



การกำจัดตะกั่วในน้ำโดยใช้ก้านใบและใบของต้นบอน (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) เป็นตัวดูดซับ  
REMOVAL OF LEAD IN WATER BY USING LEAF STALK AND LEAF OF  
THE ELEPHANT EAR PLANT (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) AS ADSORBENT

วรรณกัษมา ฮารอน

อาจารย์สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

Corresponding author: wankassama@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการนำก้านใบและใบของต้นบอนมาใช้ในการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ปัจจัยการดูดซับที่ศึกษาได้แก่ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ความเข้มข้นของโลหะ และค่าพีเอช นอกจากนี้แล้วยังได้ศึกษารูปแบบของการดูดซับโลหะหนัก โดยเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟูลินดลิช

ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ 9.619 มก./ลิตร ของโลหะตะกั่ว พบว่า ก้านบอน (90.72 %) > ใบบอน (79.27%) โดยค่าการดูดซับโลหะบนตัวดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะตะกั่ว ตัวดูดซับจากงานวิจัยนี้สามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้ดี จึงมีความน่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

คำสำคัญ : โลหะหนัก, การดูดซับ, ต้นบอน

ABSTRACT

*In this study, we investigated the leaf stalk and leaf of the Elephant ear plant as an adsorbent for the removal of Lead (Pb(II)) from synthesis wastewater. The adsorption factors studied were the contact time, initial M(II) concentration and pH. Moreover, we studied adsorption in isotherm, comparison of Langmuir isotherm and Foundlish isotherm.*

*The adsorption efficiency in 9.619 ppm Pb(II) were found that leaf stalk (90.72 %) > leaf (79.27%) The  $Q_e$  (mg/g) were increase with increasing initial Pb(II) concentration. The adsorbent from this work could adsorb Pb(II) which should be of interest in application such as wastewater treatment.*

**KEYWORD:** heavy metal, adsorption, *Colocasia esculenta* (L.) Schott

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังประสบปัญหาน้ำปนเปื้อนโลหะหนักในภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ โดยปัญหาดังกล่าวถือเป็นปัญหาระดับชาติที่ต้องเร่งหาทางแก้ไขโดยด่วน จากรายงานสถานการณ์น้ำปนเปื้อนโลหะหนักรายภาค ประจำปี พ.ศ. 2559 – มีนาคม พ.ศ.2560 ของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้ให้ข้อมูลคุณภาพน้ำรายภาคไว้พอสังเขปดังแสดงในตารางที่ 1 [1]

ตารางที่ 1 ข้อมูลคุณภาพน้ำรายภาคของประเทศไทย [1]

ภาค	คุณภาพน้ำ
ภาคเหนือ	พบโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ร้อยละ 1.7 ของพื้นที่ที่ตรวจวัด สัดส่วนของโลหะหนักที่เกินมาตรฐานได้แก่ สารหนู 56% ตะกั่ว 16% แมงกานีส 12% แคดเมียม 12% และปรอท 4%
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	พบโลหะหนักเจือปนในน้ำร้อยละ 1.5 ของพื้นที่ที่สุ่มตรวจทั้งหมด โลหะหนักที่มีปริมาณเกินมาตรฐานมีอยู่ 5 ชนิด คือ สังกะสี ปรอท แมงกานีส แคดเมียม และอาร์เซนิก ทั้งนี้โลหะหนักทั้ง 5 ชนิดนี้มีสัดส่วนที่เกินมาตรฐานอยู่ 39 32 22 4 และ 4 ตามลำดับ
ภาคใต้	โลหะหนักเจือปนในน้ำปริมาณร้อยละ 0.6 ของพื้นที่ที่สุ่มตรวจวัดทั้งหมด โดยพบโลหะแมงกานีสมีปริมาณที่เกินสัดส่วนมาตรฐานอยู่ร้อยละ 50 ขณะที่พบโลหะสังกะสีและปรอท มีสัดส่วนเกินมาตรฐานอยู่อย่างละร้อยละ 25
ภาคตะวันออก	มีคุณภาพน้ำตามมาตรฐานและไม่พบโลหะหนักในปริมาณที่เกินมาตรฐาน

พิษภัยของโลหะหนักที่เจือปนในน้ำมีมากมาย เช่น ทำให้อวัยวะต่างๆ ภายในร่างกายทำงานผิดปกติ ก่อให้เกิดโรคอันตราย เช่น สารหนู มีผลทำลายระบบทางเดินอาหารและระบบประสาทส่วนกลาง หากรับเข้าสู่ร่างกายปริมาณมากๆ จะทำให้ผิวหนังกระด้างและเป็นหย่อมๆ และเป็นมะเร็งผิวหนัง แคดเมียม เมื่อสูดดมเข้าไปจะทำให้เป็นไข้ ไอ โลหะและมีอาการเจ็บหน้าอก หากรับประทานเข้าไปจะทำให้เป็นนิ่ว เม็ดเลือดแดงถูกทำลาย กระดูกพรุน และไตวาย [3] ทองแดง ทำให้เกิดการอักเสบในช่องท้อง และท้องเสีย การรับทองแดงเข้าสู่ร่างกายมากเกินไปและรับติดต่อกันเป็นระยะเวลานานๆ จะทำให้เป็นโรควิลสัน ตะกั่ว ทำให้ปวดท้อง และคลื่นไส้ อาเจียน การรับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากๆ จะทำให้เป็นโรคโลหิตจางและเสียชีวิตในที่สุด [2]

การกำจัดโลหะหนักในน้ำทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการตกตะกอนร่วมทางเคมี วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน วิธีการเวอร์สออสโมซิส วิธีการทางไฟฟ้าเคมี และวิธีดูดซับ เป็นต้น เมื่อพิจารณาต้นทุนในการดำเนินการ ถือได้ว่า การดูดซับเป็นวิธีที่ใช้งบประมาณลงทุนในกระบวนการบำบัดน้ำที่น้อยที่สุดอีกทั้งยังสามารถทำได้ง่ายที่สุด ควบคุมสภาวะได้ง่ายที่สุด และมีวิธีการไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับที่นำมาใช้เพื่อการบำบัดน้ำโดยวิธีการดูดซับ มีทั้งตัวดูดซับธรรมชาติ เช่น เปลือกมังคุด ถ่านกัมมันต์ และตัวดูดซับสังเคราะห์ที่เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการ เช่น ซีโอไลต์ และโลหะออกไซด์ต่างๆ [4 - 10]

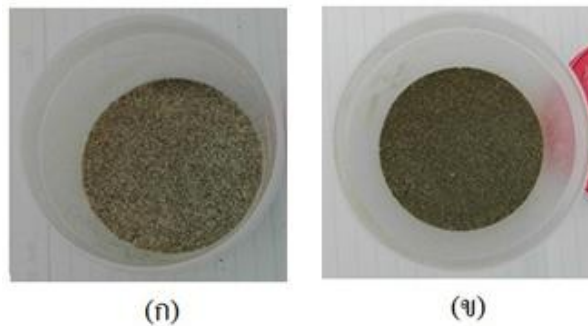
ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการบำบัดน้ำที่มีตะกั่วเจือปน ซึ่งตะกั่วเป็นโลหะมีพิษที่ก่อให้เกิดการสะสมในร่างกายได้ง่ายและทำให้มีโอกาสดเกิดโรคมะเร็งขึ้น การกำจัดตะกั่วในน้ำนี้จะใช้ก้านใบและใบของบอนเป็นตัวดูดซับ โดยบอนเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่มีและหาง่ายในท้องถิ่นชายแดนใต้ ดังนั้นในการวิจัยจึงได้นำต้นบอน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน เพื่อทำการเปรียบเทียบกัน คือส่วนก้านใบ และส่วนใบบอน ทั้งนี้เนื่องจากเห็นว่าแต่ละส่วนมีปริมาณส่วนเส้นใยแตกต่างกัน ดังนั้นจึงคาดว่าอาจมีผลทำให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไม่เท่ากัน วัตถุประสงค์การวิจัยในครั้งนี้ คือ 1. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะมีพิษประเภทตะกั่ว โดยใช้ต้นบอนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่มีในท้องถิ่นเป็นตัวดูดซับ 2. เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของก้านใบและใบของบอน โดยใช้เครื่องมือขั้นสูงและศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยเครื่องมือ Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-OES) และ 3. เพื่อศึกษารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์กับไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช

การศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ก้านบอนและไบบอนเป็นตัวดูดซับนี้พบว่ายังไม่มียกวิจัยคนใด หรือกลุ่มใดทำการศึกษามาก่อน จึงมั่นใจได้ว่าการทำวิจัยในครั้งนี้ไม่ซ้ำซ้อนกับงานวิจัยใดๆ ผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะสามารถนำไปใช้กำจัดโลหะหนักตะกั่วได้และนำไปใช้ได้จริงในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การเตรียมตัวอย่างก้านบอน

ล้างต้นบอนให้สะอาด จากนั้นตัดแบ่งส่วนก้านไบและไบบอนออกจากกัน นำแต่ละส่วนมาตัดให้มีขนาดเล็ก บั่นหยาบและอบในเตาที่อุณหภูมิ 80 – 100 °C เป็นเวลา 4 วัน จะได้ตัวอย่างที่เป็นผงหยาบ ให้นำตัวอย่างแต่ละส่วนมาบดให้ละเอียดอีกครั้งด้วยเครื่องบดไฟฟ้าจนได้ตัวอย่างที่เป็นผงละเอียด นำไปร่อนคัดเลือกผงที่มีขนาด 300 ไมโครเมตรด้วยตะแกรงร่อนเมทขนาด 50 mesh ลักษณะของผงตัวอย่างก้านบอนและไบบอนที่นำมาศึกษาการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว แสดงในรูปที่ 1(ก-ข)



รูปที่ 1 ผงตัวอย่าง (ก) ก้านบอน และ (ข) ไบบอน

### 2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวอย่าง

นำผงตัวอย่างของก้านบอนและไบบอน มาวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพโดยวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันในตัวอย่างด้วยเครื่องมือ Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ศึกษาลักษณะพื้นผิวตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยใช้เทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และทำการตรวจหาธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างทั้งหมดด้วยเทคนิค Energy dispersive X-ray spectrometer (EDX)

### 2.3 การทดสอบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำ

#### 2.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วเจือปนอยู่ในปริมาณ 10 – 50 มก./ลิตร โดยเริ่มต้นจากเตรียมสารละลายเข้มข้น (Stock Solution) ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร จะได้ 1 mM Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> มี Pb(II) 207.2 มก./ลิตร จากนั้นนำ Stock Solution มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ความเข้มข้นของโลหะตามที่ต้องการ

ตรวจสอบความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES และทำการเปรียบเทียบร้อยละของความถูกต้องระหว่างเข้มข้นตะกั่วที่ต้องการกับเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้

### 2.3.2 การศึกษาผลของเวลาเย้าต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

นำน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว ความเข้มข้น 9.619 มก./ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นชั่งผงตัวอย่าง ก้านบอนน้ำหนัก 1.0 กรัม ใส่ลงไปและนำไปเย้าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5, 30, 60, 120 และ 180 นาที ภายหลังเย้าแล้วนำตัวอย่างไปใส่ในหลอดทดลองและทำการหมวนเหวี่ยงจนเกิดการแยกชั้นของสารละลายใส และผงตัวอย่าง เลือกเฉพาะส่วนสารละลายใสไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง ICP-OES ส่วนผง ตัวอย่างให้เก็บเพื่อนำไปทดลองต่อในหัวข้อ 2.3.5

ทำการทดลองด้วยวิธีการเดียวกันอีกครั้ง โดยเปลี่ยนตัวดูดซับจากก้านบอนเป็นผงไบบอน

#### 2.3.2.1 การทดลองควบคุม เพื่อศึกษาปริมาณโลหะหนักที่หายไป

นำน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว ความเข้มข้น 9.619 มก./ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นนำไปเย้าด้วย เครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5, 30, 60, 120 และ 180 นาที (ไม่มีการใส่ตัวดูดซับลงไปในขวดรูป ชมพู่) ภายหลังเย้าแล้วนำน้ำเสียสังเคราะห์ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง ICP-OES

### 2.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นโลหะหนักต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

เตรียมขวดรูปชมพู่ 4 ใบ แต่ละใบให้ใส่ตัวดูดซับก้านบอนลงไป 1 กรัม จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว ความเข้มข้น 20.630, 29.810, 40.320 และ 50.820 มก./ลิตร ลงไปปริมาตร 100 มิลลิลิตรตามลำดับ นำไปเย้าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ภายหลังเย้าแล้ว ให้เก็บตัวอย่างใส่ในหลอดทดลองและทำการหมวนเหวี่ยงจนเกิดการ แยกชั้นของสารละลายใสและผงตัวอย่าง เลือกเฉพาะส่วนสารละลายใสไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง ICP-OES

ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนผงตัวอย่างก้านบอนเป็นไบบอนและให้ใช้เวลาในการเย้า 120 นาที

### 2.3.4 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

นำน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 50.820 มก./ลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ 4 ใบ ใบละ 100 มิลลิลิตร ทำการปรับ pH ด้วย 1M HCl และ 1M NaOH ให้มีค่า pH 1, 4, 7 และ 10 ตามลำดับ จากนั้นชั่งตัวอย่างก้านบอนน้ำหนัก 1.0 กรัมใส่ไปในขวดรูปชมพู่ทั้ง 4 ใบ นำไปเย้าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ เป็นเวลา 5 นาที นำตัวอย่างไปใส่ในหลอดทดลองและทำการหมวนเหวี่ยงจนเกิดการแยก ชั้นของสารละลายใสและผงตัวอย่าง เลือกเฉพาะส่วนสารละลายใสไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง ICP-OES

ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนผงตัวอย่างก้านบอนเป็นไบบอนและให้ใช้เวลาในการเย้า 120 นาที

### 2.3.5 การศึกษาการล้างตัวดูดซับและประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่

นำตัวดูดซับก้านบอนซึ่งผ่านการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว ความเข้มข้น 9.619 มก./ลิตร จากข้อ 2.3.2 มาล้างด้วย สารละลายเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิเตด (EDTA) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โดยนำไปเย้าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที ภายหลังเย้าตัวอย่างแล้วนำตัวอย่างไปใส่ในหลอดทดลองและทำการหมวนเหวี่ยงจน เกิดการแยกชั้นของสารละลายใสและผงตัวอย่าง นำส่วนสารละลายใสไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง ICP-OES ค่าที่วัดได้เป็นปริมาณ โลหะหนักตะกั่วที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ ทำการศึกษาสมดุลของปริมาณ โลหะหนักตะกั่ว (ปริมาณโลหะหนักตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ภายหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับ + ปริมาณโลหะหนักตะกั่วที่หลุดออกจากตัว ดูดซับภายหลังการล้างด้วย 0.5 M EDTA = ปริมาณโลหะหนักที่มีในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนดูดซับ)

นำส่วนผงตัวอย่างก้านบอนที่แยกได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 – 90 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปศึกษาต่อ โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ ให้นำผงตัวอย่างก้านบอนที่อบแล้ว 0.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าความเข้มข้น 9.619 มก./ลิตรลงไปปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ภายหลังเขย่าตัวอย่างแล้วนำตัวอย่างไปใส่ในหลอดทดลองและทำการหมุนเหวี่ยงจนเกิดการแยกชั้นของสารละลายใสและผงตัวอย่าง เลือกลงเฉพาะส่วนสารละลายใสไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง ICP-OES ค่าที่ได้คือ  $C_0$  ของ Reuse – ก้านบอน

ทำการทดลองด้วยวิธีการเดียวกันอีกครั้ง โดยเปลี่ยนตัวดูดซับจากผงก้านบอนเป็นผงไบบอนและให้ใช้เวลาในการเขย่า 120 นาที สำหรับการศึกษาศักยภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับไบบอน (Reuse – ไบบอน)

### 2.3.6 การยืนยันผลการดูดซับโลหะหนัก

ภายหลังการดูดซับโลหะหนัก นำตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดมาตรวจสอบธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS เพื่อยืนยันผลการดูดซับโลหะหนักว่าการดูดซับเกิดได้จริงหรือไม่ โดยหากการดูดซับโลหะหนักที่ก่อเกิดขึ้นจริง ข้อมูลใน EDS spectrum จะต้องปรากฏธาตุโลหะหนักที่ก่อเกิดเป็นธาตุองค์ประกอบร่วมกับธาตุอื่นๆในตัวดูดซับด้วย

### 2.3.7 การศึกษารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะหนักที่ก่อเกิด ศึกษาโดยเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ในสารละลายโลหะหนักที่ก่อเกิดมีความเข้มข้น 30 – 50 มก/ก ซึ่งไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชจะใช้ในการอธิบายรูปแบบการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับและตัวดูดซับหลังจากเข้าสู่จุดสมดุลแล้ว โดยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์จะใช้ยืนยันผลของการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ขณะที่ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชจะใช้ยืนยันผลของการเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น

## 2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

คำนวณความสามารถในการดูดซับจากร้อยละการดูดซับโลหะหนักโดยใช้สมการที่ (1) และความจุของโลหะหนักบนตัวดูดซับที่ใช้สมการที่ (2) ดังนี้

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

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

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น (มก./ลิตร)  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักที่สมดุล (มก./ลิตร)  $q_e$  คือ ความจุของโลหะหนักบนตัวดูดซับ (มก./กรัม)  $V$  คือ ปริมาตรสารละลายโลหะหนัก (ลิตร) และ  $w$  คือ ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

การหารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับ ทำได้โดยการคำนวณโดยใช้สมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช (สมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ) เมื่อไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ตั้งอยู่บนสมมติฐานคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนผิวของวัสดุดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ขณะที่ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่ามีผิวของวัสดุดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะขรุขระ พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุดูดซับ

ต่อสารถูกดูดซับเกิดไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว ทำให้ระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัดและทำให้เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) [11]

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

$$\text{Log } q_e = 1/n \log C_e + \log K_F \quad (4)$$

เมื่อ  $q_{\max}$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มก./กรัม) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว  $K_L$  คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตร/มก.)  $K_F$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (มก./กรัม) และ  $n$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

### 3. ผลการวิจัย

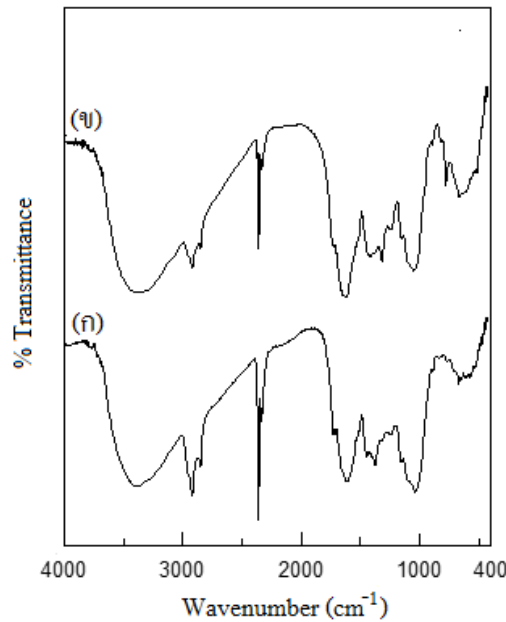
#### 3.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

สเปกตรัม FTIR ของตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าพีคที่ปรากฏมีลักษณะเหมือนกันทั้งก้านบอน (รูปที่ 2(ก)) และใบบอน (รูปที่ 2(ข)) จากสเปกตรัมสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้ (1). พีคกว้าง (Broad peak) ที่ตำแหน่ง  $\sim 3300 - 3500 \text{ cm}^{-1}$  บ่งชี้ว่าเป็น  $-\text{OH}$  และ  $-\text{NH}$  stretching ของคาร์โบไฮเดรต, วัสดุผนังพืช (Cell wall material) และโปรตีน (2). พีคที่ตำแหน่ง  $\sim 2500 \text{ cm}^{-1}$  บ่งชี้  $-\text{CH}$  asymmetric stretching ใน  $\text{CH}_3$  และ  $\text{CH}_2$  (3). พีคที่ตำแหน่ง  $\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$  บ่งชี้ว่าเป็นพีคของคาร์บอนิลซึ่งเป็นสารประกอบของเอสเทอร์ (ester) และคีโตน (Ketone) ที่พบได้ในเนื้อเยื่อพืช แพคตินและแทนนิน (4). พีคที่ตำแหน่ง  $\sim 1700$  และ  $\sim 1500 \text{ cm}^{-1}$  เป็นเอไมด์ 1 แบนด์ คือ  $\text{C}=\text{O}$  stretching, เอไมด์ 2 แบนด์ คือ  $\text{N}-\text{H}$  bending และ  $\text{C}-\text{N}$  stretching ตามลำดับ (5). พีคที่ตำแหน่ง  $\sim 1500 - 1400 \text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคขนาดเล็กซึ่งบ่งชี้  $\text{C}-\text{O}$  stretching ในคาร์บอกซิเลตไอออน (Carboxylate ion;  $-\text{COO}^-$ ) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของแพคติน (6). พีคที่ตำแหน่ง  $\sim 1400 - 1300 \text{ cm}^{-1}$  เป็น symmetric  $\text{CH}_3$  bending ในโปรตีนและเซลลูโลส (7). พีคที่ตำแหน่ง  $\sim 1000 \text{ cm}^{-1}$  บ่งชี้  $\text{CO}$  stretching ของไฮดรอกซิล อีเทอร์ หรือเอสเทอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของผนังพืช เช่น คาร์โบไฮเดรต ประเภทเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส [12]

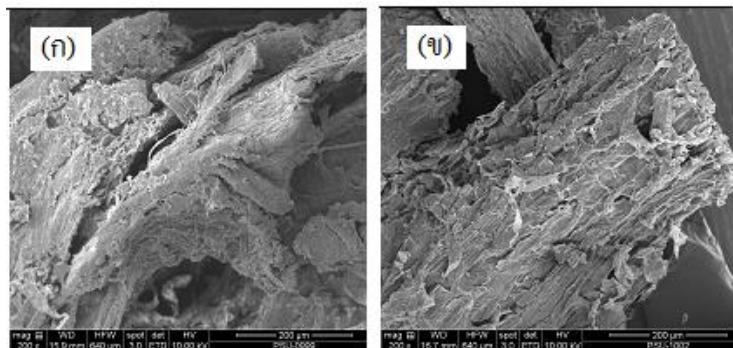
จากผลการวิจัยพบว่า ทั้งก้านบอนและใบบอนมีองค์ประกอบสำคัญของเซลลูโลส แพคติน และแทนนิน ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้มีการค้นพบแล้วว่าสามารถจับกับโลหะหนักได้ ดังนั้นพืชประเภทบอนจึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำ

#### 3.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

พื้นผิวของตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดจากภาพถ่าย SEM มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยพื้นผิวของตัวอย่างก้านบอน (รูปที่ 3(ก)) และใบบอน (รูปที่ 3(ข)) ประกอบด้วยเกรนที่เป็นแผ่นและมีรูพรุน เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพื้นผิวของก้านบอนจะมีความเรียบและมีรูพรุนมากกว่าพื้นผิวของใบบอน จึงมีความเป็นไปได้ว่าก้านบอนจะมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าใบบอน ลักษณะพื้นผิวเป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้การดูดซับตะกั่วเกิดได้ดีขึ้น ขณะที่ปัจจัยหลักของการดูดซับตะกั่วเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลเซลลูโลส แพคติน และแทนนินกับโลหะหนักตะกั่ว หากปริมาณเซลลูโลส แพคติน และแทนนินมีมากก็จะทำให้การดูดซับตะกั่วดีขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2 สเปกตรัม FTIR ของ (ก) ก้านบอน และ (ข) ไบบอน



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง (ก) ก้านบอน และ (ข) ไบบอน

### 3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับก้านบอนและไบบอน

ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วของตัวดูดซับก้านบอนและไบบอนได้กำหนดศึกษาปัจจัยสำคัญ 4 ปัจจัย คือ ผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนัก ผลของความเข้มข้นสารละลายโลหะหนัก ผลของพีเอชของสารละลายโลหะหนัก และรูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนัก มีผลการวิจัยแสดงไว้ดังนี้

#### 3.3.1 การตรวจสอบความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลของการตรวจสอบความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES และการเปรียบเทียบค่าร้อยละของความถูกต้อง ระหว่างความเข้มข้นตะกั่วที่ต้องการกับความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้ แสดงในตารางที่ 2

ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ที่ต้องการ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./ลิตร แต่การเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์โดยการเจือจางจาก stock solution ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร (1 mM Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> มี Pb(II) 207.2 มก./ลิตร) ทำให้ได้ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ที่ 1 – 5 เท่ากับ 9.619, 20.630, 29.810, 40.320 และ 50.820 มก./ลิตร ตามลำดับ ซึ่งการเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีความถูกต้อง >90 % โดยความถูกต้องของการเตรียมน้ำเสียดังเคราะห์ตะกั่วทั้ง 5 ความเข้มข้นมีค่าระหว่าง 96.19 – 99.37 % ดังนั้น ค่าที่เตรียมได้จริงนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วของก้านบอนและไบบอน และปริมาณโลหะตะกั่วบนตัวดูดซับ (Q<sub>c</sub>; mg/g) ของก้านบอนและไบบอนต่อไป

**ตารางที่ 2** ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ที่เตรียมโดยการเจือจางจาก stock solution ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร

ที่	ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ที่ต้องการ (มก./ลิตร)	ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ที่เตรียมได้ (มก./ลิตร)	% ความถูกต้อง
1	10	9.619	96.19
2	20	20.630	96.85
3	30	29.810	99.37
4	40	40.320	99.20
5	50	50.820	98.40

### 3.3.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนัก

ผลการศึกษาด้านเวลาที่ใช้ในการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับก้านบอนและไบบอน ได้แสดงในรูปที่ 5 พบว่า ก้านบอนสามารถดูดซับตะกั่วได้ที่เวลา 5 นาที และมีค่าร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเท่ากับ 90.72 ขณะที่ไบบอนสามารถดูดซับตะกั่วได้โดยใช้เวลาในการดูดซับ 120 นาทีและมีค่าร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเท่ากับ 79.27

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลอง โดยทำการทดลอง 1 ครั้ง และทำการวัดโลหะหนักตะกั่วด้วยเครื่อง ICP-OES จำนวน 3 ครั้ง ค่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วที่ได้จึงเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่า C<sub>c</sub> (มก./ลิตร) เฉลี่ยจากการวัดด้วย ICP-OES (ค่า C<sub>c</sub> ของก้านบอน ณ เวลา 5 นาที เท่ากับ 0.893 มก./ลิตร, S.D. = 0.0084 มก./ลิตร และค่า C<sub>c</sub> ของไบบอน ณ เวลา 120 นาที เท่ากับ 1.994 มก./ลิตร, S.D. = 0.0243 มก./ลิตร)

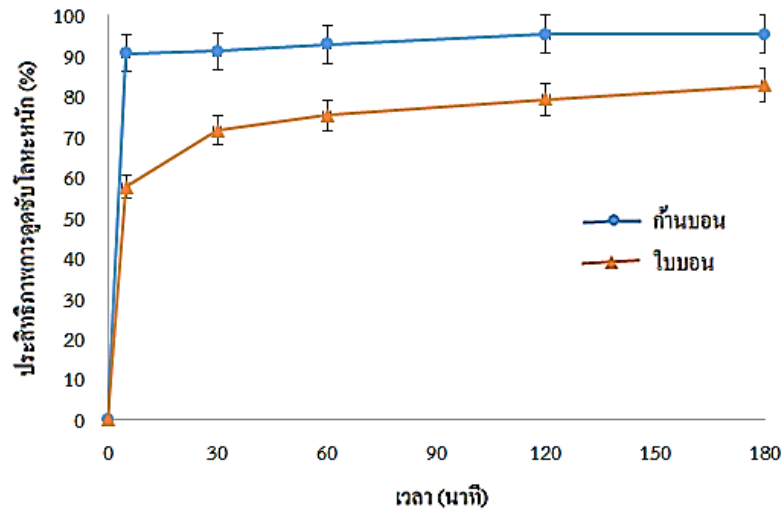
### 3.3.3 ผลของการทดลองควบคุม เพื่อศึกษาปริมาณโลหะหนักที่หายไป

เมื่อเติมตัวดูดซับลงไปในน้ำเสียดังเคราะห์ตะกั่ว มีผลทำให้ความเข้มข้นโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์ลดลง เนื่องจากเกิดการดูดซับโลหะหนักตะกั่วบนตัวดูดซับก้านบอนและไบบอน โดยผลที่ได้จากการศึกษาในข้อ 3.3.2 แสดงให้เห็นว่า ก้านบอนสามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่วได้ดีกว่าไบบอน

อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียดังเคราะห์มีโอกาสหายไปก่อนการดูดซับด้วย โดยอาจเกิดการยึดติดกับขวดรูปชมพู่ซึ่งเป็นภาชนะบรรจุ จากการทดลองควบคุม (C<sub>0</sub> = 9.619 มก./ลิตร) แสดงให้เห็นปริมาณโลหะหนักที่หายไประหว่างการทดลอง ดังตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มเวลาเขย่ามีผลทำให้น้ำหนักของโลหะหนักตะกั่วในน้ำถูกยึดติดกับภาชนะบรรจุได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณโลหะหนักตะกั่วที่หายไปก็มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และปริมาณโลหะหนักที่ถูกยึดติดกับภาชนะ



บรรจุก็มีโอกาสหลุดออกมาเช่นกัน โดยที่เวลาเขย่า 5 นาที โลหะหนักตะกั่วมีโอกาสหายไป 0.65 % (ปริมาณโลหะหนักตะกั่วที่มีอยู่ เท่ากับ 99.35 %) ขณะที่ เวลาเขย่า 120 นาที ทำให้โลหะหนักตะกั่วมีโอกาสหายไป 3.42 % (ปริมาณโลหะหนักตะกั่วที่มีอยู่ เท่ากับ 96.58 %)



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วของก้านบอนและไบบอน

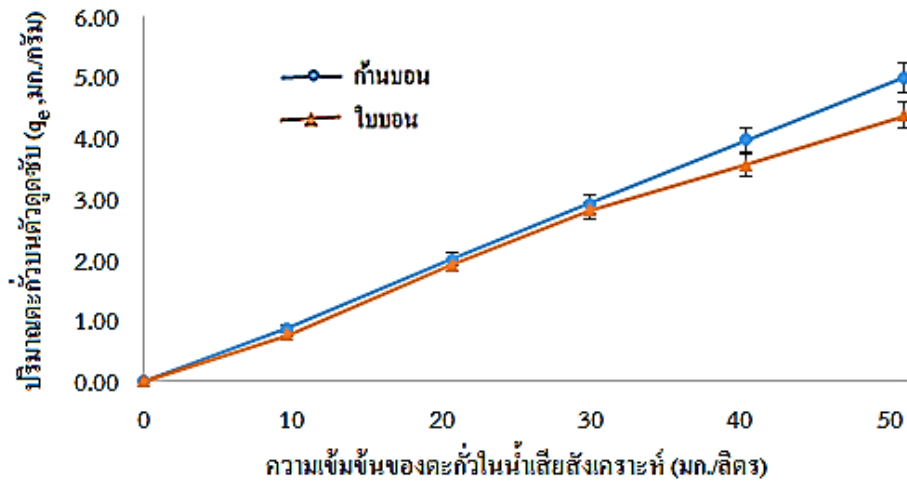
ตารางที่ 3 ปริมาณโลหะหนักที่หายไป ( $C_0 = 9.619$  มก./ลิตร)

เวลาเขย่า (นาที)	$C_t$ (มก./ลิตร)	% โลหะหนักที่มีอยู่	% โลหะหนักที่หายไป
5	9.556	99.35%	0.65%
30	9.127	94.86%	5.14%
60	9.213	95.78%	4.22%
120	9.290	96.58%	3.42%
180	8.791	91.39%	8.61%

### 3.3.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย ได้ศึกษาโดยใช้สารละลายโลหะหนักตะกั่วที่มีความเข้มข้น ตั้งแต่ 9.619 – 50.820 มก./ลิตร และใช้เวลาเขย่าเป็นเวลาที่มีความเข้มข้น โลหะหนักสมมูล ( $C_0$ ) พบว่า ในตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดได้แก่ก้านบอนและไบบอนให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นปริมาณโลหะหนักตะกั่วบนตัวดูดซับ ( $q_e$ ) จะเพิ่มขึ้น ดังผลที่แสดงในรูปที่ 5 ค่า  $q_e$  ที่ในก้านบอน อยู่ในช่วง 0.8726 – 4.9992 มก./กรัม ขณะที่ไบบอนมีค่า  $q_e$  อยู่ในช่วง 0.7625 – 4.3732 มก./กรัม เมื่อเปรียบเทียบค่า  $q_e$  ของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดพบว่าก้านบอนมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วมากกว่าไบบอน แต่อย่างไรก็ตามค่าการดูดซับของก้านบอนก็ไม่ถือว่าแตกต่างจากไบบอนมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดเป็นพีชชนิด

เดียวกันและมืองค์ประกอบหลักของเซลลูโลส แพลกติน และเทนินเหมือนกัน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะทำหน้าที่สร้างสารเชิงซ้อนกับโลหะตะกั่ว จึงทำให้ตัวดูดซับของก้านบอนและไบบอนสามารถกำจัดโลหะหนักตะกั่วในน้ำได้



รูปที่ 5 ปริมาณโลหะหนักตะกั่วบนตัวดูดซับ (q<sub>e</sub>) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

### 3.3.5 ผลของพีเอชของสารละลายโลหะต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

การศึกษาผลของ pH ของสารละลายโลหะตะกั่ว ได้ศึกษาโดยใช้สารละลายโลหะตะกั่วที่ความเข้มข้น 50.820 มก./กรัม ทำการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 1 – 13 ด้วยสารละลายเจือจางกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4) ตัวดูดซับก้านบอนและก้านบอนสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่ pH ในช่วง pH 1-10 โดยค่า pH ที่ทำให้ก้านบอนดูดซับตะกั่วดีที่สุดคือ pH 4 ขณะที่ไบบอนสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุดที่ pH 7

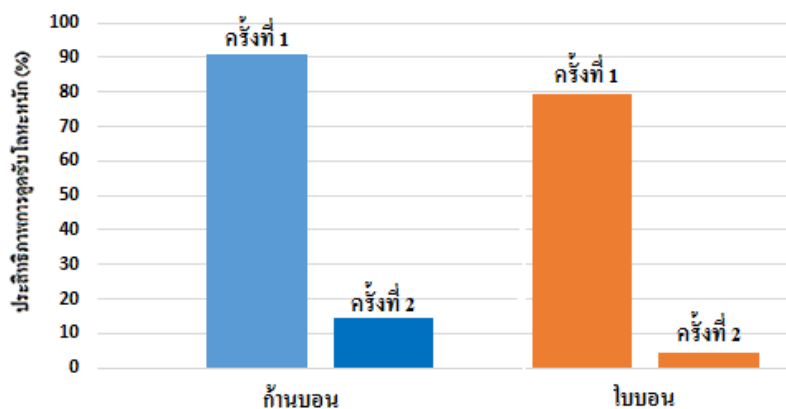
ตารางที่ 4 ปริมาณโลหะตะกั่วบนตัวดูดซับ (Q<sub>e</sub>; mg/g) ที่ pH 1 – 13 ของก้านบอนและไบบอน

pH	q <sub>e</sub> (mg/g) Pb(II)	
	ก้านบอน	ไบบอน
1	4.9013	4.4485
4	4.9992	4.3732
7	4.9353	4.8713
10	4.9307	4.5727
13	4.1086	4.0210

### 3.3.6 การศึกษาสมมูลของปริมาณโลหะหนักตะกั่วและประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ

การศึกษาสมมูลของปริมาณโลหะหนักตะกั่ว หมายถึงการตรวจสอบผลรวมของปริมาณโลหะหนักตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ภายหลังกการดูดซับด้วยตัวดูดซับ กับ ปริมาณโลหะหนักตะกั่วที่หลุดออกจากตัวดูดซับภายหลังกการล้างด้วย 0.5 M EDTA โดยผลรวมทั้งก่่าควรมีค่าเท่ากับปริมาณโลหะหนักที่มีในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนดูดซับ

ที่ความเข้มข้น 9.619 มก./ลิตร ก้านบอนมี ปริมาณโลหะหนักตะกั่วในน้ำ 0.893 มก./ลิตร โดยปริมาณตะกั่วที่เหลือถูกดูดซับโดยก้านบอน เมื่อล้างก้านบอนด้วย 0.5 M EDTA พบว่ามีปริมาณตะกั่วในน้ำ 1.064 มก./ลิตร ดังนั้นปริมาณโลหะหนักตะกั่วจึงไม่เป็นไปตามทฤษฎี ( $0.893 \text{ มก./ลิตร} + 1.064 \text{ มก./ลิตร} \neq 9.619 \text{ มก./ลิตร}$ ) ลักษณะเดียนี้ยังพบในไบบอนด้วย เมื่อปริมาณโลหะหนักตะกั่วในน้ำครั้งที่ 1 ( $C_0$ ) มี 1.994 มก./ลิตร และมี 2.251 มก./ลิตร ภายหลังกการล้างด้วย 0.5 M EDTA ( $1.994 \text{ มก./ลิตร} + 2.251 \text{ มก./ลิตร} \neq 9.619 \text{ มก./ลิตร}$ ) เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก โลหะหนักที่เกาะอยู่บนตัวดูดซับก้านบอนและไบบอนไม่สามารถหลุดออกมาได้ทั้งหมด แม้ทำการล้างด้วยตัวทำละลาย EDTA ก็ตาม ทั้งนี้สามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ (รูปที่ 6) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า การนำก้านบอนและไบบอนกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 2 มีผลทำให้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักตะกั่วลดลง เนื่องจาก พื้นผิวที่ว่างมีน้อยเพราะมีโลหะหนักตะกั่วปริมาณมากถูกดูดซับไว้บนพื้นผิว (หากพื้นผิวของตัวดูดซับไม่มีโลหะหนักตะกั่วเกาะติดอยู่ ค่า  $C_0$  ในครั้งที่ 2 ควรมีค่าใกล้เคียง 0.893 มก./ลิตร สำหรับก้านบอน และมีค่าใกล้เคียง 1.994 มก./ลิตร สำหรับไบบอน) จากการวิจัยในครั้งนี้ พบว่า ค่าร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของก้านบอนและไบบอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 2 เท่ากับ 14.52 ( $C_0 = 8.222 \text{ มก./ลิตร}$ , S.D. = 0.0470) และ 4.50 ( $C_0 = 9.186 \text{ มก./ลิตร}$ , S.D. = 0.0361) ตามลำดับ

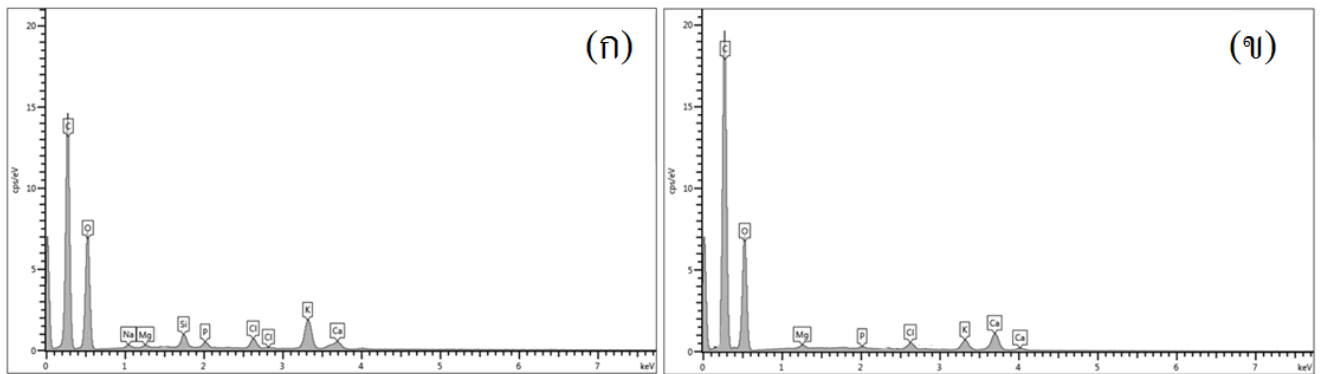


รูปที่ 6 ค่าร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วของก้านบอนและไบบอนที่นำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 2 เปรียบเทียบกับครั้งที่ 1

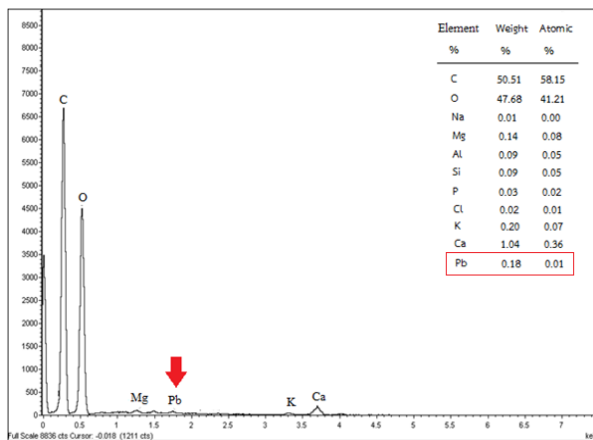
### 3.3.7 การหาค่าประกอบของธาตุและการยืนยันผลของการดูดซับโลหะหนักด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างก้านบอนและไบบอน ด้วยเทคนิค EDS แสดงผลสเปกตรัมในรูปที่ 7 พบว่า ก้านบอนและไบบอนมีธาตุที่มีปริมาณมาก 2 ธาตุ คือ ธาตุ C และ O ในขณะที่มีธาตุที่มีปริมาณน้อยอยู่ 9 ธาตุสำหรับก้านบอน ได้แก่ K, Si, Ca, Cl, P, Na, Al, Mg และ S ไบบอนมีธาตุปริมาณน้อยอยู่ และมีธาตุที่มีปริมาณน้อยมากอยู่ 6 ธาตุสำหรับไบบอน ได้แก่ K, Ca, Cl, P, และ S

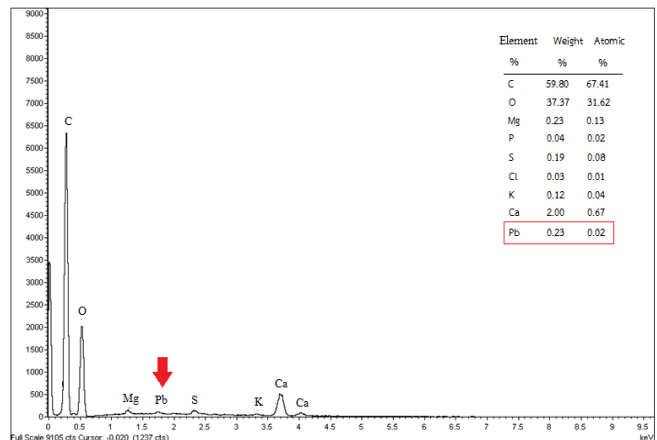
เมื่อนำตัวดูดซับก้านบอนและไบบอนภายหลังทำการทดลองดูดซับโลหะหนักตะกั่วแล้ว มาทดสอบด้วยเทคนิค EDS เพื่อขึ้นชั้นผลความสามารถในการดูดซับโลหะตะกั่ว พบว่า สเปกตรัม EDS แสดงพีกของตะกั่วทั้งในตัวดูดซับก้านบอน (รูปที่ 8) และไบบอน (รูปที่ 9) โดยปริมาณตะกั่วพบในก้านบอนร้อยละ 0.18 โดยน้ำหนัก ขณะที่พบร้อยละ 0.24 โดยน้ำหนักในตัวดูดซับไบบอน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ EDS นี้เป็นเพียงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพที่สามารถระบุชนิดธาตุองค์ประกอบได้อย่างถูกต้องเท่านั้นแต่ในส่วนของปริมาณที่บ่งชี้ขึ้นเป็นเพียงปริมาณธาตุองค์ประกอบ ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่งที่ทดสอบซึ่งไม่ใช่ปริมาณธาตุทั้งหมด (ทุกบริเวณ) ที่มีในตัวอย่าง



รูปที่ 7 สเปกตรัม EDS ของ (ก) ก้านบอน และ (ข) ไบบอน



รูปที่ 8 สเปกตรัม EDS ของก้านบอนภายหลังดูดซับตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มก/ก



รูปที่ 9 สเปกตรัม EDS ของก้านบอนภายหลังดูดซับตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มก/ก

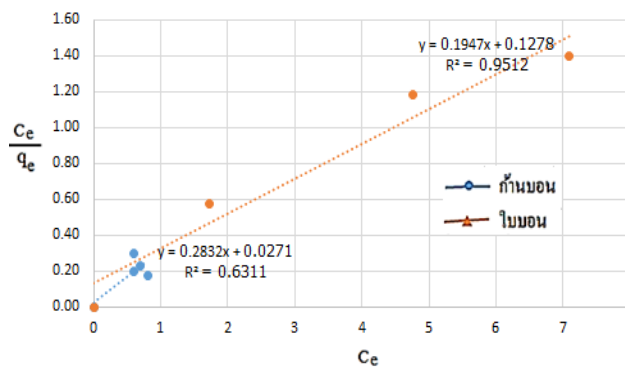
### 3.3.8 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับ

การศึกษาในรูปแบบไอโซเทอรั่มการดูดซับโลหะตะกั่วของตัวดูดซับก้านบอนและไบบอนที่ความเข้มข้นโลหะหนักตะกั่ว 30 – 50 มก/ก แสดงผลดังตารางที่ 5 ตัวดูดซับก้านบอนและไบบอน ได้คำนวณหาค่า  $q_m$  และ  $K_L$  จากกราฟสมการแลงเมียร์ในรูปที่ 10 และคำนวณหาค่า  $n$  และ  $K_F$  จากกราฟสมการฟรุนดลิชในรูปที่ 11

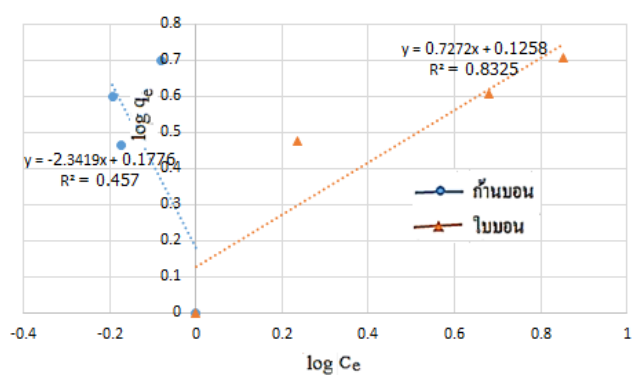
การดูดซับโลหะตะกั่วของก้านบอนและไบบอนเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ เนื่องจากค่า  $R^2_{(แลงเมียร์)} > R^2_{(ฟลูนดิลิช)}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการดูดซับโลหะหนักตะกั่วของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยค่าต่างๆ ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบไอโซเทอมของการดูดซับโลหะตะกั่วของก้านบอนและไบบอน

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟลูนดิลิช		
	$q_m$	$K_L$	$R^2$	$n$	$K_F$	$R^2$
ก้านบอน	36.90	3.53	0.6311	0.43	1.19	0.4570
ไบบอน	7.82	5.14	0.9512	1.38	1.13	0.8325



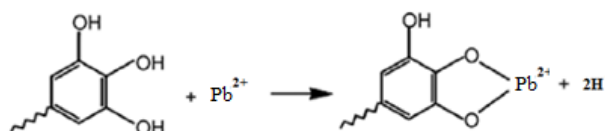
รูปที่ 10 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับก้านบอนและไบบอน



รูปที่ 11 ไอโซเทอมแบบฟลูนดิลิชของการดูดซับตะกั่วของตัวดูดซับก้านบอนและไบบอน

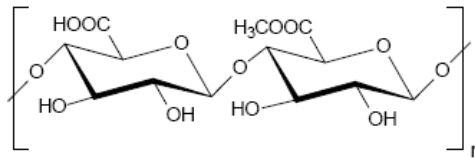
#### 4. การอภิปรายผลการวิจัย

ความสามารถในการดูดซับโลหะตะกั่วของตัวดูดซับก้านบอนและไบบอน เกิดความสามารถในการรวมตัวกับโลหะตะกั่วเป็นสารเชิงซ้อนของโมเลกุลแพคติน แทนนิน และเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในตัวดูดซับธรรมชาติไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปทางเคมี เซลลูโลสมีความสามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้ดี โดยโลหะตะกั่วจะถูกดูดซับได้มากที่สุดที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอกซิล [13 – 15] แทนนิน ในขณะที่แทนนินก็สามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้เช่นกัน โดยเกิดจากการฟอร์มสารเชิงซ้อนกับโลหะตะกั่วที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิล [16] ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การดูดซับโลหะหนักที่เกิดจากโครงสร้างของแทนนินสร้างพันธะกับโลหะ [16]

แพคติน เป็น โพลีเมอร์สายยาวของกรดคาร์แลกทูโรนิก (D-galacturonic acid) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง  $\alpha(1-4)$  โดยโมเลกุลแพคตินสามารถจับกับโลหะตะกั่วได้ที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันน้ำตาล 4 หมู่ ของคาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล เอไมด์ และเมทอกซิล ดังนั้นหากตัวดูดซับมีโมเลกุลแพคตินเป็นองค์ประกอบก็จะช่วยส่งเสริมให้การดูดซับโลหะตะกั่วเกิดได้ดียิ่งขึ้น [17] โครงสร้างของแพคตินแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 โครงสร้างของแพคติน [17]

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักตะกั่วของก้านบอนและใบบอนจากงานวิจัยนี้ พบว่า ก้านบอนและใบบอนมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับ ตัวดูดซับแคโรทแห่ง [18] เบเกอร์ ยีสต์ [19] เปลือกอัลมอนต์ [20] เปลือกหัวไชเท้า [21] และถ่านที่ได้จากเปลือกพืช [22] แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดซับตะกั่วของก้านบอนและใบบอนยังคงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับผงแห้งของต้นมะกอก [23]

ตารางที่ 6 ปริมาณโลหะบนตัวดูดซับ ( $q_m$ ) ของตัวดูดซับต่างๆ ที่มีรูปแบบการดูดซับเป็นแบบไอโซเทอมแลงเมียร์

$q_m$ (mg/g)	Adsorbents	References
0.52	Powder of dried carrot residues	(S. Ata, et al., 2012)
0.31	Baker's yeast biomass	(A.H. Sulaymon, et al., 2010)
46.20	Powder of dried olive tree pruning waste	(O.Uzunosmanoglu, et al., 2011)
8.13	Almond shells	(J. Anwar et al., 2009)
1.23	Powder of dried radish peels	(J. Anwar et al., 2009)
2.90	Activated biocarbon	(M. Singanan., 2011)

## 6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำโดยใช้ต้นบอนเป็นตัวดูดซับในครั้งนี้ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ 9.619 มก./ลิตร ของก้านบอน (90.72 %) > ใบบอน (79.27%) โดยค่าการดูดซับโลหะบนตัวดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะตะกั่ว การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ แสดงให้เห็นว่า การดูดซับโลหะตะกั่วของก้านบอนและใบบอนเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวดูดซับของบอนจากงานวิจัยนี้สามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้ดี จึงมีความน่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่ได้มอบทุนวิจัยจากงบประมาณบำรุงการศึกษา ปี พ.ศ. 2561 (เลขที่ทุน ควท.บคส. 23 / 2561) เพื่อสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Pollution control department. *Report of Thailand's pollution situation: water quality in each region*. Bangkok.Ministry of Natural Resources and Environment. (in thai)., 2017
- [2] Kerdcry, S., & chaninmanu, S. *Report - Heavy metal toxicity*. Phayao: Phayao provincial public health office. (in thai)., 2004
- [3] Nambang, W. *Report - Distribution of heavy metals in rice field around the landfill pond (case study of tumbon Wangnumkoo, Muang, Phitsanulok)*. Phitsanulok: Naresuan university. (in thai)., 2014
- [4] Phaphromphuek, P. Adsorption and waste water treatment. *MSU research digest*, 3, 51 – 57. (in thai)., 2016
- [5] Dana, E. Adsorption of heavy metals on functionalized- mesoporous silica: A review. *Microporous and Mesoporous Material*, 2017, 247, 145 – 157.
- [6] Wang, F., Pan, Y., Cai, P., Guo, T., & Xiao, H. Single and binary adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions using sugarcane cellulose-based adsorbent. *Bioresource Technology*, 2017, 241, 482 – 490.
- [7] Lina, S., Lianb, C., Xua, M., Zhanga, W., Liua, L., & Lin, K. Study on competitive adsorption mechanism among oxyacid-type heavy metals in co-existing system: Removal of aqueous As(V), Cr(III) and As(III) using magnetic iron oxide nanoparticles (MIONPs) as adsorbents. *Applied Surface Science*, 2017, 422, 675 – 681.
- [8] Rath, S.S., Singh, S., Rao, D.S., Nayak, B.B., & Mishra, B.K. Adsorption of heavy metals on a complex Al-Si-O bearing mineral system: Insights from theory and experiments. *Separation and Purification Technology*, 2017, 186, 28 – 38.
- [9] Peng, W., Li, H., Liu, Y., & Song, S. A review on heavy metal ions adsorption from water by graphene oxide and its composites. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 230, 496 – 504.
- [10] Franco, F., Benitez- Guerrero, M., Gonzalez- Trivino, I., Perez- Recuerda, R., Assiego, C., Cifuentes- Melchor, J., & Pascual- Cosp, J. Low-cost aluminum and iron oxides supported on dioctahedral and trioctahedral smectites: A comparative study of the effectiveness on the heavy metal adsorption from water. *Applied Clay Science*, 2016, 119, 321 – 332.
- [11] Phalathip, P. *Thesis - the adsorption of heavy metal using modified synthetic fiber*. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology. (in thai)., 2016
- [12] Deng, P. Y., Liu, W., Zeng, B. Q., Qiu, Y. K., & Li, L. S. Sorption of heavy metals from aqueous solution by dehydrated powders of aquatic plants. *International Journal of Environment Science and Technology*, 2013, 10, 559 – 566.
- [13] Dokbua, J., Phasuk, S., & Tundulawessa, Y. Effecticiency of cellulose phosphate from straw and bagasse for adsorption lead and cadmium in waste water. *Journal of graduate studies valaya alongkron rajabhat university*, 2008, 2, 1 – 8. (in thai)
- [14] Dupont M, F., Gloaguen, V., Guilloton, M., Granet, R., & Krausz, P. 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*, 2006, 41(2), 149 – 60.
- [15] Narawong, W. & Panya, P. Preparation of Cellulose from Water Hyacinth Leave to Adsorb Cr (VI) Ion. *In Proceedings of 4rd Research institute of Kamphaeng Phet Rajabhat University annual conference*. Thailand. Kamphaeng Phet Rajabhat University. (in thai)., 2017 pp. 957 – 966.
- [16] Ramkul, P. Innovation of tannin adsorbent for removing metal from solution. *Kasetsart Engineering Journal*, 2010, 72, 17 – 29. (in thai).

- [17] Hastuti, B., Mudasir, D., Siswanta, , & Triyono. Biosorption of Pb(II) Ion by Crosslinked Pectin- CMC with BADGE ( Bisphenol A Diglycidyl Ether) through Reflux Method. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2015, 6, 77 – 82.
- [18] Ata, S., Wattoo, F. H., Sidra, L. R., Wattoo, M. H. S., Tirmizi, S. A., & Din, I. Biosorptive removal of lead and cadmium ions from aqueous solution: The use of carrot residues as low cost no-conventional adsorbent. *Turkish Journal of Biochemistry*, 2012, 37, 272 – 279.
- [19] Sulaymon, A. H., Ebrahim, S. E., Al-Musawi, T. J., & Abdullah, S. M. Removal of lead, cadmium, and mercury ions using biosorption. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2010, 11, 1 – 13.
- [20] Mehrasbi, M. R., Farahmandkia, Z., Taghibeibloo, B., & Taromi, A. Adsorption of lead and cadmium from aqueous solution by using almond shells. *Water Air and Soil Pollution*, 2009, 199, 343 – 351.
- [21] Anwar, J., Shafique, U., Waheed-uz-Zaman, M. S., & Memoona, M. Adsorption study of cadmium (II) and lead (II) on radish peels. *Journal of Scientific Research*, 2009, 39, 29 – 34.
- [22] Singanan, M. Removal of lead(II) and cadmium(II) ions from wastewater using activatedbiocarbon. *Science Asia*, 2011, 37, 115 – 119.
- [23] Uzunomanoglu, O., Uzanik, A., & Engin, M. S. The removal of cadmium(II), copper(II) and lead(II) from aqueous solutions by olive tree pruning waste. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2011, 20, 3135 – 3140.