ใส่ลงไปในสารละลาย Pb^{2+}ความเข้มข้น 50 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL (ที่pH7) จากนั้นนำไปเขย่าที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 ^{0}C 40 ^{0}C และ 50 ^{0}C ทำการตรวจวัด

ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายที่สภาวะสมดุลของ Pb^{2+} และคำนวนหาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับโดยใช้สมการของ Van' t Hoff [30]

ผลการวิจัย

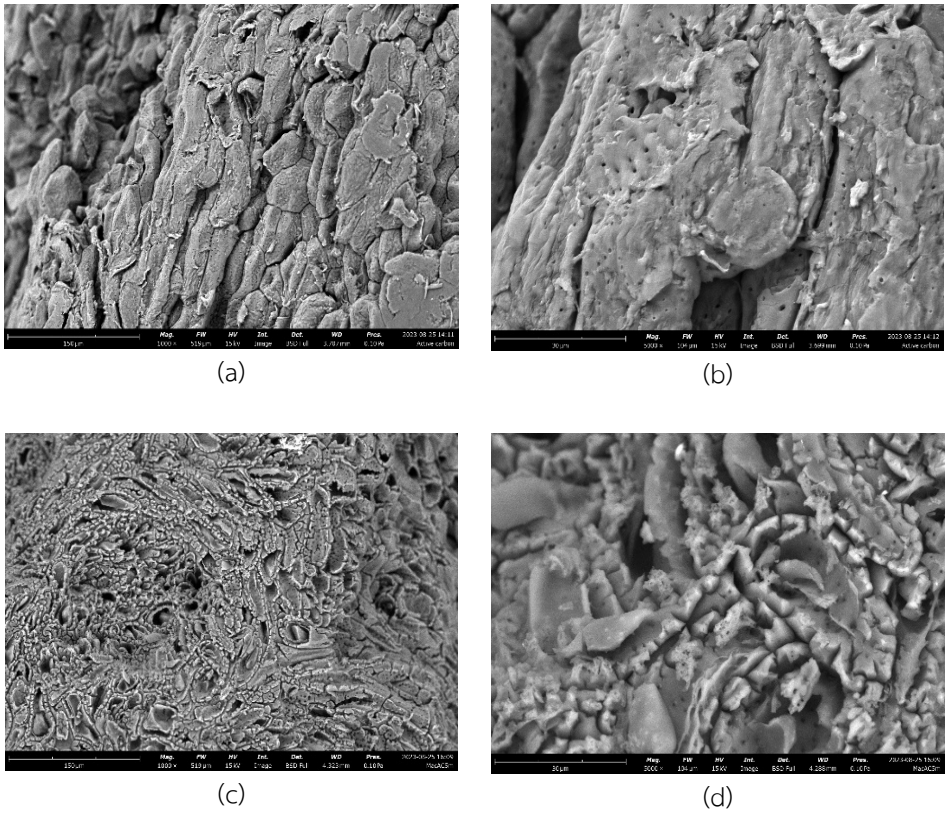
1. การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์

ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของผงจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย (MAC-MT) ที่เหลือทิ้งจากการกะเทาะเปลือกแข็งหุ้มเมล็ดแมคคาเดเมียออกในกระบวนการผลิตเมล็ดแมคคาเดเมียอบแห้ง (ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10 mesh < 5 mesh) ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) และถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย (MAC-AC) ที่เตรียมได้ดังรูปที่ 1 (b) ได้ถูกนำไปตรวจสอบลักษณะสภาพพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยายที่แตกต่างกัน โดย MAC-MT แสดงลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบและมีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ โดยไม่มีโครงสร้างรูพรุนลึกดังรูปที่ 2 (a, b) ในขณะที่ MAC-AC แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นผิวที่มีรูพรุนระดับไมครอนจำนวนมากบนพื้นผิว ดังรูปที่ 2 (c, d) ซึ่งความพรุนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์อาจเกิดจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อนซึ่งสารที่ระเหยได้จะเกิดการระเหยไปในขั้นตอนการไพโรไลซิสของการเตรียม โดยโครงสร้างจุลภาคมีความพรุนสูงในถ่านกัมมันต์นี้ ทำให้มีพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นช่วยให้ความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ดีขึ้น



(a) (b)

ภาพที่ 1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) เศษกะลาแมคคาเดเมีย(MAC-MT) และ (b) ถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย (MAC-AC)



(a) (b)

(c) (d)

ภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย x1000 และ x5000 ของเศษกะลาแมคาเดเมีย MAC-MT (a,b) และถ่านกัมมันต์ MAC-AC (c,d)

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีหรือธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง MAC-MT และ MAC-AC โดยใช้เทคนิค SEM-EDS พบว่าปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ใน MAC-MT ได้แก่ ธาตุ C และ O ในสัดส่วนร้อยละ 58.05 และ 38.89 ตามลำดับ และที่ MAC-AC มีองค์ประกอบหลักคือ ธาตุ C และ O ในสัดส่วนร้อยละ 80.36 และ 19.27 ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วยความร้อนทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสัดส่วนของ C เพิ่มขึ้น และมีสัดส่วนของ O ลดลง อย่างชัดเจน โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นี้มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งมักพบในถ่านกัมมันต์ [19-24]

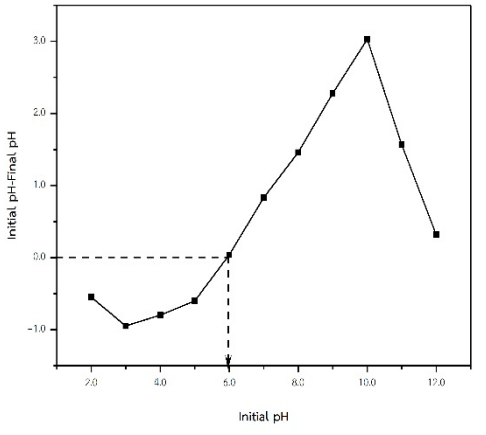
ตารางที่ 1 สัดส่วนของธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใน MAC-MT และ MAC-AC

Materials	% Atom of Elements					
	C	O	K	Fe	P	S
MAC-MT	58.05	38.89	2.22	0.03	0.05	0.05
MAC-AC	80.36	19.27	-	0.05	0.04	0.04

3. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด/ด่าง และค่า pH_{pzc} ของพื้นผิวถ่านกัมมันต์

การตรวจหาความเป็นกรด (surface acidity) และความเป็นด่าง (surface basicity) ของพื้นผิวของถ่านกัมมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย ทำโดยการใช้เทคนิคการไทเทรต พบว่าความเป็นกรดของพื้นผิวถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 1.6333 mmol/g AC และมีความเป็นด่างของพื้นผิวเท่ากับ 0.4917 mmol/g AC

ค่า pH_{pzc} ของสารตัวอย่างคือ ค่า pH ที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าเท่ากับศูนย์ [31] โดยในรูปที่ 3 แสดงการพล๊อตกราฟระหว่างค่า pH เริ่มต้น (initial pH) และค่าผลต่างของ pH เริ่มต้นและ pH สุดท้าย (ΔpH) ของสารละลาย โดย pH ที่จุดตัด ΔpH= 0 คือค่า pH_{pzc} พบว่ามีค่าเท่ากับ 6 โดยพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีค่าเป็นลบเมื่ออยู่ในสารละลายที่มี pH น้อยว่า 6 และมีค่าเป็นบวกเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่า pH มากกว่า 6 ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าที่สภาวะของการดูดซับนั้นพื้นผิวของสารตัวอย่างมีสภาพประจุเป็นอย่างไร ทำให้สามารถอธิบายของการดูดซับโลหะหนักบนพื้นผิวได้



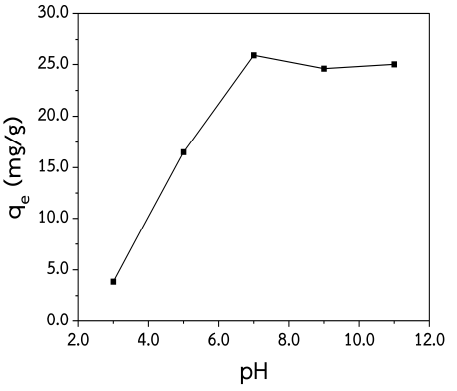
ภาพที่ 3 The point of zero charge ของถ่านกัมมันต์ (MAC-AC)

4. การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ

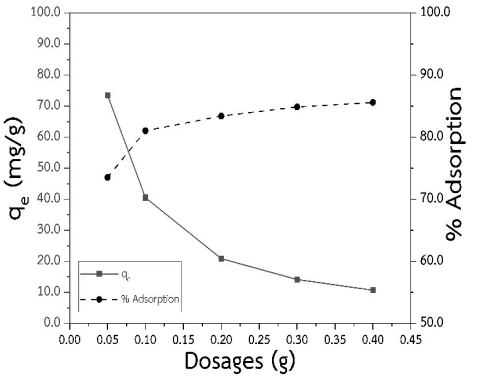
จากการศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ Pb^{2+} ของ MAC-AC แสดงได้ดังรูปที่ 4(a) ซึ่งจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับ Pb^{2+} ของถ่านกัมมันต์ในช่วง pH 3-11 พบว่า MAC-AC มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ pH7 โดยจะมีค่าการดูดซับ Pb^{2+} ลดลงเล็กน้อยเมื่อ pH มีค่าเพิ่มขึ้น ที่สภาวะ pH 3 ค่าการดูดซับ Pb^{2+} มีค่าต่ำสุด โดยจากการศึกษาพบว่า pH_{pzd} มีค่าเท่ากับ 6 แสดงว่าสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีสภาพเป็นลบที่สภาวะ pH < 6 และมีสภาพเป็นบวกที่สภาวะ pH > 6 ดังนั้นที่สภาวะ pH ของสารละลายต่ำๆจึงอาจมีการแข่งขันของไอออน H^+ หรือ H_3O^+ ในการเข้าไปครอบครอง

พื้นผิวของ MAC-AC [19] ทำให้ความสามารถในการดูดซับไอออน Pb^{2+} ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับไอออนก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลกระทบของสารละลายที่เป็นกรดลดลงและสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีสภาพเป็นบวกเพิ่มขึ้น โดยความสามารถในการดูดซับไอออน Pb^{2+} มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง pH ของสารละลายเท่ากับ 7 อย่างไรก็ตามเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นพบว่าความสามารถในการดูดซับไอออน Pb^{2+} ลดลงเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากการตกตะกอนของ metal hydroxides [2, 26] ดังนั้นภายใต้สภาวะ pH ของสารละลายที่เป็นกลางจึงทำให้ MAC-AC มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออน Pb^{2+} สูง ดังนั้นที่ค่า pH 7-8 จึงเป็นค่า pH ที่เหมาะสม สำหรับการศึกษานี้ปริมาณของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับไอออน Pb^{2+} ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่กำหนดของตัวดูดซับ รูปที่ 4(b) แสดงอิทธิพลของปริมาณของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับไอออน Pb^{2+} โดยการเปลี่ยนปริมาณ MAC-AC ในช่วง 0.05-0.4 g ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Pb^{2+} เท่ากับ 50 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL (ที่ pH 7) และเขย่าที่อุณหภูมิ 30 ^{0}C เป็นเวลา 120 นาทีพบว่าปริมาณของไอออน Pb^{2+} ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การกำจัด Pb^{2+} โดย MAC-AC เพิ่มขึ้นเล็กน้อย สิ่งนี้สามารถนำมาประกอบการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับทั้งหมดและความพร้อมของตำแหน่งของการดูดซับมากขึ้นโดยการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ [27,28] การเพิ่มขึ้นของตัวดูดซับ MAC-AC ไม่ได้ส่งผลต่อการกำจัด Pb^{2+} มากนัก เนื่องจากปริมาณของตัวถูกซับ Pb^{2+} ที่อยู่ในสารละลายรอบ ๆ ตัวดูดซับมีจำกัด [28] สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้ตัวดูดซับ MAC-AC ปริมาณ 0.1 g ก็เพียงพอที่จะให้ในการกำจัด Pb^{2+} ได้อย่างเหมาะสม

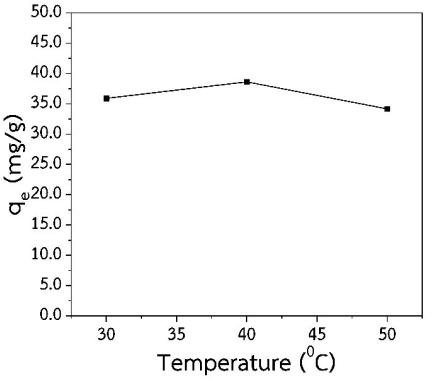
อุณหภูมิของการดูดซับสำหรับการดูดซับ Pb^{2+} บน MAC-AC ได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 30 ^{0}C 40 ^{0}C และ 50 ^{0}C ใช้ปริมาณ MAC-AC0.1 g ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น Pb^{2+} เท่ากับ 50 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL pH ของสารละลายเท่ากับ 7 และทำการเขย่าเป็นเวลา 120 นาที โดยพบว่าความสามารถในการดูดซับไอออน Pb^{2+} ของถ่านกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 30-40 ^{0}C จากนั้นค่าการดูดซับมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 50^{0}C ดังรูปที่ 4(c) ทั้งนี้เนื่องจากธรรมชาติของกระบวนดูดซับเป็นแบบคายความร้อนและพลังงานในการกระตุ้นการดูดซับมีค่าน้อย ดังนั้นการเกิดการดูดซับจึงเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง ๆ [29] ดังนั้นอุณหภูมิ 40 ^{0}C จึงถูกใช้เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้



(a)



(b)

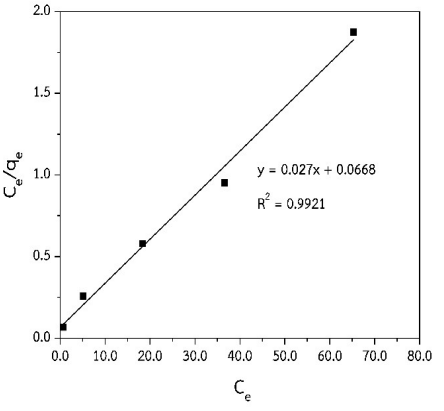


(c)

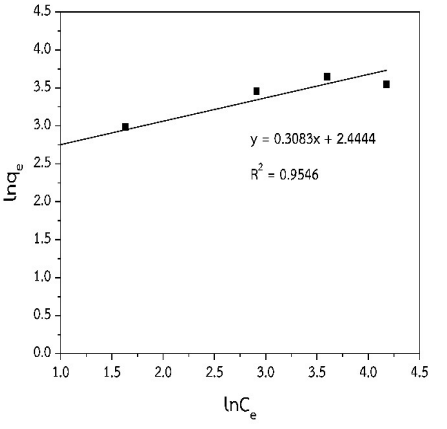
ภาพที่ 4 อิทธิพลของ (a) pH สารละลาย (b) ปริมาณของตัวดูดซับ และ (c) อุณหภูมิของการดูดซับ ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับของไอออน Pb^{2+} บนถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

5. การหารูปแบบของการดูดซับ (adsorption isotherm)

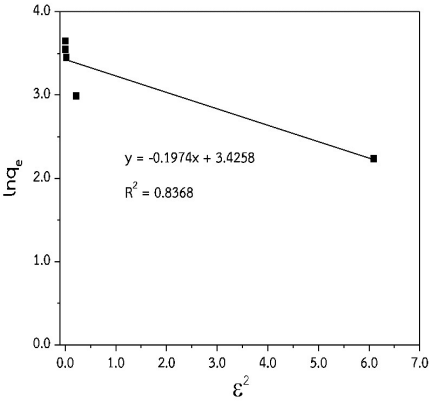
รูปแบบของการดูดซับให้ข้อมูลเกี่ยวกับความจุของตัวดูดซับและธรรมชาติของอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับ การหารูปแบบการดูดซับทำโดยใช้ไอโซเทอมของการดูดซับตามสมการของ Lagmuir, Freundlich และ Dubinin-Radushkevich เพื่อตรวจสอบลักษณะการดูดซับของไอออน Pb^{2+} บนพื้นผิวของ MAC-AC นอกจากนี้ค่าคงที่ไอโซเทอมที่คำนวณได้จากสมการยังสามารถนำไปใช้ในการหาความสามารถในการดูดซับสูงสุด อธิบายความสัมพันธ์และคุณสมบัติพื้นผิวของตัวดูดซับได้ โดยผลที่ได้จากการสร้างกราฟไอโซเทอมจากศึกษานี้แสดงได้ดังรูปที่ 5(a-c) โดยพบว่าเข้ากันได้ดีกับไอโซเทอมของ Langmuir และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการพล็อตกราฟและที่คำนวณได้แสดงได้ดังตารางที่ 2



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 5 กราฟไอโซเทอมตามสมการของ (a) Langmuir (b) Freundlich และ (c) Dubinin-Radushkevich ในการดูดซับไอออน Pb^{2+} บนถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

จากความสัมพันธ์ดังกราฟไอโซเทอมพบว่ากราฟ 5(a) มีค่า R^2 สูงสุด แสดงว่ากระบวนการดูดซับมีลักษณะของการดูดซับตามสมการของ Langmuir มากที่สุด [31] และทำให้ทราบว่าการดูดซับของ Pb^{2+} บนถ่านกัมมันต์นี้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีค่าปริมาณการดูดซับ $(q_m)Pb^{2+}$ สูงสุดเท่ากับ 37.03 mg g^{-1} ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ K_L มีค่าเท่ากับ 0.4042 L mg^{-1}

โดย Freundlich isotherm แสดงถึงความหลากหลายของตัวดูดซับและการเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นผิว โดยค่า K_F และค่า n คือค่าคงที่ของ Freundlich ซึ่งแสดงถึงปริมาณการดูดซับและความหนาแน่นของการดูดซับ ซึ่งหากค่า K_F มีค่ามากแสดงถึงปริมาณการดูดซับมีมาก ส่วนค่า n หากมีค่าสูงแสดงว่ามีแรงดึงดูดที่แข็งแรงระหว่างสารตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ [20]

สำหรับ Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherm ใช้แสดงถึงชนิดของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างไอออน Pb^{2+} กับตัวดูดซับว่าเป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) หรือการดูดซับทาง

เคมี (chemical adsorption) โดยค่า K_D เป็นค่าคงที่ของ D-R isotherm สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานอิสระของการดูดซับ (the mean free energy of adsorption, E) ได้ โดยค่า E หากมีค่าอยู่ในช่วง 20-40 kJ mol^{-1}แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมี และหากมีค่าพลังงานที่ต่ำกว่า 20 kJ mol^{-1} แสดงว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพหรือการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้น [20,31]

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของการดูดซับที่ได้จากกราฟและการคำนวณตามสมการของ Langmuir, Freundlich และ Dubinin-Radushkevich

Isotherm Model	Parameter	ค่าที่ได้ของตัวถูกดูดซับชนิดต่าง ๆ ไอออนตะกั่ว (Pb^{2+})
The Langmiur isotherm $\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m}$	R^2	0.9921
	Slope	0.0270
	intercept	0.0668
	q_m (mg/g)	37.0370
	K_L (L/mg)	0.4042
The Freundlich isotherm $\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e$	R^2	0.9546
	Slope	0.3083
	intercept	2.4444
	n	3.2436
	K_F (L/mg)	11.5236
The Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherm $\ln q_e = \ln q_m - K_D \varepsilon^2$ $\varepsilon = RT \ln\left(1+\frac{1}{C_e}\right), E = \frac{1}{\sqrt{2K_D}}$	R^2	0.8368
	Slope	-0.1974
	intercept	3.4258
	q_m (mg/g)	30.7472
	K_D (L/mg)	0.1974
	E (kJ/mol)	1.5915

6. การหาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ (Adsorption thermodynamics)

การหาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ โดยมีความสัมพันธ์กันดังนี้พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ เช่น พลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) เอนทาลปี (ΔH^0) และเอนโทรปี (ΔS^0) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการทำนายและระบุกระบวนการดูดซับ [19,26] โดย ΔH^0 และ ΔS^0 สามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการของ Van' t Hoff [30] ดังนี้

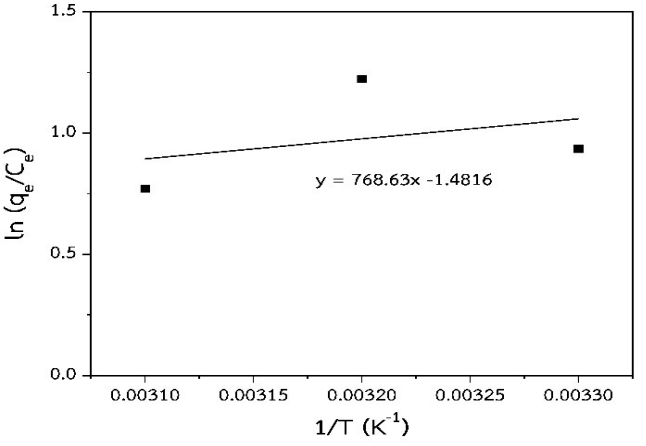
$$\ln K = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (3)$$

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

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

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับไอออน Pb^{2+} ในสารละลายช่วงอุณหภูมิ 30, 40 และ 50^0C พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด Pb^{2+} ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 50^0C แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อนพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 3ซึ่งค่าพลังงานอิสระของกิบส์ที่เป็นลบแสดงว่ากระบวนการดูดซับนี้เกิดขึ้นได้เองและพบว่าค่า ΔG^0มีค่าเป็นลบน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับนี้เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิที่ต่ำดังนั้นอุณหภูมิที่ 313K จึงเป็นอุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ Pb^{2+}บนตัวดูดซับ MAC-AC ได้มากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS^0) และเอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH^0)ของการดูดซับคำนวณได้จากความชันและจุดตัดของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln q_e/C_e$และ 1/T โดยใช้สมการของ the Van' t Hoff equation ดังรูปที่ 6 ซึ่งค่าที่เป็นลบของ ΔH^0แสดงถึงกระบวนการแบบคายความร้อนที่เกิดขึ้น และค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่า 20 kJ mol^{-1}แสดงว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ [20, 28] สำหรับค่า ΔS^0 ซึ่งเท่ากับ -0.0504 kJ $mol^{-1}K^{-1}$แสดงถึงการลดลงของระดับความเป็นอิสระหรือความไม่เป็นระเบียบ (disorder) ของ Pb^{2+}ที่ถูกดูดซับบนผิวของ MAC-AC ในสารละลาย [31,32]ดังนั้นอุณหภูมิการดูดซับที่แตกต่างกันมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับของ Pb^{2+}ไปยัง MAC-AC

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับไอออน Pb^{2+} ในสารละลายช่วงอุณหภูมิ 30, 40 และ 50^0C พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด Pb^{2+} ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 50^0C แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งค่าพลังงานอิสระของกิบส์ที่เป็นลบแสดงว่ากระบวนการดูดซับนี้เกิดขึ้นได้เองและพบว่าค่า ΔG^0 มีค่าเป็นลบน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับนี้เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิที่ต่ำดังนั้นอุณหภูมิที่ 313 K จึงเป็นอุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ Pb^{2+} บนตัวดูดซับ MAC-AC ได้มากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS^0) และเอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH^0) ของการดูดซับคำนวณได้จากความชันและจุดตัดของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln q_e/C_e$ และ 1/T โดยใช้สมการของ the Van' t Hoff equation ดังรูปที่ 6 ซึ่งค่าที่เป็นลบของ ΔH^0 แสดงถึงกระบวนการแบบคายความร้อนที่เกิดขึ้น และค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่า 20 kJ mol^{-1} แสดงว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ [20, 28] สำหรับค่า ΔS^0 ซึ่งเท่ากับ -0.0504 kJ $mol^{-1}K^{-1}$ แสดงถึงการลดลงของระดับความเป็นอิสระหรือความไม่เป็นระเบียบ (disorder) ของ Pb^{2+} ที่ถูกดูดซับบนผิวของ MAC-AC ในสารละลาย [31,32] ดังนั้นอุณหภูมิการดูดซับที่แตกต่างกันมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับของ Pb^{2+} ไปยัง MAC-AC



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

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับไอออน Pb^{2+} บนตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

ชนิดของตัวถูกดูดซับ	ΔH (kJ/mol.K)	ΔS (kJ/mol.K)	ΔG (kJ/mol.K)		
			T=303 K	T = 313 K	T = 323 K
ไอออนตะกั่ว (Pb^{2+})	-6.3904	-0.0123	-2.6580	-2.5348	-2.4117

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งเตรียมโดยการเผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 ^{0}C นาน 2 ชั่วโมง มีองค์ประกอบของคาร์บอนอยู่มากกว่าร้อยละ 80 สภาพพื้นผิวมีความพรุนสูง มีความเป็นกรด 1.6333 mmol/g AC มีความเป็นด่าง 0.4917 mmol/g AC และมีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 6 สามารถนำไปใช้กำจัดไอออน Pb^{2+} ในสารละลายสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg L^{-1} ปริมาตร 100 mL โดยใช้ปริมาณของตัวดูดซับ 0.1 ที่สารละลาย pH 7 และเขย่าติดต่อกันเป็นเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ 40 ^{0}C มีความสามารถในการดูดซับไอออน Pb^{2+} ได้สูงกว่าร้อยละ 81 จากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับพบว่าเข้ากันได้ดีกับไอโซเทอมของ Langmuir มีค่าปริมาณการดูดซับ Pb^{2+} สูงสุดเท่ากับ 37.03 mg g^{-1} จากเทอร์โมไดนามิกส์พารามิเตอร์ ($\Delta G < O$ และ $\Delta H^0 =$ -6.39 kJ mol^{-1}) บ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับเป็นไปตามธรรมชาติและคายความร้อน ดังนั้นจากผลการศึกษาถ่านกัมมันต์จากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่เตรียมได้เป็นสารตัวดูซับที่ดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการใช้เป็นสารกรองเพื่อกำจัดโลหะหนัก Pb^{2+} ต่อไปได้ โดยจากการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับไอออน Pb^{2+} มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 30-40 ^{0}C ดังนั้นการนำไปใช้ประโยชน์จริงจึงสามารถนำไปใช้ได้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องที่สูงกว่า 30 ^{0}C ได้

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณขอขอบคุณศูนย์วิจัยเกษตรพื้นที่สูง อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบตัวอย่าง และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

References

[1] Bailón-Salas, A. M., et al. (2018). Lead and copper removal from groundwater by spherical agglomeration using a biosurfactant extracted from Yucca decipiensTrel. *Chemosphere*, 207, 278-284.

[2] Mouni, L., et al. (2011). Adsorption of Pb (II) from aqueous solutionsusing activated carbon developed from Apricot stone. *Desalination*, 276(1-3), 148-153.

[3] World Health Organization Edition, F. (2011). Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle*, *38*(4), 104-8.

[4] Flora, G., et al. (2012). Toxicity of lead: a review with recent updates. *Interdisciplinary toxicology*, 5(2), 47.

[5] Tran, T. K., et al. (2017). Electrochemical treatment of heavy metal‐containing wastewater with the removal of COD and heavy metal ions. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 64(5), 493-502.

[6] Azarudeen, R. S., et al. (2015). Heavy and toxic metal ion removal by a novel polymeric ion‐exchanger: synthesis, characterization, kinetics and equilibrium studies. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 90(12), 2170-2179.

[7] Wang, L., et al. (2017). Silica aerogel-supported hydrozincite and carbonate-intercalated hydrotalcite for high-efficiency removal of Pb (II) ions by precipitation transformation reactions. *Nanoscale Research Letters*, 12, 1-10.

[8] Rahman, N., & Haseen, U. (2014). Equilibrium modeling, kinetic, and thermodynamic studies on adsorption of Pb (II) by a hybrid inorganic–organic material: polyacrylamide zirconium (IV) iodate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(19), 8198-8207.

[9] Amer, H., et al. (2017). Removal of lead (II) from aqueous solutions using rice straw. *Water Science and Technology*, 76(5), 1011-1021.

[10] Ullah, M., et al. (2019). The effective removal of heavy metals from water by activated carbon adsorbents of Albizia lebbeck and Melia azedarach seed shells. *Soil and Water Research*, 15(1), 30-37.

[11] Bhatnagar, A., et al. (2013). An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal*, 219, 499-511.

[12] Wong, S., et al. (2018). Recent advances in applications of activated carbon from biowaste for wastewater treatment: a short review. *Journal of Cleaner Production*, 175,

361-375.

[13] Azmi, S. N. H., et al. (2020). Adsorptive removal of Pb (II) ions from groundwater samples in Oman using carbonized Phoenix dactylifera seed (Date stone). *Journal of King Saud University-Science*, 32(7), 2931-2938.

[14] Bilal, M., et al. (2020). Removal of Pb (II) from wastewater using activated carbon prepared from the seeds of Reptoniabuxifolia. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 85(2), 265-277.

[15] Du, C., et al. (2017). Microwave-assisted one-step preparation of macadamia nut shell-based activated carbon for efficient adsorption of Reactive Blue. *New Journal of Chemistry*, 41(24), 15373-15383.

[16] Wilson, K., et al. (2006). Select metal adsorption by activated carbon made from peanut shells. *Bioresource technology*, 97(18), 2266-2270.

[17] Krishnani, K. K., et al. (2008). Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk. *Journal of hazardous materials*, 153(3), 1222-1234.

[18] Imamoglu, M., &Tekir, O. (2008). Removal of copper (II) and lead (II) ions from aqueous solutions by adsorption on activated carbon from a new precursor hazelnut husks. *Desalination*, 228(1-3), 108-113.

[19] Sugumaran, P., et al. (2012). Production and characterization of activated carbon from banana empty fruit bunch and Delonix regia fruit pod. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 3(3), 125-132.

[20] Lemraski, E. G., & Sharafinia, S. (2016). Kinetics, equilibrium and thermodynamics studies of Pb2+ adsorption onto new activated carbon prepared from Persian mesquite grain. *Journal of Molecular Liquids*, 219, 482-492.

[21] Moonsri, P., et al. (2017). Production of Activated Carbon from Moldy Damaged Tamarind-Pod. *Applied Mechanics and Materials*, 855, 137-142.

[22] Menya, E., et al. (2018). Production and performance of activated carbon from rice husks for removal of natural organic matter from water: a review. *Chemical Engineering Research and Design*, 129, 271-296.

[23] Medhat, A., et al. (2021). Efficiently activated carbons from corn cob for methylene blue adsorption. *Applied Surface Science Advances*, 3, 100037.

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

[25] Chimanlal, I., et al. (2022). Chemical modification of Macadamia-derived activated carbon for remediation of selected heavy metals from wastewater. *Minerals Engineering*, 184, 107663.

[26] Huang, Y., et al. (2014). Adsorption of Pb (II) on mesoporous activated carbons fabricated from water hyacinth using H_3PO_4 activation: adsorption capacity,

kinetic and isotherm studies. *Applied Surface Science*, 293, 160-168.

[27] Ghasemi, M., et al. (2015). Microwave-assisted functionalization of *Rosa Canina-L* fruits activated carbon with tetraethylenepentamine and its adsorption behavior toward Ni (II) in aqueous solution: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Powder technology*, 274, 362-371.

[28] Jribi, S., et al. (2017). Equilibrium and kinetics of CO_2 adsorption onto activated carbon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 1941-1946.

[29] Bangash, F. K., et al. (2001). Effect of temperature on the adsorption behavior of copper onto carbonaceous substrate. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 23(4), 215-220.

[30] Atkins, P. W., & De Paula, J. (2014). *Physical Chemistry*. New York: Oxford university press.

[31] Chaudhry, S. A., et al. (2016). Fe (III)–Sn (IV) mixed binary oxide-coated sand preparation and its use for the removal of As (III) and As (V) from water: application of isotherm, kinetic and thermodynamics. *Journal of Molecular Liquids*, 224, 431-441.

[32] Largitte, L., et al. (2016). Comparison of the adsorption of lead by activated carbons from three lignocellulosic precursors. *Microporous and Mesoporous Materials*, 219, 265-275.

[32] Largitte, L., et al. (2016). Comparison of the adsorption of lead by activated carbons from three lignocellulosic precursors. *Microporous and Mesoporous Materials*, 219, 265-275.