จลนศาสตร์การดูดซับสารหนูของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไย

นำพร ปัญโญใหญ่[1] ธนศิษฏ์ วงศ์ศิริอำนวย[1] จิระพล กลิ่นบุญ[2] และ ทิพาพร คำแดง[1]*

[1]คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

[1]63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[2]2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

รับบทความ 18 มิถุนายน 2567 แก้ไขบทความ 5 เมษายน 2568 ตอบรับบทความ 6 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไยด้วยกระบวนไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบการดูดซับ นำถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยไปอบในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบการดูดซับโดยใช้สารละลายสารหนู 50 มิลลิลิตร ผสมกับถ่านชีวภาพ 10 กรัม และเขย่าสารละลายกับถ่านชีวภาพเป็นเวลา 0.5 1 2 4 6 12 และ 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที จากผลการทดสอบพบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 องศาเซลเซียส เวลาเขย่าที่ 24 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสารหนูสูงสุดที่ 34.57 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส เวลาเขย่าที่ 24 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสารหนูสูงสุดที่ 30.77 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส เวลาเขย่าที่ 12 ชั่วโมงมีค่าการดูดซับสารหนูสูงสุดที่ 98.71 เปอร์เซ็นต์ จลนศาสตร์การดูดซับสารหนูของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไย ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) และมีปริมาณการดูดซับของสารหนู ณ สมดุล เท่ากับ 98.04 78.12 และ 238.10 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

คำสำคัญ : การดูดซับ; ถ่านชีวภาพ; โลหะหนัก; สารหนู

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 5039 0883, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: tipapon@mju.ac.th*

Arsenic Adsorption Kinetics of Biochar Derived from Longan Peel

Numpon Panyoyai[1] Thanasit Wongsiriamnuay[1] Jirapol Klinbun[2] and Tipapon Khamdaeng[1]*

[1]Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

[2]Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

[1]63 Moo 4, Nong Han, San Sai, Chiang Mai, 50290

[2]2 Nang Linchi Road, Thung Maha Mek, Sathon, Bangkok 10120

Received 18 June 2024; Revised 5 April 2025; Accepted 6 June 2025

Abstract

This research aims to study the arsenic adsorption ability and kinetics of biochar made from longan peel. The biochar made from longan peel was pyrolysed at 300 500 700 ℃ for 4 h and then was dehydrated in a hot air oven at 105 ℃ for 24 h and was put in a desiccant jar for 24 h. For the adsorption experiment, 50 ml arsenic solution was mixed with 10 g of biochar and was shaken for 0.5 1 2 4 6 12 and 24 h using speed of 200 rpm. The experimental results showed that the biochar made from longan peel at pyrolysis temperature of 300 ℃ and 500 ℃ at 24 h had the maximum adsorption value of 34.57% and 30.77%, respectively, and at pyrolysis temperature of 700 ℃ at 12 h had the maximum adsorption value of 98.71%. Furthermore, at pyrolysis temperature of 300 500 700 ℃, the arsenic adsorption kinetics of biochar made from longal peel were consistent with the Pseudo-second order equation and the arsenic adsorption quantities at the equilibrium point were found to be equal to 98.04, 78.12 and 238.10 mg/g, respectively.

Keywords : Adsorption; Biochar; Heavy metal; Arsenic

** Corresponding Author. Tel.: +668 5039 0883, E-mail Address: tipapon@mju.ac.th*

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีพื้นที่การเกษตรเป็นอันดับที่ 2 ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยมีพื้นที่การเกษตร 47 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งประเทศ ปัญหาดินเสื่อมในระดับรุนแรงมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรมีปริมาณและคุณภาพอยู่ในระดับต่ำ เป็นผลจากการใช้ปุ๋ยและสารเคมีในการเกษตร นอกจากนี้ การปล่อยน้ำทิ้งปนเปื้อนสารเคมีของโรงงานอุตสาหกรรมทำให้เกิดมลพิษทางน้ำและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปนเปื้อนสารหนูซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีอัตราการสลายตัวช้าและอาจเข้าสู่แหล่งน้ำได้ผ่านทางการปล่อยน้ำเสียหรือการชะล้างจากพื้นที่ที่มีการสะสมของสารหนูในดิน ทำให้สัตว์น้ำดูดซึมเข้าไปและดินบริเวณรอบข้างแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนก็มีโอกาสปนเปื้อนด้วยเช่นกัน ก่อให้เกิดการสะสมสารพิษและตกค้างในดิน [1] ทำให้ดินกลายเป็นแหล่งสะสมสารเคมีและโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ เกิดการเสื่อมสภาพของดินและสูญเสียแร่ธาตุหรือสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เมื่อปลูกข้าว ธัญพืช และผักจะทำให้มีการดูดซับสารพิษเข้าไปสะสมอยู่ในลำต้น [2]

โลหะหนักเป็นสารเคมีอันตรายที่มีอัตราการสลายตัวช้า ทำให้สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นานและสารหนูก็เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มักพบปะปนอยู่ในสายแร่ต่าง ๆ หลายชนิด จากการสำรวจหินโดยกรมทรัพยากรธรณี พบว่าพื้นที่ราว 20-30% ของประเทศไทยมีสารหนูปะปนอยู่ตามธรรมชาติ อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร เกิดการสะสมในร่างกาย ตามมาตรฐานการปนเปื้อนสารหนูในน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดให้มีปริมาณสารหนูไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร หากระดับสารหนูในน้ำสูงกว่ามาตรฐานนี้ อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพหากได้รับสารหนูเข้าสู่ร่างกายเกินกว่ามาตรฐานติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน โดยเฉพาะเมื่อมีการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อนหรือการบริโภคสัตว์และพืชที่ได้รับสารหนู

จากปัญหาดังกล่าว ประเทศไทยมีการทำการเกษตรและมีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเป็นจำนวนมาก จึงมีการนำวัสดุเหล่านั้นมาแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งมีธาตุคาร์บอนอยู่จำนวนมาก ผลิตจากชีวมวล (Biomass) เช่น เศษใบไม้ เปลือกลำไย และชีวมวลอื่น ๆ เป็นต้น โดยนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) [3] ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 300-700 องศาเซลเซียส คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจะต่างกันไปตามวัสดุที่ใช้ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส [4]-[6] ซึ่งถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติในการปรับปรุงคุณภาพของดินที่เสื่อมสภาพให้ดีขึ้น และสามารถดูดซับสารพิษ รวมถึงโลหะหนักในดินด้วย [7]-[10] จึงมีการนำถ่านชีวภาพมาช่วยแก้ไขปัญหาดินปนเปื้อน และลดปริมาณโลหะหนักที่จะไปสะสมในพืชและสัตว์ โดยถ่านชีวภาพจะทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน ทำให้สามารถลดปริมาณโลหะหนักที่พืชจะดูดซับเข้าไปในลำต้น ช่วยในการลดความเสี่ยงจากการบริโภคพืชผักที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้ในระยะยาว อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงคุณภาพดิน แต่ยังขาดการศึกษาเฉพาะเจาะจงเกี่ยวกับการใช้เปลือกลำไยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรในประเทศไทย โดยเปลือกลำไยเป็นแหล่งที่มีคุณภาพในการผลิตถ่านชีวภาพและมีศักยภาพในการดูดซับโลหะหนัก โดยเฉพาะสารหนูที่เป็นปัญหาสำคัญในประเทศ การเลือกใช้เปลือกลำไยเป็นวัตถุดิบในงานวิจัยนี้มีแรงผลักดันจากความเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีอยู่มากในพื้นที่จังหวัดลำพูนและเชียงใหม่ ซึ่งการใช้วัสดุดังกล่าวสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการเผาทิ้ง และช่วยในการบริหารจัดการทรัพยากรเกษตรของประเทศไทย

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรในการดูดซับสารหนู โดยการนำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไย [10] ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส มาทดสอบ เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับสารหนูของถ่านชีวภาพ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงความสามารถของถ่านชีวภาพในการลดการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและเสริมสร้างองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรให้เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุ อุปกรณ์ และรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลองของงานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 การผลิตถ่านชีวภาพ

เตาเผาถ่านชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเตาขนาดบรรจุ 50 ลิตร [11] (รูปที่ 1)

รูปที่ 1 เตาเผาถ่านชีวภาพ ขนาด 50 ลิตร

มีความสูง 500 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 380 มิลลิเมตร แกนกลางทำจากเหล็กกล้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร สูง 610 มิลลิเมตร และมีความหนา 2.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ติดตั้งฮีตเตอร์ให้ความร้อนรอบผิวนอกของเตา และภายในเตา ขนาด 15 กิโลวัตต์ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์แบบแท่งเหล็ก เพื่อแสดงผลอุณหภูมิภายในเตาและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์ โดยสามารถปรับระยะเวลาในการไพโรไลซิสและปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์รอบผิวนอกเตาและแบบแท่งเหล็กที่ติดตั้งอยู่ภายในเตาได้

วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำไปทดสอบจลนศาสตร์การดูดซับสารหนูในงานวิจัยนี้คือ เปลือกลำไย โดยมีวิธีการเตรียมและผลิตถ่านชีวภาพดังนี้คือ นำเปลือกลำไยไปลดความชื้นในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จนมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 10% หลังจากนั้น นำออกมาเทใส่เตาเผาถ่านชีวภาพแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยไฟฟ้า ตั้งค่าอุณหภูมิในการไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และใช้เวลาการไพโรไลซิส 4 ชั่วโมง ทดลอง 3 ซ้ำ ปริมาณถ่านชีวภาพที่ได้แสดงดังตารางที่ 1 หลังจากนั้น ทำการบดถ่านชีวภาพให้ละเอียด แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 24 ชั่วโมง เมื่ออบเสร็จแล้วนำไปใส่โถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำออกมาใช้ในการทดลองในขั้นตอนถัดไป

ตารางที่ 1 ปริมาณถ่านชีวภาพที่ได้จากเปลือกลำไย

อุณหภูมิ (°C)	300	500	700
น้ำหนักเฉลี่ยก่อนไพโรไลซิส (kg)	6±0.01	6±0.01	6±0.11
น้ำหนักเฉลี่ยหลังไพโรไลซิส (kg)	2.4±0.2	2.1±0.12	2.0±0.3
ร้อยละน้ำหนักของถ่านชีวภาพ	40±2.51	35±1.61	33.3±2.1

ตารางที่ 1 พบว่าปริมาณถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยที่ผลิตได้ มีปริมาณ 33-40% และมีคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติถ่านชีวภาพที่ได้จากเปลือกลำไย

อุณหภูมิ (°C)	300	500	700
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	7.69±0.04	9.15±0.03	12.37±0.16
ค่าการนำไฟฟ้า (EC) (μS)	924.3±1.1	1409.7±0.6	2140±10
ค่าการดูดซับน้ำ (g/g)	106±18.4	224±3.5	222.4±5.0

จากตารางที่ 2 พบว่าคุณสมบัติที่สำคัญของถ่านชีวภาพจากเปลือกลำไยที่ผลิตได้คือ มีค่า pH สูงขึ้นตามอุณหภูมิในการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เพิ่มการดูดซับสารหนู โดยการเกิดพันธะไอโอนิกระหว่างประจุบวกและลบ

2.2 การทดสอบการดูดซับ

โลหะหนักที่นำมาใช้ในการทดสอบการดูดซับในงานวิจัยนี้คือ สารหนู ที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาเจือจางกับ HNO_3 2 เปอร์เซ็นต์ ให้เหลือความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนนำไปทดสอบการดูดซับ

2.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ

จำลองสัดส่วนการใช้จริงในพื้นที่การเกษตรที่มีการปรับปรุงดิน โดยใช้สารละลายสารหนูความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ผสมกับถ่านชีวภาพปริมาณ 10 กรัม นำไปใส่เครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ใช้เวลา 0.5 1 2 4 6 12 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรองที่มีรูขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุหลังการดูดซับโดยใช้เครื่อง XRF รุ่น Olympus Vanta VCA (รูปที่ 2) จากนั้นคำนวณหาปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับ ตามลำดับ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ในแต่ละช่วงเวลา (0.5, 1, 2, 4, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง) บันทึกเป็นค่าเฉลี่ย

รูปที่ 2 เครื่อง XRF รุ่น Olympus Vanta VCA

2.2.2 การหาปริมาณการดูดซับ

ปริมาณการดูดซับสารหนูที่เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [12]

$$q_t = \frac{(C_t - C_0) \times V}{M} \quad (1)$$

โดยที่

q_t = ปริมาณการดูดซับของโลหะหนัก ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

V = ปริมาตรของสารละลายสารหนู (ลิตร)

M = น้ำหนักของถ่านชีวภาพ (กรัม)

C_0 = ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายสารหนู ณ เวลาเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t = ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายสารหนู ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.2.3 การหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารหนูที่เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\%\text{removal} = \frac{(C_0 - C_t) \times 100}{C_0} \quad (2)$$

2.3 สมการจลนศาสตร์การดูดซับ

จลนศาสตร์การดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มี 2 สมการคือ สมการอัตราการดูดซับ

อันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) และสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) [12]

2.3.1 สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order)

สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งอธิบายว่า แรงในกระบวนการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic Interaction) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$q_t = q_e\left(1-e^{-k_1 t}\right) \quad (3)$$

$$\log\left(q_e - q_t\right) = \log q_e + \left(\frac{-k_1 t}{2.303}\right) \quad (4)$$

โดยที่

q_e = ปริมาณการดูดซับของโลหะหนัก ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 = ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)

t = เวลา (นาที)

2.3.2 สมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order)

สมการอัตราการดูดซับอันดับสองอธิบายว่า แรงในกระบวนการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีการแลกเปลี่ยนหรือแบ่งปันประจุอิเล็กตรอน การดูดซับจะขึ้นอยู่กับจำนวนตำแหน่งที่ไว้ต่อปฏิกิริยา ซึ่งมีสมการดังนี้

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (5)$$

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

โดยที่

k_2 = ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที)

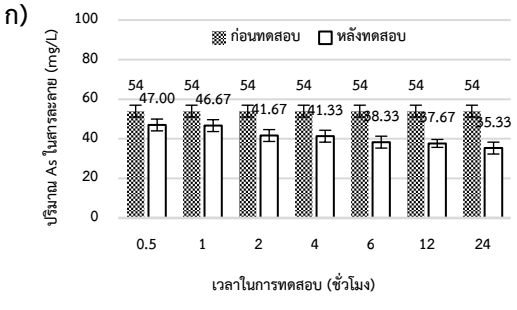
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

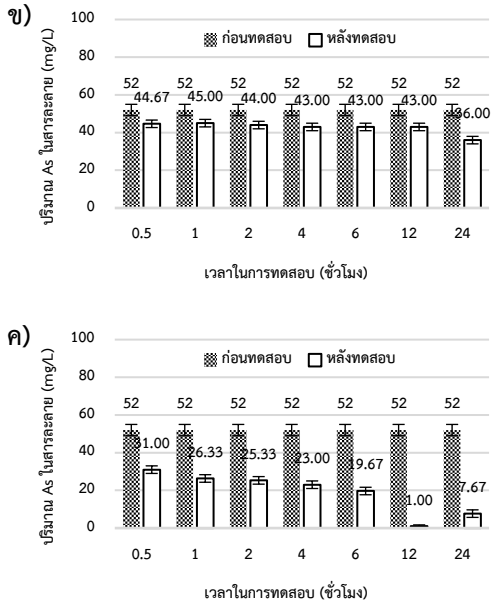
งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับโลหะหนักของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยใช้วัสดุในการผลิตถ่านชีวภาพคือ เปลือกลำไย จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส โดยมีการนำถ่านชีวภาพมาทดสอบดูดซับในสารละลายสารหนูเพื่อคำนวณหาปริมาณการดูดซับ เปอร์เซ็นต์การดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับ

3.1 ปริมาณการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

รูปที่ 3 (ก) (ข) และ (ค) แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณสารหนูในสารละลายก่อนและหลังการดูดซับโดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไยที่อุณหภูมิ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน

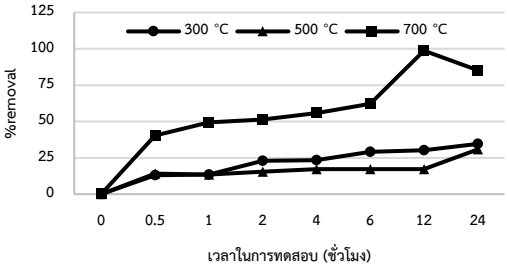
จากการทดสอบพบว่า เวลาและอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการดูดซับสารหนูคือที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส ที่เวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณสารหนูเหลืออยู่ในสารละลาย 1.00±0.67 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมด 52±3 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากมีโครงสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้น และพื้นที่ผิวที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารหนู ค่า pH ที่สูงขึ้น ทำให้สารหนูเปลี่ยนเป็น $H_2AsO_3^-$ ซึ่งเป็นประจุลบ และสามารถเกิดพันธะไอออนิกกับถ่านชีวภาพที่มีประจุบวกได้ดี ส่งผลให้การดูดซับเพิ่มขึ้น [13]





รูปที่ 3 ปริมาณสารหนูในสารละลายก่อนและหลังทดสอบการดูดซับที่อุณหภูมิไพโรไลซิส (ก) 300 (ข) 500 และ (ค) 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารหนู (%removal) ที่เวลาแตกต่างกัน โดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส



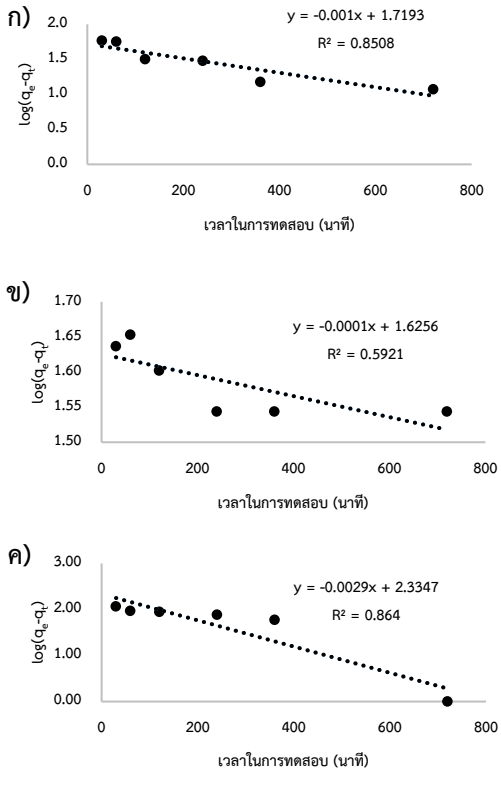
รูปที่ 4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารหนู (%removal) ที่อุณหภูมิ 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบพบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทดสอบ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทดสอบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 300 และ 500 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 700 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลา 0.5 1 2 4 6 12 และ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 40.38 49.36 51.28 55.76 62.17 98.71 และ 85.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [14] จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากฟางข้าวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส ใช้ดูดซับสารละลายโลหะหนักทองแดง ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับโลหะหนักได้มากที่สุดที่ 98.7 เปอร์เซ็นต์ โดยถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีค่า pH เท่ากับ 12.37 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนนี้ [4] ส่งผลทำให้สารหนูแตกตัวเป็นประจุลบและจับกับพื้นผิวที่เป็นประจุบวกได้มากกว่า และมีโครงสร้างอะโรมาติกที่พัฒนาขึ้นดีกว่า กล่าวคือ มีโครงสร้างพื้นที่ผิวที่มากกว่าและจำนวนรูพรุนที่มากขึ้น [15] ทำให้เกิดการดูดซับได้ดีกว่า

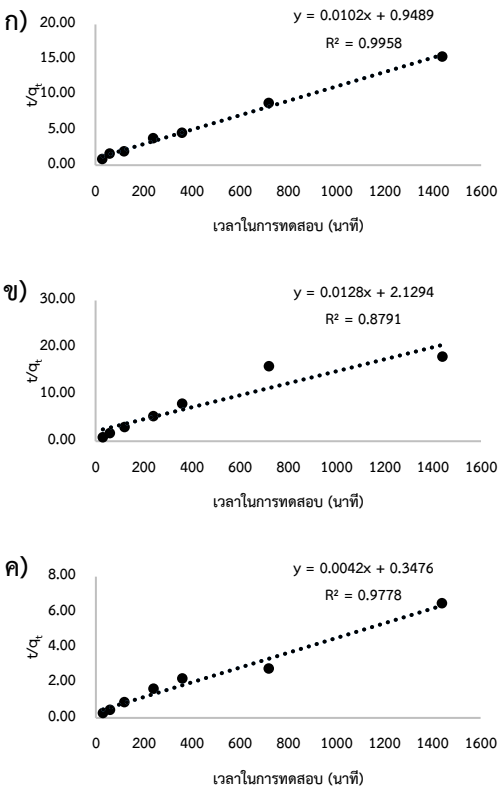
3.2 จลนศาสตร์การดูดซับ

รูปที่ 5 (ก) (ข) และ (ค) แสดงจลนศาสตร์การดูดซับจากสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e-q_t)$ และเวลา t สามารถหาค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง k_1 จากความชันกราฟเท่ากับ $k_1/2.303$ และสามารถคำนวณปริมาณการดูดซับของโลหะหนัก ณ สมดุล q_e จากจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$ ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 5 จลนศาสตร์การดูดซับจากสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส (ก) 300 (ข) 500 และ (ค) 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6 จลนศาสตร์การดูดซับจากสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส (ก) 300 (ข) 500 และ (ค) 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 6 (ก) (ข) และ (ค) แสดงจลนศาสตร์การดูดซับจากสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) ของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t และเวลา t สามารถคำนวณปริมาณการดูดซับของโลหะหนัก ณ สมดุล q_e จากความชันกราฟเท่ากับ $1/q_e$ และสามารถหาค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสอง k_2 จากจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2q_e^2$ ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งและอันดับสองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

Model	Temp (°C)	k_1 (/min)	q_e (mg/g)	R^2
Pseudo-first Order	300	0.0023	52.40	0.851
	500	0.00023	42.23	0.592
	700	0.00668	216.12	0.864
		k_2 (g/mg/min)	q_e (mg/g)	R^2
Pseudo-second Order	300	0.00011	98.04	0.996
	500	0.00008	78.12	0.879
	700	0.00005	238.10	0.978

จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในตารางที่ 3 พบว่าค่า R^2 ที่ได้จากสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ในทุกอุณหภูมิการทดสอบ ดังนั้นถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไยมีลักษณะการดูดซับแบบอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) ซึ่งมีค่าการดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งสมดุล [16],]17] และเป็นประเภทการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) อธิบายได้ว่าเป็นกระบวนการดูดซับที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของถ่านชีวภาพกับสารหนู ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นคือ พันธะเคมีโดยจะมีการแชร์อิเล็กตรอนร่วมมาใช้ร่วมกันของคู่โมเลกุล (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำให้การดูดซับทางเคมีไม่สามารถผันกลับได้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้น และสารหนูจะจับที่พื้นผิวของถ่านชีวภาพแบบชั้นเดียว (Monolayer) การเกิดพันธะเคมีจะทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและที่อุณหภูมิสูงพันธะเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ดี [13]

4. สรุป

การดูดซับสารหนูด้วยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไย ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส มีค่าแปรผันตรงกับเวลา และพบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส เหมาะสมที่สุดในการนำมาดูดซับสารหนู โดยสามารถดูดซับสารหนูได้มากที่สุดเท่ากับ 98.7 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 12 ชั่วโมง

จลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนูด้วยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไย ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300 500 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นไปตามสมการอัตราการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order) อธิบายได้ว่าระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายมีการแลกเปลี่ยนหรือแบ่งปันประจุอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นประเภทการดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับสารหนูด้วยถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกลำไยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการดูดซับสารปนเปื้อน เช่น สารหนู ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการเผาทิ้งวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหล่านี้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (RDG6250016) และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกและสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] F. A. Jan, M. Ishaq, I. Ihsanullah, and S. M. Asim, "Multivariate statistical analysis of heavy metals pollution in industrial area and its comparison with relatively less polluted area: a case study from the City of Peshawar and district Dir Lower," *Journal of Hazardous Materiasl,* vol. 176, no. 1-3, pp. 609-16, Apr. 2010.

[2] R. Xiao, S. Wang, R. Li, J. J. Wang, and Z. Zhang, "Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China," *Ecotoxicology and Environmental Safety,* vol. 141, pp. 17-24, Jul. 2017.

[3] M. I. Al-Wabel, A. Al-Omran, A. H. El-Naggar, M. Nadeem, and A. R. Usman, "Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus

wastes," *Bioresource technology,* vol. 131, pp. 374-379, Jan. 2013.

[4] W. Somparn, N. Panyoyai, T. Khamdaeng, N. Tippayawong, S. Tantikul, and T. Wongsiriamnuay, "Effect of process conditions on properties of biochar from agricultural residues," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* vol. 463, no. 1, pp. 012005, 2020.

[5] M. Srisophon, T. Khamdaeng, N. Panyoyai, and T. Wongsiriamnuay, "Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* vol. 463, no. 1, pp. 012079, 2020.

[6] J. Zhang, J. Liu, and R. Liu, "Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate," *Bioresource Technology,* vol. 176, pp. 288-291, Jan. 2015.

[7] Y. Liu, Y. Wang, H. Lu, L. Lonappan, S. K. Brar, L. He, J. Chen, and S. Yang., "Biochar application as a soil amendment for decreasing cadmium availability in soil and accumulation in Brassica chinensis," *Journal of Soils and Sediments,* vol. 18, no. 7, pp. 2511-2519, Feb. 2018.

[8] M. Wu, B. Pan, D. Zhang, D. Xiao, H. Li, C. Wang, and P. Ning, "The sorption of organic contaminants on biochars derived from sediments with high organic carbon content," *Chemosphere,* vol. 90, no. 2, pp. 782-788, Jan. 2013.

[9] D. Zhou, D. Liu, F. Gao, M. Li, and X. Luo, "Effects of Biochar-Derived Sewage Sludge on Heavy Metal Adsorption and Immobilization in Soils," *International Journal of Environmental Research and Public Health,* vol. 14, no. 7, pp. 681, Jun. 2017.

[10] T. Rinkam, T. Wongsiriamnuay, N. Panyoyai, N. Tippayawong, T. Khamdaeng, "Heavy metal adsorption by biochar made from longan seeds and peels," *AIP Conference Proceedings,* vol. 2681, no. 1, pp. 020052, Nov. 2022.

[11] C. Sittioad, S. Tantikul, T. Wongsiriamnuay, T. Khamdaeng, N. Tippayawong, and N. Panyoyai, "Temperature distribution and properties of biochar from a two-heating-stage kiln," *AIP Conference Proceedings,* vol. 2681, no. 1, pp. 020046, Nov. 2022.

[12] H. Jin, S. Capareda, Z. Chang, J. Gao, Y. Xu, and J. Zhang, "Biochar pyrolytically produced from municipal solid wastes for aqueous As (V) removal: adsorption property and its improvement with KOH activation," *Bioresource technology,* vol. 169, pp. 622-629, Oct. 2014.

[13] S. Q. Hashimi, S.-H. Hong, C.-G. Lee and S.-J. Park, "Adsorption of Arsenic from Water Using Aluminum-Modified Food Waste Biochar: Optimization Using Response Surface Methodology," *Water,* vol. 14, no. 17, pp. 2712, Aug. 2022.

[14] Y. Mei, B. Li, and S. Fan, "Biochar from Rice Straw for Cu2+ Removal from Aqueous

Solutions: Mechanism and Contribution Made by Acid-Soluble Minerals," *Water, Air, & Soil Pollution,* vol. 231, no. 420, Jul. 2020.

[15] A. Shaaban, S.-M. Se, N. M. M. Mitan, and M. F. Dimin, "Characterization of Biochar Derived from Rubber Wood Sawdust through Slow Pyrolysis on Surface Porosities and Functional Groups," *Procedia Engineering,* vol. 68, pp. 365-371, 2013.

[16] Q. Li, W. Liang, F. Liu, G. Wang, J. Wan, W. Zhang, C. Peng, and J. Yang., "Simultaneous immobilization of arsenic, lead and cadmium by magnesium-aluminum modified biochar in mining soil," *Journal of Environmental Management,* vol. 310, no. 15, pp. 114792, May. 2022.

[17] J.-H. Park, J.-H. Lee, S.-L. Lee, S.-W. Hwang, and D.-C. Seo, "Adsorption behavior of arsenic onto lignin-based biochar decorated with zinc," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,* vol. 626, pp. 127095, 2021.