

การดูดซับตะกั่วในสารละลายด้วยฝักไมยราบยักษ์  
ที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

Lead Adsorption in Aqueous Solution by Giant Mimosa Pods Treated  
with NaOH

ปิยนุช คณะณมา\*

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Piyanut Khanema\*

Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในสารละลายด้วยฝักไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5 โมลาร์ โดยเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ปรับสภาพ การทดสอบใช้การทดลองแบบกะตวรตรวจสอบปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือ ปริมาณตัวดูดซับ เวลาสัมผัส ค่าพีเอชสารละลาย และความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น และศึกษาไอโซเทอร์มแลงมัวร์และพรุนดลิสเพื่อวิเคราะห์กลไกการดูดซับ ผลการทดลองพบว่า การปรับสภาพช่วยลดปริมาณตัวดูดซับลงและเพิ่มความสามารถในการดูดซับตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้นสูงได้ (5 มิลลิกรัม/ลิตร) โดยเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 15 นาที และค่าพีเอชสารละลายเท่ากับ 5 ผลการศึกษาไอโซ เทอร์มการดูดซับพบว่าการดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวบนตัวดูดซับทั้งสองกลุ่ม โดยอธิบายได้ด้วยแบบจำลองแลงมัวร์ และการปรับสภาพช่วยเพิ่มค่าความจุสูงสุดได้มากกว่าไม่ปรับสภาพ ( $2.05 > 1.34$  มิลลิกรัม/กรัม)

คำสำคัญ: ไมยราบยักษ์ ตะกั่ว การดูดซับ การปรับสภาพ

\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author) Lead Adsorption in Aqueous Solution by Giant Mimosa Pods Treated with NaOH  
e-mail: piyanoot\_kh@hotmail.com

\*\*โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2557  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

## Abstract

This research aimed to study the potential of lead adsorption in aqueous solution by using 1.5 M NaOH-treated giant mimosa pods, comparing with untreated pods. Batch experiment was carried out to investigate the effect of experimental parameters such as adsorbent dose, contact time, pH solution and initial lead concentration, and Langmuir and Freundlich isotherm were used to analyze the equilibrium adsorption. The findings found that the pretreatment could reduce adsorbent dose and increase an adsorbing potential on the initial lead concentration (5 mg/l) with the optimal contact time at 15 min and pH solution at 5. According to isotherm study, it fitted to a monolayer adsorption explaining by Langmuir equation. And, the pretreatment could enhance the maximum adsorption capacity over than the untreated treatment ( $2.05 > 1.34$  mg/g).

**Keywords:** Giant mimosa, lead, adsorption, pretreatment

## บทนำ

ตะกั่ว ถือว่าเป็นโลหะหนักอันดับต้นๆ ที่ถูกระบุว่ามีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมค่อนข้างสูง โดยมีแหล่งที่มา ได้แก่ กระบวนการผลิตซั้วอิเล็กทรอนิกส์ กากแบตเตอรี่ สีย้อมผ้า สีเขียนลวดลายภาชนะ สีทาเครื่องเล่น หมึกพิมพ์ ยาง สารปราบศัตรูพืช น้ำมันเบนซิน ภาชนะที่บดกรีด้วยตะกั่ว รวมถึงการผุสลายของแร่ ตะกั่วคาร์บอนเนตที่มีลักษณะของสายแร่ไหลบนผิวดิน ดังเช่นที่พบการปนเปื้อนตะกั่วที่ห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี (Pollution Control Department, 2009) นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่ามีน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะมีปริมาณตะกั่วในรูปตะกั่วซัลเฟตและตะกั่วคาร์บอนเนตสูงถึง 14 มิลลิกรัม/ลิตร (Phochanachan, 2011) ซึ่งค่ามาตรฐานกำหนดไว้ต้องไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร พิษของตะกั่วส่งผลต่อระบบประสาท กล้ามเนื้อ สมออง ตับ (ขัดขวางการสร้างวิตามินดีในตับ) และเม็ดเลือดแดง (ขัดขวางการดูดซึมและการใช้ธาตุเหล็ก ทำให้เม็ดเลือดแดงอายุสั้นและแตกง่าย) ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง ได้แก่ อาหาร น้ำดื่ม หายใจ และผิวหนัง อย่างไรก็ตาม รายงานการเฝ้าระวังทางระบาดวิทยา สำนักระบาดวิทยา ระหว่าง ปี พ.ศ. 2543 - 2552 กลับพบผู้ป่วยจากพิษตะกั่วเพียง 397 ราย เฉลี่ยปีละ 39.7 ราย โดยในปี พ.ศ. 2544 มีจำนวนผู้ป่วยสูงสุดคือ 104 ราย และในปี พ.ศ. 2548 มีจำนวนผู้ป่วยต่ำสุดคือ 14 ราย และมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2548 - 2551 คาดว่ามีสาเหตุจากข้อจำกัดในการวินิจฉัยโรค (Department of Disease Control, 2009)

การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน เทคโนโลยี เมมเบรน การออสโมซิสย้อนกลับ และการใช้พืชหรือจุลินทรีย์บำบัด เป็นต้น แต่กระบวนการดูดซับเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากง่าย สะดวก รวดเร็ว และไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดตัวดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ เวลาสัมผัส ค่าพีเอชของน้ำเสีย รวมถึงความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้น (Atsawawaengrat & Khlowuthiman, 2010)

ปัจจุบันมีงานวิจัยด้านการดูดซับตะกั่วที่มุ่งเน้นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร อุตสาหกรรม และ ป่าไม้พัฒนาเป็นตัวดูดซับ และมีการปรับสภาพ (Pretreatment) เพื่อกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสรวมด้วย เพื่อลดโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนให้เอื้อต่อกระบวนการดูดซับ (Dadi, Varanasi & Schall, 2006) ตัวอย่างงานวิจัย ได้แก่ ใบสะเดา (Bhattacharyya & Sharma, 2004; Athar, Farooq & Hussain, 2007) กากสะเดา (Rao & Khan, 2007) แกลบ (Han, Zhang, Zou, Xiao, Shi & Liu, 2006) ไยมะพร้าว (Igwe, Abia & Ibeh, 2008) เปลือกมะนาว (Arslanoglu, Altundogan & Tumen, 2008) เปลือกทับทิม (EL-Ashtoukhy, Amina & Abdelwahab, 2008) กากชา (Amarasinghe & Williams, 2007) กากฝ้าย (Riaz, Nadeem, Hanif, Ansari & Rehman, 2009) และ เปลือกผลปาล์ม *Raphia* (Abasi, Abia & Igwe, 2011) เป็นต้น

ไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) ถูกจัดเป็น 1 ใน 100 ชนิดพันธุ์ต่างถิ่นรุกรานที่มีความรุนแรงในระดับโลก (Invasive Species Specialist Group, 2016) ทนทานต่อสภาพน้ำท่วมและแห้งแล้งได้ดี ออกดอกได้ 6 ครั้ง/ปี จึงคาดการณ์ว่าหนึ่งต้นสามารถผลิตฝักได้ประมาณ 19,000 ฝัก/ปี (Puechkaset, 2016) เมื่อฝักแก่จะเปลี่ยนเป็น สีน้ำตาลเข้มซึ่งประกอบด้วยเซลล์ลิกนินเซลลูโลส ฝักแก่จะแตกเป็นข้อๆ และหล่นเป็นชีวมวลอยู่ใต้ต้น ฝักไมยราบยักษ์ยังไม่มีรายงานการนำมาใช้ประโยชน์ มีเพียงการศึกษาการผลิตถ่านจากลำต้น ใช้ใบเป็นอาหารสัตว์ และนำขี้เถื่อย ไมยราบยักษ์ไปเพาะเห็ด การศึกษาการใช้ประโยชน์จากฝักไมยราบยักษ์จึงน่าจะเป็นการเพิ่มเติมองค์ความรู้พื้นฐานในอีกแง่มุมหนึ่งของการใช้ประโยชน์จากชีวมวล

การศึกษาคั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถของฝักไมยราบยักษ์ในการดูดซับตะกั่วในสารละลาย โดยตรวจสอบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ เวลาสัมผัส ค่าพีเอชสารละลาย และความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น รวมถึงศึกษากลไกการดูดซับด้วยแบบจำลอง แลงมัวร์และฟรุนดลิช

## วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ เวลาสัมผัส ค่าพีเอชสารละลาย และความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น สำหรับการใช้ฝักไมยราบยักษ์เป็นตัวดูดซับตะกั่วในสารละลาย

## วิธีการวิจัย

### 1. การเตรียมตัวดูดซับ

ตัวอย่างตัวดูดซับได้จากฝักไมยราบยักษ์แห้งที่หั่นได้ต้น ซึ่งเก็บจากดงไมยราบยักษ์ที่เจริญบริเวณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม จากนั้นแยกสิ่งปนเปื้อนออก นำฝักไปบดและร่อนผ่านตะแกรงร่อนโดยกำหนดขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.65 - 2.36 มิลลิเมตร จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชน้ำล้างเป็นกลาง อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ไม่ปรับสภาพ (Untreated pods; UP) และกลุ่มที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH 1.5 โมลาร์ (Treated pods; TP) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชน้ำล้างเป็นกลาง อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง และเก็บรักษาตัวดูดซับทั้งสองกลุ่มไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ฝักไมยราบยักษ์แห้ง (ซ้าย) ผ่านการบดและปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH 1.5 โมลาร์ (กลาง) และไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ (ขวา)

### 2. การเตรียมสารละลายตะกั่ว

สารละลายตะกั่วความเข้มข้นต่างๆ เตรียมโดยละลายสารละลายตะกั่วมาตรฐานรูปเลดไนเตรด ( $Pb(NO_3)_2$ ) ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร (เกรด AAS) ปริมาตร 0.05, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 มิลลิลิตร ด้วยน้ำดับเบิ้ลดีไอ (Double DI-water) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จะได้สารละลายตะกั่วความเข้มข้น 1, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

### 3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

การทดสอบความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับใช้การทดลองแบบกะ (Batch experiment) จำนวน 3 ซ้ำ ในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายให้ได้ตามต้องการด้วย NaOH 0.1 โมลาร์ และ HCl 0.1 โมลาร์ เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าสารแนวราบ (Orbital shaker) ยี่ห้อ N-Biotek รุ่น NB 101S ด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman no.42 เพื่อแยกตัวดูดซับออก และตรวจวัดปริมาณตะกั่วที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปคโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 200AA เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ดังนี้

#### 3.1 ผลของปริมาณตัวดูดซับ

ทดสอบผลของปริมาณตัวดูดซับทั้งสองกลุ่มในสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 จากนั้นเติมตัวดูดซับปริมาณ 0.1, 0.3 และ 0.5 กรัม หลังสิ้นสุดการทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

#### 3.2 ผลของเวลาสัมผัส

ทดสอบผลของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับทั้งสองกลุ่มในสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 จากนั้นเติมตัวดูดซับปริมาณ 0.1 กรัม เขย่าเป็นเวลา 15, 30, 60 และ 90 นาที หลังสิ้นสุดการทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

#### 3.3 ผลของพีเอชสารละลาย

ทดสอบผลของพีเอชสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับในสารละลายตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 3, 5, 7 และ 9 จากนั้นเติมตัวดูดซับปริมาณ 0.1 กรัม หลังสิ้นสุดการทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

#### 3.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้น

ทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับในสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 1, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 จากนั้นเติมตัวดูดซับปริมาณ 0.1 กรัม หลังสิ้นสุดการทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

#### 3.5 คำนวณความสามารถในการดูดซับ

คำนวณความสามารถในการดูดซับจากร้อยละการกำจัดตะกั่ว (สมการที่ 1) และความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่สมดุล (สมการที่ 2) (Farhan, Salem, Ahmad & Awwad, 2012)

$$\text{Pb removal (\%)} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad \dots(1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{w} V \quad \dots(2)$$

โดย  $C_0$  และ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นและที่สมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)  $q_e$  คือ ความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)  $V$  คือ ปริมาตรสารละลายตะกั่ว (ลิตร) และ  $w$  คือ ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ร้อยละการกำจัดตะกั่วและความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่สมดุลด้วยสถิติวิเคราะห์ ความแปรปรวนแบบแจกแจงทางเดียว (One-way ANOVA) ณ ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 และเปรียบเทียบ ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows Version 11.5

## 4. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วด้วยแบบจำลองแลงมัวร์และฟรุนดลิช โดยทดสอบการดูดซับในสารละลายตะกั่วปริมาตร 50 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3 ซึ่งแบบจำลองแลงมัวร์และฟรุนดลิชนิยมใช้ใน การอธิบายรูปแบบการยึดเกาะระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับหลังจากเข้าสู่จุดสมดุลแล้ว โดยแบบจำลองแลงมัวร์อธิบายการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีตำแหน่งยึดเกาะ (Binding site) ระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ที่แน่นอน แต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ในขณะที่แบบจำลองฟรุนดลิชอธิบายการเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ และแต่ละพื้นที่ที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่ โดยแบบจำลองแลงมัวร์และฟรุนดลิชสามารถแสดงเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 3 และ 4 (Toth, 1995; Jaroniec, 1983)

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

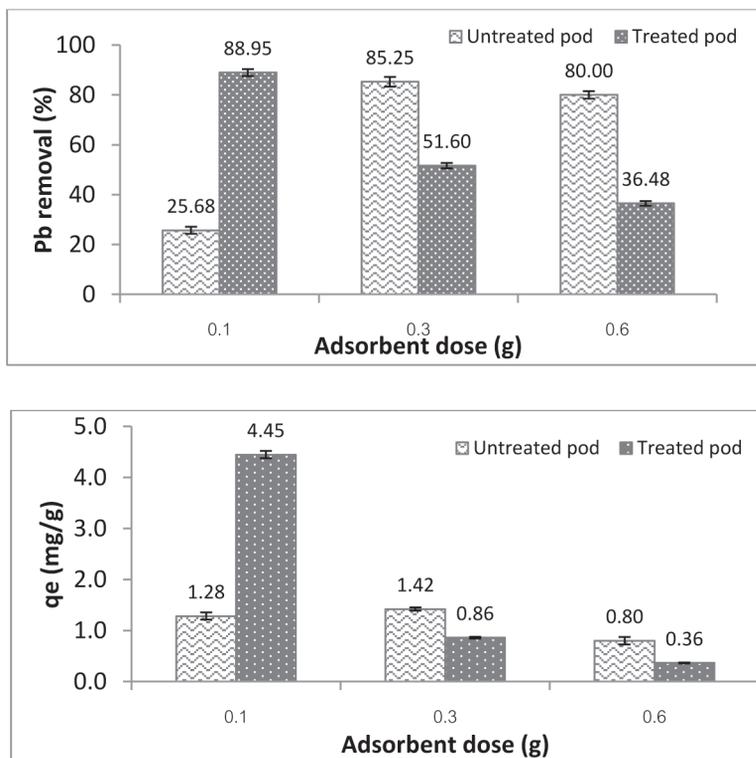
$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots(4)$$

โดย  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตะกั่วที่สมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)  $q_e$  คือ ค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)  $q_m$  คือ ปริมาณตะกั่วสูงสุดที่ถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)  $b$  คือ ค่าคงที่แลงมัวร์ (ลิตร/มิลลิกรัม)  $K_f$  คือค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ และ  $n$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ

## ผลการวิจัย

### 1. ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว

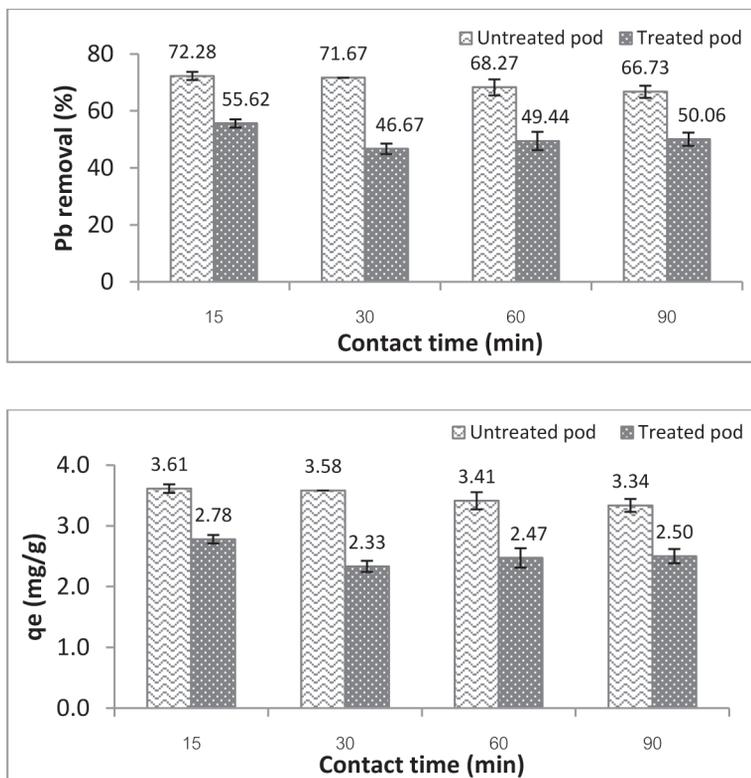
ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับกลุ่มที่ไม่ปรับสภาพจาก 0.1 กรัม เป็น 0.3 กรัม ร้อยละ การกำจัดตะกั่วมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) จากร้อยละ 25.68 เป็นร้อยละ 85.25 และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 0.3 กรัม เป็น 0.6 กรัม ร้อยละการกำจัดลดลงเล็กน้อย (ร้อยละ 80) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และค่า  $q_e$  มีค่าสูงที่สุดเมื่อกำหนดปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.3 กรัม (1.42 มิลลิกรัม/กรัม) ส่วนตัวดูดซับที่ปรับสภาพแล้วพบว่าร้อยละการกำจัดตะกั่วมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.1 กรัม และลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ( $P < 0.05$ ) โดยร้อยละการกำจัดเท่ากับ 88.95, 51.60 และ 36.48 ตามลำดับ และค่า  $q_e$  มีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.1 กรัม คือเท่ากับ 4.45 มิลลิกรัม/กรัม (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการกำจัด (บน) และความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (ล่าง) ของฝักไมยราบยักษ์ที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพ

## 2. ผลของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว

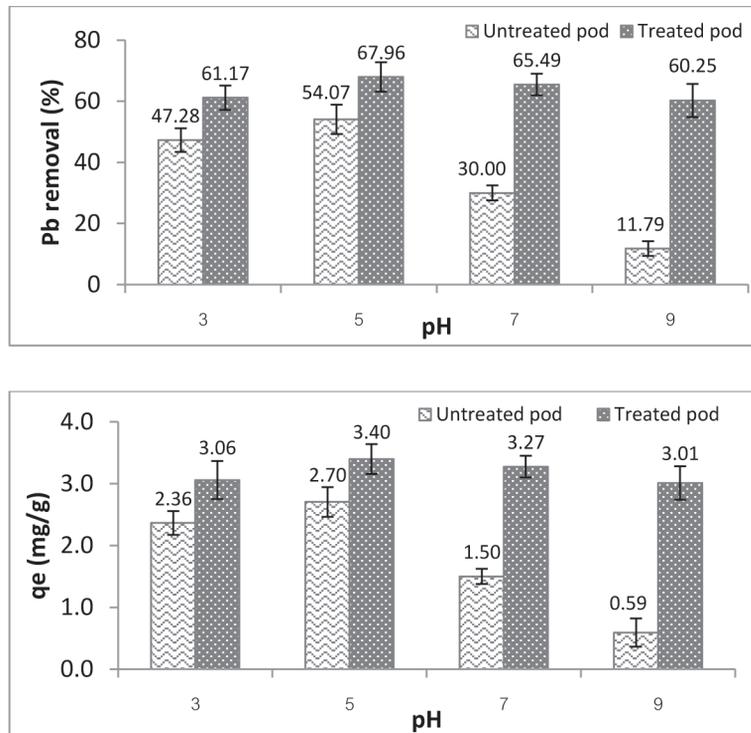
ผลของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วพบว่า ตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพมีร้อยละการกำจัดตะกั่วสูงสุดเมื่อให้เวลาสัมผัส 15 นาที คือ ร้อยละ 72.28 และ 55.62 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัส มากขึ้นร้อยละการกำจัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) และสอดคล้องกับค่า  $q_e$  คือในช่วงเวลาดังกล่าวปริมาณการดูดซับตะกั่วมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.61 และ 2.78 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ผลของเวลาสัมผัสต่อร้อยละการกำจัด (บน) และความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (ล่าง) ของฝักไมยราบยักษ์ที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพ

### 3. ผลของพีเอชสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว

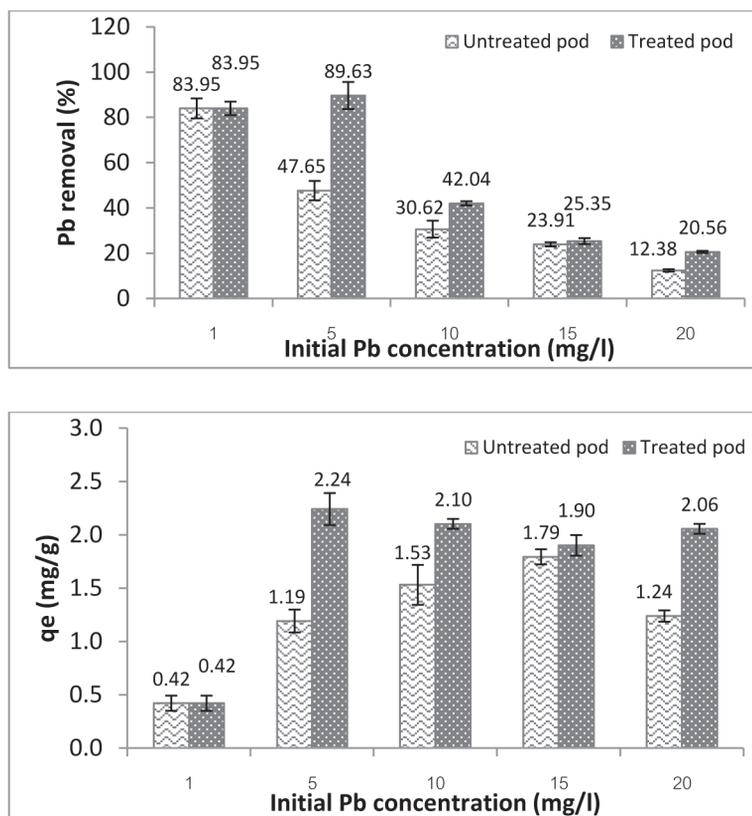
ผลของพีเอชสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วพบว่า ร้อยละการกำจัดตะกั่วของตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ณ ค่าพีเอชสารละลายเท่ากับ 3 และ 5 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) คือเท่ากับร้อยละ 47.28 และ 54.07 ตามลำดับ แต่เมื่อค่าพีเอชสารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 7 และ 9 จะทำให้ร้อยละการกำจัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) และสอดคล้องกับค่า  $q_e$  คือค่าพีเอชสารละลายเท่ากับ 3 และ 5 มีปริมาณ การดูดซับตะกั่วไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) คือ 2.36 และ 2.70 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ส่วนตัวดูดซับที่ปรับสภาพแล้วพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชสารละลายไม่มีผลต่อร้อยละการกำจัดตะกั่วและปริมาณการดูดซับที่สมดุล ( $P > 0.05$ ) แต่อย่างไรก็ตาม ณ ค่าพีเอชสารละลายเท่ากับ 5 พบว่าร้อยละการกำจัดและค่า  $q_e$  มีค่าสูงที่สุดคือเท่ากับร้อยละ 67.96 และ 3.40 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อร้อยละการกำจัด (บน) และความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (ล่าง) ของฝักไมยราบยักษ์ที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพ

#### 4. ผลของความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว

ผลของความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับพบว่า ณ ระดับความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพมีร้อยละการกำจัดและค่า  $q_e$  สูงที่สุดอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) คือเท่ากับร้อยละ 83.95 และ 0.42 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ แต่เมื่อความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดกลับลดลง ส่วนตัวดูดซับที่ปรับสภาพพบว่า ณ ระดับความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร มีร้อยละการกำจัดและค่า  $q_e$  สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) คือเท่ากับร้อยละ 89.63 และ 2.24 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ แต่เมื่อความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเพิ่มขึ้น ร้อยละ การกำจัดกลับลดลงเช่นกัน (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นต่อร้อยละการกำจัด (บน) และความสามารถในการดูดซับ ที่สมดุล (ล่าง) ของฝักไมยราบยักษ์ที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพ

## 5. ไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่า แบบจำลองแลงมัวร์สามารถอธิบายการดูดซับ ตะกั่วบนตัวดูดซับทั้งสองกลุ่มได้ดีกว่าแบบจำลองฟรุนดลิช โดยค่าสหสัมพันธ์ของแลงมัวร์มีค่ามากกว่าฟรุนดลิช ( $R_l^2 = 0.95 > R_f^2 = 0.85$  และ  $R_l^2 = 0.99 > R_f^2 = 0.50$  สำหรับตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพ ตามลำดับ) บ่งบอกว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบนตัวดูดซับทั้งสองกลุ่มเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ค่าความจุสูงสุดของการดูดซับตะกั่ว ( $q_m$ ) ด้วยตัวดูดซับที่ปรับสภาพมีค่ามากกว่าตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ( $2.05 > 1.34$  มิลลิกรัม/กรัม) และค่าคงที่แบบจำลองแลงมัวร์ ( $b$ ) ของตัวดูดซับที่ปรับสภาพมีค่ามากกว่าตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ( $3.87 > 3.12$  ลิตร/มิลลิกรัม) บ่งบอกถึงการยึดติดของตะกั่วบนตัวดูดซับที่ปรับสภาพมีความแข็งแรงของพันธะไอออนิกมากกว่าบนตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ (ตารางที่ 1) จึงกล่าวได้ว่า การปรับสภาพตัวดูดซับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและเพิ่มความแข็งแรงของ การยึดเหนี่ยวระหว่างโลหะหนักกับตัวดูดซับได้

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่วของฝักไมยราพยักษ์ที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพด้วย สารละลาย NaOH 1.5 โมลาร์

ตัวดูดซับ	แบบจำลองแลงมัวร์			แบบจำลองฟรุนดลิช		
	$R_l^2$	$b$ (L/mg)	$q_m$ (mg/g)	$R_f^2$	$K_f$ (L/g)	$n$
Untreated pod	0.95	-3.12	1.34	0.85	0.78	3.57
Treated pod	0.99	3.87	2.05	0.50	1.21	4.02

## วิจารณ์ผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ พบว่าการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH 1.5 โมลาร์ ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับ จึงลดการใช้ปริมาณตัวดูดซับลง เนื่องจาก NaOH ช่วยทำลายโครงสร้างเซลลูโลสทั้งที่แบบผลึกและอัยรูป ทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ พื้นที่ผิวภายในจึงเพิ่มขึ้นและเกิดการดึงน้ำเข้าภายในโครงสร้างของวัสดุตามมา (Punnaphayak & Prasongsuk, 2015) สอดคล้องกับการปรับสภาพไม้ยูคาลิปตัสด้วย สารละลาย NaOH ช่วยลดปริมาณลิกนินและ เฮมิเซลลูโลสลง ทำให้เอนไซม์จากยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น (Pan-Uthai, Laemsak, Sirisansaneeyakun, Vanichsiratana & Parakulsuksatid, 2010) โดยตะกั่วจะถูกดูดซับได้มากที่สุด ที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอกซิล (Martin-Dupont, Gloaguen, Guilloton, Granet & Krausz, 2006)

โดยทั่วไป ความเร็วในการดูดซับโลหะหนักด้วยตัวดูดซับชีวมวลจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบ จากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆ (Volesky & Holan, 1995) เนื่องจากช่วงแรกเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโลหะหนักและตัวดูดซับ และต่อมาการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี (Badmus, Audu & Anyata, 2007) จากการทดลองนี้พบว่าตัวดูดซับทั้งสองกลุ่มมีร้อยละการกำจัดตะกั่วสูงที่สุดเมื่อให้เวลาสัมผัสเท่ากับ 15 นาที เช่นเดียวกับการดูดซับตะกั่วด้วยกากฝ้ายและใบมะรุุม เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 15 และ 20 นาทีแรก หลังจากนั้นการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ภายในรูปทรงตัวดูดซับ (Riaz, Nadeem, Hanif, Ansari, & Rehman, 2009; Harikishore, Harinath, Seshaiyah & Reddy, 2010)

การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก โดยประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักจะลดลงเมื่อค่าพีเอชสารละลายเป็นกรดแก่หรือเบส โดยกรณีค่าพีเอชสารละลายเป็นกรดแก่ ปริมาณไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่มีมากในสารละลายจะแข่งขันกับโลหะหนักและแย่งจับประจุลบ ที่ตำแหน่งยึดเกาะ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับในสารละลายกรดแก่ลดลง (Solidum, 2013) เช่นเดียวกันกับกรณี ค่าพีเอชสารละลายเป็นเบส ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักลดลง เนื่องจากมีโอกาสเกิดไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักในรูปละลายน้ำหรือรูปตกตะกอน เช่น  $Pb(OH)_2$ ,  $Cd(OH)_2$  และ  $Cu(OH)_2$  เป็นต้น (Patnukao, Kongsuwan & Pavasant, 2008) แต่บางครั้งพบว่าพีเอชมากกว่า 5 ตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนแบบ Microprecipitation เช่นกัน (Volesky & Holan, 1995) ส่วนกรณีค่าพีเอชสารละลายเป็นกรดอ่อน ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักจะถูกรบกวนน้อยจากการแย่งจับของ  $H^+$  ที่ตำแหน่งยึดเกาะ เนื่องจาก  $H^+$  บางส่วนถูกกำจัดโดย  $OH^-$  ด้วยกระบวนการ Deprotonation ประจุลบที่ตำแหน่งยึดเกาะจึงว่างและพร้อมดูดซับโลหะหนัก (Badmus, Audu & Anyata, 2007) สอดคล้องกับค่าพีเอชสารละลายที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วด้วยเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าพีเอชเท่ากับ 6 (Tuprakai & Tuprakai, 2008) โดยรูปแบบตะกั่วที่พบมากที่สุดเมื่อพีเอชน้อยกว่า 6 คือ  $Pb^{2+}$  และ  $Pb(OH)^+$  (Gomez-Sarrano, Macias-Garcia, Esplinosa-Mansilla & Valenzuela-Calahorro, 1998) งานวิจัยนี้ ค่าพีเอชสารละลายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพคือพีเอชเท่ากับ 5 ส่วนตัวดูดซับที่ปรับสภาพการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชสารละลายไม่มีผลต่อการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (แต่ร้อยละการกำจัดมีค่าสูงสุดเมื่อค่าพีเอชสารละลายเท่ากับ 5 เช่นกัน) สอดคล้องกับการดูดซับตะกั่วและทองแดงด้วยเปลือกมังคุดสกัดสี (Zein, Suhaili, Earnestly & Indrawati, 2010) และการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมด้วยเปลือกสับปะรด เปลือกกระท้อน และเปลือกส้ม (Solidum, 2013)

การศึกษาแบบจำลองแลงมัวร์และฟรุนดลิชเพื่อใช้อธิบายกลไกการดูดซับนั้น พบว่าตะกั่วเกิดการดูดซับบน ตัวดูดซับทั้งสองกลุ่มแบบชั้นเดียวโดยอธิบายได้ด้วยแบบจำลองแลงมัวร์ และการปรับสภาพด้วยเบสช่วยเพิ่มค่าความจุสูงสุดของการดูดซับตะกั่ว ( $q_m$ ) มากขึ้น เนื่องจากการปรับสภาพช่วยกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนผิวตัวดูดซับ ทำให้ผิวนิ่งเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์เสียสภาพ ส่งผลให้มีตำแหน่งยึดเกาะเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการใช้ NaOH ปรับสภาพกากกุหลาบ (*Rosa centifolia*) ของเหลือทิ้งจากกระบวนการกลั่น

น้ำหอมเพื่อดูดซับตะกั่ว พบว่า NaOH เหมาะสำหรับเตรียม ตัวดูดซับชีวมวลมากที่สุด (qm 87.74 มิลลิกรัม/กรัม) เมื่อเปรียบเทียบกับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CHO}$  และ  $\text{HgCl}_2$  เนื่องจาก NaOH มีความเป็นเบสแก่สูงกว่าสารประกอบชนิดอื่น (Nasir, Nadeem, Akhtar, Hanif & Khalid, 2007) และ การใช้รำข้าวปรับสภาพด้วย NaOH สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงกว่าการปรับสภาพด้วย  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$  และ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เช่นกัน (Fatima, Nadeem, Masood, Saeed & Ashraf, 2013) ตารางที่ 2 ได้เปรียบเทียบค่า qm ด้วยวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสชนิดต่างๆ พบว่าการเตรียมตัวดูดซับมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะการปรับสภาพไบโม่ฆ่มด้วย NaOH 0.1 นอร์มอล และกรดซัลฟิวริกช่วยเพิ่มค่า qm สูงถึง 209.54 มิลลิกรัม/กรัม

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความจุสูงสุดของการดูดซับตะกั่วด้วยวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส

ชนิดตัวดูดซับ	การเตรียมตัวดูดซับ	qm (มิลลิกรัม/ กรัม)	อ้างอิง
ไบโม่ฆ่ม	ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH 0.1 นอร์มอล และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น	209.54	Harikishore, Harinath, Seshaiiah & Reddy (2010)
กากฝ้าย	บด (ขนาดอนุภาค 0.36 มิลลิเมตร)	196.07	Riaz, Nadeem, Hanif, Ansari, & Rehman (2009)
รำข้าว	ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH	147.78	Fatima, Nadeem, Masood, Saeed & Ashraf (2013)
	ปรับสภาพด้วยสารละลาย $\text{Ca}(\text{OH})_2$	139.08	
	ปรับสภาพด้วยสารละลาย $\text{Al}(\text{OH})_3$	127.24	
	ผ่านกระบวนการ Esterification	124.28	
	ปรับสภาพด้วยสารละลาย $\text{NaHCO}_3$	118.08	
	ผ่านกระบวนการ Methylation	118.88	
	ปรับสภาพด้วยสารละลาย $\text{Na}_2\text{CO}_3$	117.12	
	ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ขนาดอนุภาค 0.25 มิลลิเมตร)	80.24	
ขี้เถ้าแกลบ	ผ่านกระบวนการ Carbonization ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง	112.36	El-Said (2010)
แกลบ	บด	37.88	
เปลือกงา	บดและต้ม	34.6	Harikishore, Seshaiiah, Reddy, Madhava Rao & Wang (2010)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความจุสูงสุดของการดูดซับตะกั่วด้วยวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส (ต่อ)

ชนิดตัวดูดซับ	การเตรียมตัวดูดซับ	qm (มิลลิกรัม/ กรัม)	อ้างอิง
ต้นและใบสับประรด	บด (ขนาดอนุภาค 2-3 มิลลิเมตร) และปรับสภาพด้วย EDTA 150 มิลลิกรัม/ลิตร	24.25	Dokprathum & Samphanphanit (2010)
	บด (ขนาดอนุภาค 2-3 มิลลิเมตร) และปรับสภาพด้วย EDTA 50 มิลลิกรัม/ลิตร	17.64	
เปลือกมังคุด	รูปสารสกัด	3.56	Zein, Suhaili, Earnestly & Indrawati (2010)
กะลามะพร้าว	บด (ขนาดอนุภาค 120 มิลลิเมตร)	1.17	Okafor, Okon, Daniel & Ebenso (2012)
เปลือกลำไย	บด	8.70	Chawanchai, Chuenban, Chuenban & Chaibu (2007)
	ปรับสภาพด้วย H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.48	
	ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH 0.25 นอร์มอล	1.01	
ฝักไมยราบยักษ์	บด (ขนาดอนุภาค 1.65 - 2.36 มิลลิเมตร)	1.34	งานวิจัยนี้
	บดและปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH 1.5 โมลาร์	2.05	

## สรุปผลการวิจัย

สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยฝักไมยราบยักษ์ที่ไม่ปรับสภาพ คือ ปริมาณตัวดูดซับ 0.3 กรัม เวลาสัมผัส 15 นาที ค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนฝักไมยราบยักษ์ที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH 1.5 โมลาร์ คือ ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม เวลาสัมผัส 15 นาที ค่าพีเอชเท่ากับ 5 และความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร กลไกการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับทั้งสองกลุ่มเป็นแบบชั้นเดียวโดยอธิบายได้ด้วยแบบจำลองแลงมัวร์ และการปรับสภาพตัวดูดซับช่วยเพิ่มค่าความจุสูงสุดของการดูดซับ ( $2.05 > 1.34$  มิลลิกรัม/กรัม) และแม้ว่าฝักไมยราบยักษ์จะเป็นตัวดูดซับตะกั่วที่มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น แต่ก็ถือว่าเป็นตัวดูดซับที่มีอยู่ในธรรมชาติที่ช่วยดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในธรรมชาติได้

## ข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมตัวอย่างตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH 1.5 โมลาร์ ต้องระวังเรื่องการล้างตัวอย่างไม่ให้มีไอออนของสารละลาย NaOH เหลืออยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ มิฉะนั้นเกลือ NaOH ที่เหลืออยู่ที่พื้นผิวตัวอย่างอาจไปรบกวนกระบวนการดูดซับหรือทำปฏิกิริยากับสารละลายตะกั่วเกิดเป็นตะกอนในรูปเลดไฮดรอกไซด์ (Pb(OH)<sub>2</sub>) ได้

## References

- Abasi, C.Y., Abia, A.A. & Igwe, J.C. (2011). Adsorption of iron(III), lead(II) and cadmium(II) ions by unmodified raphia palm (*Raphia hookeri*) fruit endocarp. *Environmental Research Journal*, 5(3), 104-113.
- Amarasinghe, B.M.W.P.K. & Williams, R.A. (2007). Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 132, 299-309.
- Arslanoglu, H., Altundogan, H.S. & Tumen, F. (2008). Preparation of cation exchanger from lemon and sorption of divalent heavy metals. *Bioresource Technology*, 99, 2699-2705.
- Athar, M., Farooq, U. & Hussain, B. (2007). *Azadirachata indicum* (neem): an effective biosorbent for the removal of lead(II) from aqueous solutions. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 79, 288-292.
- Atsawawaengrat, P. & Khlowuthiman, W. (2010). Adsorption of dyes by natural adsorbents. *Ladkrabang Engineering Journal*, 27(4), 61-66. (in Thai).
- Badmus, M.A.O., Audu, T.O.K. & Anyata, B.U. (2007). Removal of lead ion from industrial wastewater by activated carbon prepared from periwinkle shells (*Typanotonus fuscatus*). *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 31, 251-263.
- Bhattacharyya, K.G. & Sharma, A. (2004). Adsorption of Pb(II) from aqueous solution by *Azadirachta indica* (Neem) leaf powder. *Journal of Hazardous Materials*, 113, 97-109.
- Chawanchai, B., Chuenban, T., Chuenban, S. & Chaibu, P. (2007). Study parameters of cadmium and lead adsorption in aqueous solution by using longan peel as an

- adsorbent. *Journal of Fisheries Technology Research*, 1(2), 297-308. (in Thai).
- Dadi, A.P., Varanasi, S. & Schall, C.A. (2006). Enhancement of cellulose saccharification kinetics using an ionic liquid pretreatment step. *Biotechnology and Bioengineering*, 95, 904-910.
- Department of Disease Control. (2009). Annual Epidemiological Surveillance Report 2009. Nonthaburi: The Agricultural Co-operative Federation of Thailand, Ltd. Printing. (in Thai).
- Dokprathum, K. & Samphanphanit, P. (2010). Effect of EDTA on lead adsorption from wastewater by biomass of *Ananas comosus* (L.) Merr. Proceedings of 48th Kasetsart University Annual Conference, 114-122. (in Thai).
- El-Ashtoukhy, E.-S.Z., Amina, N.K. & Abdelwahab, O. (2008). Removal of lead(II) and copper(II) from aqueous solution using pomegranate peel as a new adsorbent. *Desalination*, 223, 162-173.
- El-Said, A.G. (2010). Biosorption of Pb(II) ions from aqueous solutions onto rice husk and its ash. *Journal of America Science*, 6(10), 143-150.
- Farhan, A.M., Salem, N.M., Ahmad, A.L. & Awwad, A.M. (2012). Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies of the biosorption of heavy metals by *Ceratonia siliqua* bark. *American Journal of Chemistry*, 2(6), 335-342.
- Fatima, T., Nadeem, R., Masood, A., Saeed, R. & Ashraf, M. (2013). Sorption of lead by chemically modified rice bran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10, 1255-1264.
- Gomez-Sarrano, V., Macias-Garcia, A., Esplinoso-Mansilla, A. & Valenzuela-Calahorra, C. (1998). Adsorption of mercury cadmium and lead from aqueous solution on heat-treated and sulphurized activated carbon. *Water Research*, 32, 1-4.
- Han, R., Zhang, J., Zou, W., Xiao, H., Shi, J. & Liu, H. (2006). Biosorption of copper(II) and lead(II) from aqueous solution by chaff in a fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*, 133, 262-268.
- Harikishore, K.R.,D., Harinath, Y., Sessaiah, K. & Reddy, A.V.R. (2010). Biosorption of Pb(II) from aqueous solutions using chemically modified *Moringa oleifera* tree leaves. *Chemical Engineering Journal*, 162, 626-634.

- Harikishore, K.R.,D., Seshaiyah, K., Reddy, A.V.R., Madhava Rao, M. & Wang, M.C. (2010). Biosorption of Pb<sup>2+</sup> from aqueous solutions by *Moringa oleifera* bark: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 174, 831-838.
- Igwe, J.C., Abia, A.A. & Ibeh, C.A. (2008). Adsorption kinetics and intraparticulate diffusivities of Hg, As and Pb ions on unmodified and thiolated coconut fiber. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 5, 83-92.
- Invasive Species Specialist Group. (2016). View 100 of the World's Worst Invasive Alien Species. Retrieved May 20, 2016, from <http://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=41>
- Jaroniec, M. (1983). Physical adsorption on heterogeneous solids. *Advances in Colloid and Interface Science*, 28, 149-225.
- Martin-Dupont, F., Gloaguen, V., Guilloton, M., Granet, R. & Krausz, P. (2006). Study of the chemical interaction between barks and heavy metal cations in the sorption process. *Journal of Environmental Science and Health – Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 41(2), 149-60.
- Nasir, M.H., Nadeem, R., Akhtar, K., Hanif, M.A. & Khalid, A.K. (2007). Efficacy of modified distillation sludge of rose (*Rosa centifolia*) petals for lead(II) and zinc(II) removal from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 147, 1006-1014.
- Okafor, P.C., Okon, P.U., Daniel, E.F. & Ebenso, E.E. (2012). Adsorption capacity of coconut (*Cocos nucifera* L.) shell for lead, copper, cadmium and arsenic from aqueous solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 12354-12369.
- Pan-Uthai, W., Laemsak, N., Sirisansaneeyakun, S., Vanichsriratana, W. & Parakulsuksatid, P. (2010). Ethanol production from eucalyptus biomass by a simultaneous saccharification and fermentation process. *Proceedings of 48th Kasetsart University Annual Conference*, 392-400. (in Thai).
- Patnukao, P., Kongsuwan, A. & Pavasant, P. (2008). Batch studies of adsorption of copper and lead on activated carbon from *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. bark. *Journal of Environmental Sciences*, 20, 1028-1034.
- Phochanachan, P. (2011). Sustainable management of characteristic utilization and treatment of wastewater in factory case study: Bis Pipe Fitting Company Co. Ltd.,

- Samutsakorn Province. *SDU Research Journal Sciences and Technology*, 4 (1), 1-16. (in Thai).
- Pollution Control Department. (2009). *Klity Creek lead contamination and public dissemination. Annual Report 2009.* (in Thai).
- Puechkaset. (2016). Giant Mimosa. Retrieved May 25, 2016, from <http://puechkaset.com/ไมยราบยักษ์/>. (in Thai).
- Punnaphayak, H. & Prasongsuk, S. (2015). *Industrial botany.* Bangkok: Chulalongkorn University Press. (in Thai).
- Rao, R.A.K. & Khan, N.A. (2007). Removal and recovery of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) ions from single and multimetal systems by batch and column operation on neem oil cake (NOC). *Separation and Purification Technology*, 57, 394-402.
- Riaz, M., Nadeem, R., Hanif, A.M., Ansari, T.M. & Rehman, K. (2009). Pb(II) biosorption from hazardous aqueous streams using *Gossypium hirsutum* (cotton) waste biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 161, 88-94.
- Solidum, J.N. (2013). Peel wastes of *Ananas comosus* (L.) Merr., *Sandoricum koetjape* Merr., *Citrus nobilis* Lour. as lead and cadmium biosorbent in Manila tap water. *Journal of Environmental Science and Management*, 16(2), 28-35.
- Toth, J. (1995). Uniform interpretation of gas/solid adsorption. *Advances in Colloid and Interface Science*, 55, 1-239.
- Tuprakai, S.R. & Tuprakai, S. (2008). Adsorption of lead in sugarcane wastewater using bagasse ash adsorbents. *SDU Research Journal Sciences and Technology*, 1(1), 1-11. (in Thai).
- Volesky, B. & Holan, Z.R. (1995). Biosorption of heavy metals (Review). *Biotechnology Progress*, 11, 235-250.
- Zein, R., Suhaili, R., Earnestly, F. & Indrawati, E. M. (2010). Removal of Pb(II), Cd(II) and Co(II) from aqueous solution using *Garcinia mangostana* L. fruit shell. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 52-56.

## ผู้เขียน

ดร.ปิยนุช คะณณา

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

e-mail: piyanoot\_kh@hotmail.com

