

เพคตินไฮโดรเจลจากผักตบชวาสำหรับการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม
PECTIN HYDROGEL FROM WATER HYACINTH (*EICHHORNIA CRASSIPES*)
FOR LEAD AND CADMIUM ADSORPTION

เอราวัณ เบ้าทอง* และ พิสิษฐ์ เจริญสุดใจ
Erawan Baothong* and Pisit Chareonsudjai

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
Environmental Science, Faculty of Science, Khon Kaen University

Received: 23 August 2021

Accepted: 28 November 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมโดยใช้เพคตินไฮโดรเจลที่สกัดจากผักตบชวาที่มีร้อยละหมู่เอสเทอร์เท่ากับ 94.13 ในสารละลายที่มี pH 1.00 – 6.00 ศึกษาเวลาในการดูดซับ 0 – 1,440 นาที ที่อุณหภูมิ 25 °C ความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเท่ากับ 100 mg/L ใช้สมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการอธิบายสมดุลการดูดซับ ผลการวิจัย พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของเพคตินไฮโดรเจลจะมีประสิทธิภาพ สูงสุดที่ pH เท่ากับ 4.00 มีค่าความสามารถในการดูดซับ (qe) ตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ 66.98 mg/g และ 58.96 mg/g ตามลำดับ ปัจจัยด้านเวลา พบว่าเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการปลดปล่อยตะกั่วและแคดเมียมจากเพคตินไฮโดรเจลคือ 60 นาทีที่มีค่าความสามารถในการปลดปล่อยตะกั่วและแคดเมียมมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 67.80 และ 70.44 ตามลำดับ ในด้านของไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของเพคตินไฮโดรเจลสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดลิช โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอร์มสมการแลงเมียร์ของตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ 0.97 และ 0.99 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ตะกั่ว, แคดเมียม, เพคตินไฮโดรเจล, ผักตบชวา

* ผู้ประสานงาน: นายเอราวัณ เบ้าทอง
อีเมล: zempujin@gmail.com

Abstract

The objective of this research was to investigate the lead and cadmium adsorption by using pectin hydrogel extracted from water hyacinth with ester group percentage of 94.13 in solution with pH ranging from 1.0 – 6.0, including adsorption time ranging from 0 – 1,440 minutes at 25 °C. and the initial concentration of lead and cadmium in water was at 100 mg/L. The Langmuir and Freundlich sorption models were used to describe the adsorption isotherms and sorption constant. The research found that lead and cadmium adsorption capacity of pectin hydrogels was the most effective at the pH of 4.0. The equilibrium concentration (QE) of lead and cadmium was at 66.98 mg/g and 58.96 mg/g, respectively. According to the Time Factor, It was found that the optimum time for lead and cadmium release from pectin hydrogels was 60 minutes, and the lead and cadmium liberation values were 67.80% and 70.44 percent, respectively. In terms of isotherms, the lead and cadmium adsorption of pectin hydrogels were more consistent with the Langmuir equation than the Fridrich equation. The correlation coefficient (R²) of the isotherm, Langmuir equation of lead and cadmium was at 0.97 and 0.99, respectively.

Keywords: Lead, Cadmium, Pectin hydrogel, Water hyacinth

บทนำ

ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*.) เป็นพืชในตระกูล PONTEDERIACEAE ผักตบชวา เป็นพืชน้ำที่สามารถมีชีวิตอยู่ในน้ำได้ตลอดทั้งปี แพร่พันธุ์ในแหล่งน้ำอย่างรวดเร็ว (Carlini et al., 2018) ส่งผลทำให้ปิดกั้นทางน้ำไหล ลดการละลายของออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้บางส่วนของผักตบชวาสามารถจมลงในน้ำและเน่าเปื่อยกลายเป็นขยะอินทรีย์ ก่อให้เกิดเป็นปัญหาหามลพิษในน้ำได้อีกด้วย ปัจจุบันวิธีการจัดการผักตบชวาที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือการทำปุ๋ยหมักและงานหัตถกรรม (Weiping et al., 2018) แต่ในพื้นที่ส่วนใหญ่ มักใช้วิธีตัดขึ้นและทิ้งไว้ที่ริมตลิ่ง ซึ่งยังไม่มีประสิทธิภาพ รูปเพียงพองและสิ้นเปลืองงบประมาณ

เนื่องจากผักตบชวามีมากและเพิ่มขึ้นรวดเร็วและยังไม่มีวิธีการในการสร้างสินค้ามูลค่าสูงเพื่อสร้างความน่าสนใจในลงทุนทางธุรกิจ ดังนั้นการหาวิธีการกำจัดผักตบชวาและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อสร้างแรงจูงใจให้มีความต้องการนำผักตบชวาไปใช้เป็นวัตถุดิบซึ่งจะเป็นการกำจัดโดยทางอ้อม

เพคตินเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มีโมเลกุลที่มีน้ำหนักสูงเกิดตามธรรมชาติ (Levigne et al., 2002; เอรารวิน เบ้าทอง, 2561) มีการศึกษาพบสารเพคตินในผักตบชวา (Naohara & Ishii, 1989) ซึ่งเพคตินสามารถใช้ได้กับหลายอุตสาหกรรม อาทิ อาหารและยา (Shukla et al., 2014) เพคตินมีความสามารถที่ดีสำหรับการดูดซับโลหะหนัก โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นที่บริเวณของหมู่คาร์บอกซิลิกในสายโซ่พอลิเมอร์ คุณสมบัติการดูดซับได้รับผลกระทบจากปัจจัยภายนอกและมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างโมเลกุลของเพคติน ดังนั้นถ้ามีการศึกษาให้เพิ่มขึ้นจะสามารถใช้เพคตินในการดูดซับโลหะหนักที่มีความเฉพาะเจาะจงกับโลหะหนักที่ต้องการได้ (Wang et al., 2019) โดยได้มีศึกษาการนำเพคตินมาขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสารละลายที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ได้ อีกทั้งยังมีความทนทานต่อการสูญเสียเพคตินไปในการละลายน้ำ (Kaushik et al., 2020) ทำให้ในปัจจุบันมีความสนใจศึกษาการผลิตเพคตินเป็นไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น (Wang et al., 2019; Bhattacharyya et al., 2020; Thakur et al., 2019)

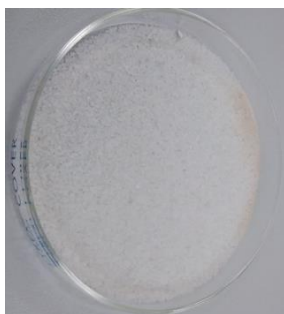
ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเพคตินไฮโดรเจลที่สกัดจากผักตบชวา สำหรับใช้ในการดูดซับโลหะหนักได้แก่ ตะกั่วและแคดเมียม เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากผักตบชวา ส่งผลให้การจัดการผักตบชวาดีขึ้นทางอ้อม ลดการใช้งบประมาณจากรัฐในการกำจัดผักตบชวา และมีปริมาณผักตบชวาอันจะก่อให้เกิดผลเสียต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติลดลง

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการเตรียมเพคตินไฮโดรเจลที่สกัดจากผักตบชวา

สกัดเพคตินจากผักตบชวาหนัก 1,000 กรัม โดยใช้ใช้กรดไฮโดรคลอริก (ยี่ห้อ ACI lab scan AR grade lot no. 21 05 0194) ปรับสถานะของสารละลายให้มีค่า pH เท่ากับ 2.5 ใช้เวลาสกัด 30 นาที ที่อุณหภูมิ 110 °C คั้นสารละลายและกรองผ่านผ้าขาวบาง และตกตะกอนด้วย 95% เอทานอล (ยี่ห้อ ACI lab scan AR grade lot no. 21 06 0489)

ที่แช่เย็น จากนั้นละลายเพคตินในน้ำปราศจากไอออนที่อุ่น ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$) ในอัตราส่วน 3:100 w/v (ใช้น้ำหนักเพคติน 3.00 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร) แล้วตกตะกอนเพคตินไฮโดรเจลในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0 M จากนั้นทำการเติม 1.0 M CaCl_2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตรผสมกับ H_3BO_3 ที่มีความเข้มข้น 2.0 M ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำสารเก็บไว้ที่ตู้เย็นอุณหภูมิ $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ นาน 4 ชั่วโมง จะได้เพคตินไฮโดรเจล ดัง รูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะทางกาย รูปของเม็ดเพคตินไฮโดรเจล

ขั้นตอนการศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำของเพคตินไฮโดรเจล และการนำกลับมาใช้ใหม่

บรรจุเพคตินไฮโดรเจลที่ผ่านการแช่น้ำปราศจากไอออน น้ำหนัก 1.00 กรัม ลงในสารละลายโลหะหนักผสมตะกั่วและแคดเมียมที่มีความเข้มข้นอย่างละ 100 mg/L ปริมาตรรวม 100.0 มิลลิลิตร (Jakobik-Kolon et al., 2014) ปรับค่า pH ให้มีค่าเท่ากับ 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00 และ 6.00 ด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ หมุนปั่นสารละลายด้วย magnetic stirrer ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 15, 60, 120, 240, 480 และ 1,440 นาที ที่อุณหภูมิ $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ นำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) (ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Avio 560 Max) วิเคราะห์หาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ดังสมการ (1) และ (2) คำนวณดังนี้ (Lessa et al., 2020)

$$qt = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) V \quad (1)$$

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

- เมื่อ qt คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยไฮโดรเจล
 C_0 คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น (ppm)
 C_e คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย ณ เวลาใด (ppm)
 m คือ น้ำหนักของไฮโดรเจล (กรัม)
 V คือ ปริมาณของสารละลายที่ใช้ (ลิตร)

จากนั้นนำเพคตินไฮโดรเจลที่ผ่านขั้นตอนการดูดซับสารละลายโลหะหนักผสมตะกั่วและแคดเมียม มาเติมกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร หมนปั่นสารละลายด้วย Magnetic stirrer ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียม ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) และ ใช้สมการที่ (3) ในการคำนวณหาความสามารถในการปลดปล่อยโลหะหนัก ดังนี้ (Lessa et al., 2020)

$$\text{Desorption (\%)} = \frac{Q_{des}}{Q_{ads}} \times 100 \quad (3)$$

- เมื่อ Q_{des} คือ ปริมาณของไอออนของโลหะที่ถูกปลดปล่อย (mg/g)
 Q_{ads} คือ ปริมาณของไอออนของโลหะที่ถูกดูดซับ (mg/g)

ใช้สมการ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm เพื่อใช้ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของเพคตินไฮโดรเจลดังในสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ ดังนี้ (Lessa et al., 2020)

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{K_{qm}C} \right) + \left(\frac{1}{q_m} \right) \quad (4)$$

- เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ)(มิลลิกรัม/กรัม)
 q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
 K คือ ค่าคงที่การดูดซับ
 C คือ ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของโลหะหนักในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (5)$$

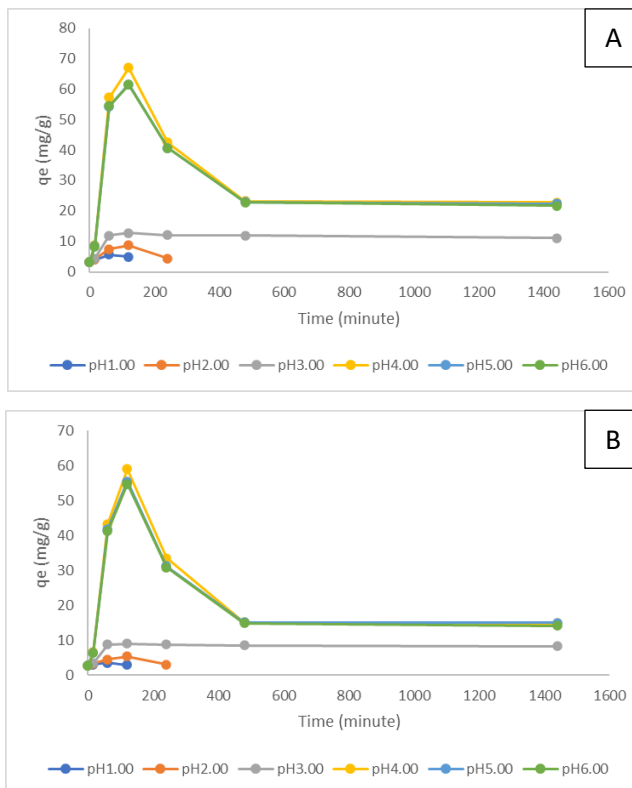
เมื่อ K คือ ความสามารถในการดูดซับสัมพัทธ์ (mmol/g)

n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดริช

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำของเพคตินไฮโดรเจล

เวลาในการสกัดและค่า pH ของสารละลายเป็นปัจจัยที่มีสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาความสามารถของการดูดซับโลหะหนัก รูปแบบของการดูดซับสารละลายโลหะหนักผสมระหว่างตะกั่ว (Pb) และ แคดเมียม (Cd) ใช้วิธีออกแบบให้สารละลายมีค่า pH เท่ากับ 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00 และ 6.00 ตามลำดับ พบผลการศึกษาดัง รูปที่ 2



รูปที่ 2 อิทธิพลค่า pH ของสารละลายโลหะผสมตะกั่ว (A) และแคดเมียม (B)

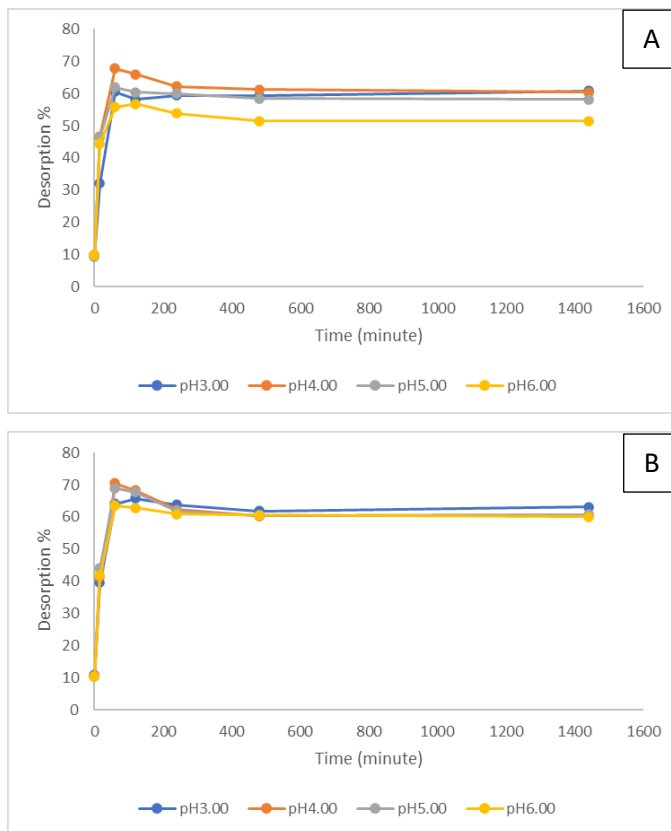
ต่อความสามารถในการดูดซับของเพคตินไฮโดรเจล

จาก รูปที่ 2 พบว่าเพคตินไฮโดรเจลในสารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ละลายหมดก่อน ทำให้ไม่มีความเหมาะสมในการใช้เตรียมเป็นสารละลายเพื่อดูดซับโลหะหนัก เพคตินไฮโดรเจลเริ่มมีประสิทธิ รูปในการใช้เป็นสารดูดซับ เมื่อสารละลายมีค่า pH ตั้งแต่ 3.00 เป็นต้นไป สำหรับเวลาที่เหมาะสมในการใช้เพคตินไฮโดรเจลดูดซับสารละลายตะกั่วและแคดเมียม จาก รูปที่ 2 คือ ที่เวลา 120 นาที และเริ่มลดลงตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่เวลา 1,440 นาที เท่ากับ 22.76 และ 14.89 mg/g ตามลำดับ สำหรับความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของเพคตินไฮโดรเจลจะมีประสิทธิ รูปสูงสุดที่ pH เท่ากับ 4.00 มีค่าความสามารถในการดูดซับ (qe) ตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ 66.98 mg/g และ 58.96 mg/g ตามลำดับ จากผลการศึกษานี้ พบว่า เพคตินไฮโดรเจลมีความสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม

การศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยโลหะหนัก

ประสิทธิ รูปในการปลดปล่อยตะกั่วและแคดเมียมจากเพคตินไฮโดรเจล โดยนำ เพคตินไฮโดรเจลที่ผ่านขั้นตอนการดูดซับสารละลายตะกั่วและแคดเมียม มาเติมกรดไนตริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร หมุนปั่นสารละลายด้วย Magnetic stirrer ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C เพคตินไฮโดรเจลก่อนและหลังอบดังใน รูปที่ 3

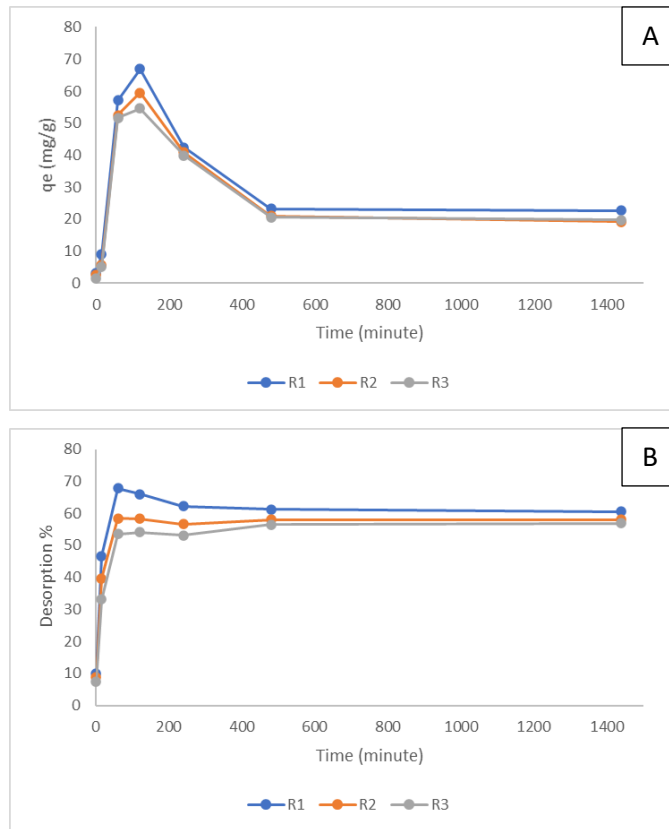
จาก รูปที่ 3 พบว่า เวลาที่เหมาะสมที่สุดในการปลดปล่อยตะกั่วและแคดเมียมจากเพคตินไฮโดรเจลคือ 60 นาที และเริ่มลดลงเล็กน้อยหลังจากนั้น โดยมีค่าความสามารถในการปลดปล่อยตะกั่วและแคดเมียมมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 67.80 และ 70.44 ตามลำดับ ค่าความสามารถในการปลดปล่อยตะกั่วและแคดเมียมของเพคตินไฮโดรเจลมีประสิทธิ รูปสูงสุดที่ pH เท่ากับ 4.00 มีค่าความสามารถในการปลดปล่อยตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ 67.80 mg/g และ 70.44 mg/g ตามลำดับ จากผลการศึกษานี้ พบว่าเพคตินไฮโดรเจลมีความสามารถปลดปล่อยแคดเมียมได้ดีกว่าตะกั่ว



รูปที่ 3 ความสามารถในการปลดปล่อยตะกั่ว (A) และแคดเมียม (B) ณ เวลาต่างๆ

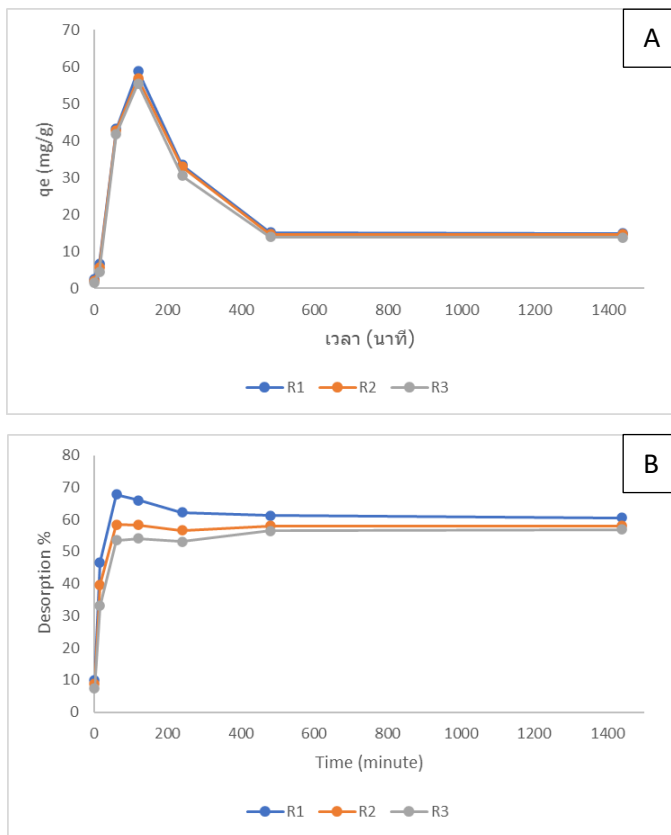
การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของเพคตินไฮโดรเจล

เมื่อศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของเพคตินไฮโดรเจล โดยเลือกใช้สารละลายที่มีค่า pH เท่ากับ 4.00 พบผลการศึกษาดัง รูปที่ 4 พบว่าในการศึกษาการนำเพคตินไฮโดรเจลกลับมาใช้ในการดูดซับและปลดปล่อยตะกั่ว จำนวน 3 รอบ ประสิทธิภาพในการดูดซับและปลดปล่อยตะกั่วมีประสิทธิภาพ รูปที่ดีที่สุดในรอบแรกและลดลงในแต่ละรอบ โดยประสิทธิภาพ รูปที่ดีที่สุดในการดูดซับตะกั่วคือ 120 นาที มีอัตราในการดูดซับตะกั่วลดลงร้อยละ 18.51 สำหรับประสิทธิภาพ รูปความสามารถในการปลดปล่อยตะกั่วในการนำเพคตินไฮโดรเจลกลับมาใช้ใหม่ ที่ดีที่สุดคือ 60 นาที มีอัตราในการปลดปล่อยตะกั่วลดลงร้อยละ 18.04



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพ รูปการนำเพคตินไฮโดรเจลกลับมาใช้ใหม่ จำนวน 3 รอบ
ของความสามารถในการดูดซับตะกั่ว (A) และความสามารถในการปลดปล่อยตะกั่ว (B)

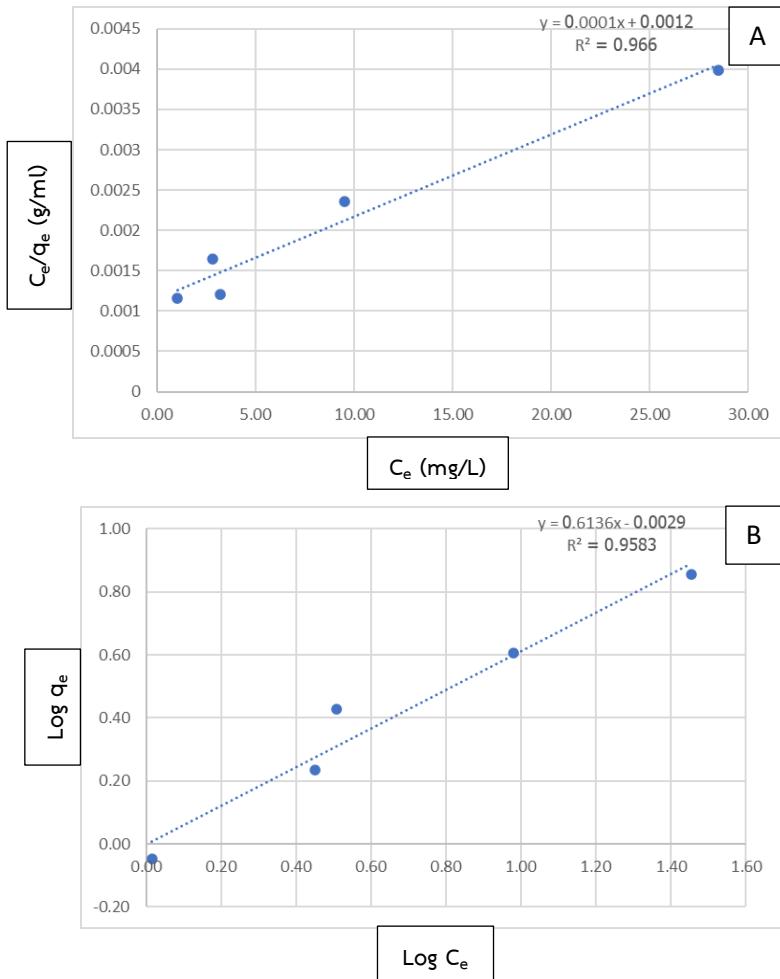
สำหรับการศึกษาการนำเพคตินไฮโดรเจลกลับมาใช้ในการดูดซับและปลดปล่อยแคดเมียม พบว่าประสิทธิภาพ รูปในการดูดซับและปลดปล่อยแคดเมียมมีประสิทธิภาพ รูปที่ดีที่สุดในรอบแรกและลดลงในแต่ละรอบ โดยประสิทธิภาพ รูปที่ดีที่สุดในการดูดซับแคดเมียมคือ 120 นาที มีอัตราในการดูดซับแคดเมียมลดลงร้อยละ 5.89 สำหรับประสิทธิภาพ รูปความสามารถในการปลดปล่อยแคดเมียมในการนำเพคตินไฮโดรเจลกลับมาใช้ใหม่ ที่ดีที่สุดคือ 60 นาที มีอัตราในการปลดปล่อยแคดเมียมลดลงร้อยละ 4.55 ดัง รูปที่ 5



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพ รูปการนำเพคตินไฮโดรเจลกลับมาใช้ใหม่ จำนวน 3 รอบ
ของความสามารถในการดูดซับแคดเมียม (A) และความสามารถในการปลดปล่อยแคดเมียม (B)

จลนพลศาสตร์การดูดซับ

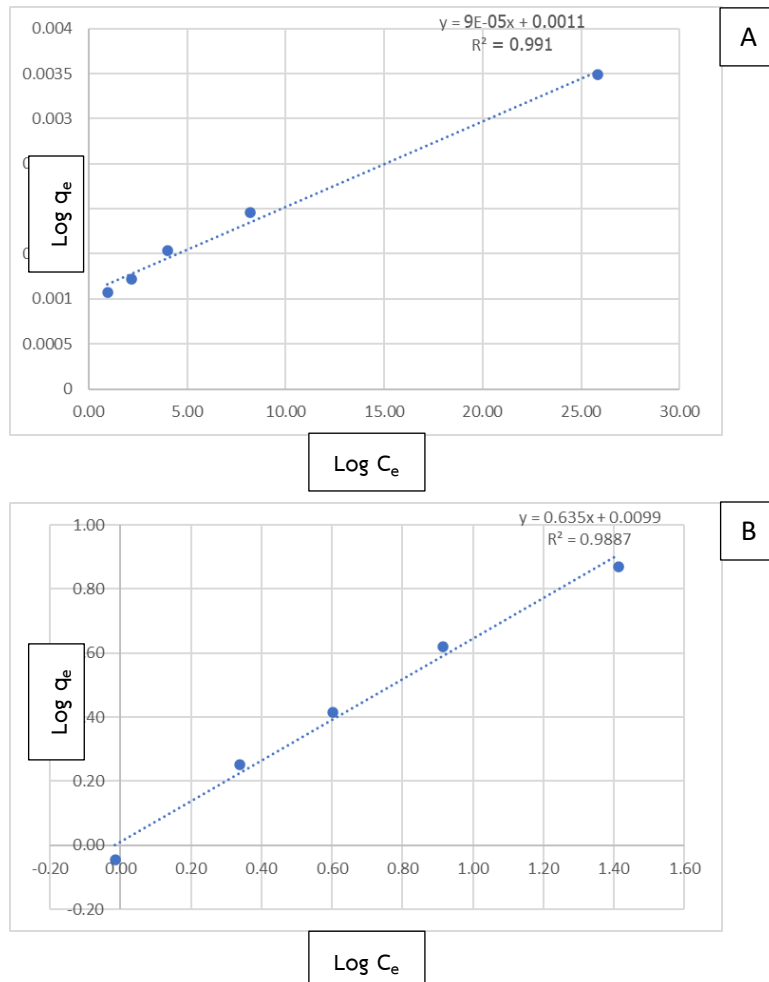
จลนพลศาสตร์การดูดซับของเพคตินไฮโดรเจลที่ใช้ดูดซับสารละลายโลหะหนักผสม ตะกั่วและแคดเมียมที่มีความเข้มข้นอย่างละ 10, 20, 30, 50 และ 100 ppm ปริมาตรรวม 100.0 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 4.0 ด้วยกรดไนตริก หมุนปั่นสารละลายด้วย Magnetic stirrer ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ความเข้มข้นเท่ากับ ที่อุณหภูมิ 22 °C พบผลดัง รูปที่ 6 และ 7 ดังนี้



รูปที่ 6 ไอโซเทอรั่มการดูดซับตะกั่ว (Pb) ของเพคตินไฮโดรเจลแบบเชิงเส้น

(A) สมการแลงเมียร์ (B) สมการฟรุนดริช

จาก รูปที่ 6 พบว่าไอโซเทอรั่มการดูดซับตะกั่วของเพคตินไฮโดรเจลสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดริช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอรั่มสมการแลงเมียร์เท่ากับ 0.97 และสมการฟรุนดริชเท่ากับ 0.96 ตามลำดับ หมายความว่าบนพื้นผิวของเพคตินไฮโดรเจลมีการดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Homogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกันเป็นแบบชั้นเดียว



รูปที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม (Cd) ของเพคตินไฮโดรเจลแบบเชิงเส้น

(A) สมการแลงเมียร์ (B) สมการฟรุนดริช

จาก รูปที่ 7 พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียมของเพคตินไฮโดรเจลสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดริช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอร์มสมการแลงเมียร์เท่ากับ 0.99 และสมการฟรุนดริชเท่ากับ 0.99 ตามลำดับ หมายความว่าบนพื้นผิวของเพคตินไฮโดรเจลมีการดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Homogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกันเป็นแบบชั้นเดียว

เมื่อพิจารณาถึงพารามิเตอร์แบบจำลองไอโซเทอร์มทั้งสองแบบ สามารถสรุปได้ดัง
ในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์แบบจำลองไอโซเทอร์มสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดริชในการ
ดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของเพคตินไฮโดรเจล

ธาตุ	สมการแลงเมียร์			สมการฟรุนดริช		
	q_m	K_L	R^2	n	K_F	R^2
ตะกั่ว (Pb)	833.33	0.08	0.97	1.63	0.99	0.96
แคดเมียม (Cd)	909.09	0.08	0.99	1.57	1.02	0.99
Wang et al., 2021	120.19	0.01	0.99	1.76	-	0.96
Lessa et al., 2020	192.30	0.00	0.99	1.54	0.45	0.96

จากตารางที่ 1 พบว่ารูปแบบการดูดซับโลหะทั้งสองธาตุได้แก่ตะกั่วและแคดเมียม
นั้นเป็นไปในทางเดียวกันคือรูปแบบสมการแลงเมียร์ ซึ่งสอดคล้องกับในงานวิจัยของ Wang
et al. (2021) และ Lessa et al. (2020) ที่ได้ศึกษาและกล่าวว่า การดูดซับโลหะหนักของ
เพคตินไฮโดรเจลส่วนใหญ่มักเป็นการดูดซับบนพื้นผิวของไฮโดรเจลแบบชั้นเดียว โดยที่เมื่อ
ตะกั่วและแคดเมียมถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับโมเลกุลตัว
อื่นบนพื้นผิวเพคตินไฮโดรเจล เมื่อความเข้มข้นของ Pb และ Cd ในสารละลายเพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิจัย

การใช้ประโยชน์จากผักตบชวาโดยนำมาสกัดสารเพคตินเพื่อใช้เป็นสารไฮโดรเจลดูด
ซับโลหะหนักในน้ำ มีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของเพคตินไฮโดรเจล
สูงสุดที่ pH เท่ากับ 4.0 มีค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e) ตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ
66.98 mg/g และ 58.96 mg/g ตามลำดับ และลดลงเล็กน้อยเมื่อสารละลายมีค่า pH
ปัจจัยด้านเวลา พบว่า เวลาที่เหมาะสมที่สุดในการปลดปล่อยตะกั่วและแคดเมียมจากเพคติน
ไฮโดรเจลคือ 60 นาที โดยมีค่าความสามารถในการปลดปล่อยตะกั่วและแคดเมียมมากที่สุด
เท่ากับร้อยละ 67.80 และ 70.44 ตามลำดับ และเริ่มลดลงเล็กน้อยหลังจากนั้น ในด้านของ
ไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของเพคตินไฮโดรเจลสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์

มากกว่าสมการพหุนาม จากผลการวิจัยดังกล่าวจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากผักตบชวาที่เป็นวัชพืชในแหล่งน้ำให้เกิดประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนจากคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปี 2553 ที่ได้มอบให้เป็นทุนสำหรับทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- เอรวิณ เบ้าทอง. (2561). แนวทางการใช้ประโยชน์เปลือกทุเรียนผสมเปลือกมะพร้าวในการสกัดเพกทิน. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้*, 9(2), 200-210.
- Bhattacharyya, A., O'Bryan, C., Ni, Y., Morley, C. D., Taylor, C. R., & Angelini, T. E. (2020). Hydrogel compression and polymer osmotic pressure. *Biotribology*, 22, Doi.org/10.1016/j.biotri.2020.100125.
- Carlini, M., Castellucci, S., & Mennuni, A. (2018). Water hyacinth biomass: chemical and thermal pre-run for energetic utilization in anaerobic digestion process. *Energy Procedia*, 148, 431-438.
- Jakobik-Kolon, A., Milewski, A. K., Mitko, K., & Lis, A. (2014). Preparation of pectin-based biosorbent for cadmium and lead ions removal. *Separation Science and Technology*, 49, 1679-1688.
- Kaushik, P., Priyadarshini, E., Rawat, K., Rajamani, P., & Bohidar, H. B. (2020). pH responsive doxorubicin loaded zein nanoparticle crosslinked pectin hydrogel as effective site-specific anticancer substrates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 1027-1037.
- Lessa, E. F., Medina, A. L., Ribeiro, A. S., & Fajardo, A. R. (2020). Removal of multi-metals from water using reusable pectin/cellulose microfibers composite beads. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 709-720.

- Levigne, S. M. C., Ralet, J., & Thibault, F. (2002). Characterisation of pectins extracted from fresh sugar beet under different conditions using an experimental design. *Carbohydrate Polymers*, 49, 145-153.
- Naohara J., & T. Ishii. (1989). Contents of Pectic Substances in Water Hyacinth. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 36(7), 583-589.
- Shukla, R. N., Bala, K. L., Kumar A. A., Mishra, A., & Yadav, K. C. (2014). Extraction of pectin from citrus fruit peel and its utilization in preparation of jelly. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(5), 1925-1932.
- Thakur, S., Chaudhary, J., Kumar, V., & Thakur, V. K. (2019). Progress in pectin based hydrogels for water purification: Trends and challenges. *Journal of Environmental Management*, 238, 210-223.
- Wang, R., Li, Y., Shuai, X., Liang, R., Chen, J., & Liu, C. (2021). Pectin/Activated Carbon-Based Porous Microsphere for Pb^{2+} Adsorption: Characterization and Adsorption Behaviour. *Polymers*, 13, Doi.org/10.3390/polym13152453.
- Wang, R., Liang, R., Dai, T., Chen, J., Shuai, X., & Liu, C. (2019). Pectin-based adsorbents for heavy metal ions: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 319-329.
- Weiping, S., Qingping, S., Meisheng, X., Zhengshun, W., & Zhitong, Y. (2018). The Resource Utilization of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* [Mart.] Solms) and Its Challenges. *Resources*, 7(3), 1-9.