

## การกำจัดโลหะหนักมีพิษในน้ำโดยใช้ผลิตภัณฑ์ธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ

### Removal of Toxic Heavy Metals in Water by Using Natural Products as Adsorbent

วรรณกัษมา ฮารอน<sup>1\*</sup>, อลภา ทองไชย<sup>2</sup>, อาอีเซาะส์ เบ็ญหาวัน<sup>1</sup> และ สุเนย์ แวมะ<sup>1</sup>

Wankassama Haron<sup>1\*</sup>, Alapa Thongchai<sup>2</sup>, Aeesoh Benhawan<sup>1</sup> and Sunee Waema<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

<sup>2</sup> สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

<sup>1</sup> Major of Chemistry, Faculty of Science Technology and agriculture, Yala Rajabhat University

<sup>2</sup> Major of Biology, Faculty of Science Technology and agriculture, Yala Rajabhat University

Received : 15 January 2019

Revised : 11 March 2019

Accepted : 3 April 2019

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการนำส่วนประกอบของต้นกล้วยน้ำว่า ได้แก่ กาบปลีกล้วย ลำต้นกล้วย ก้านกล้วย และเปลือกกล้วย มาใช้ในการดูดซับโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล ทองแดง แมงกานีส และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ บัณฑิตการดูดซับที่ศึกษาได้แก่ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลาย และค่าพีเอช นอกจากนี้แล้วยังได้ศึกษา รูปแบบของการดูดซับโลหะหนัก โดยเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มก./ลิตร ของโลหะ จากมากไปน้อยเป็นดังนี้คือ เปลือกกล้วย (91.50 – 98.43%) กาบปลีกล้วย (82.77 – 96.80%) ลำต้นกล้วย (77.40 – 96.73%) และ ก้านกล้วย (67.77 – 98.03%) ตามลำดับค่าการดูดซับโลหะบนตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย รูปแบบการดูดซับของ กาบปลีกล้วย ลำต้นกล้วย และเปลือกกล้วยสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ขณะที่ไอโซเทอร์มการดูดซับของก้าน กล้วยสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ตัวดูดซับจากงานวิจัยนี้สามารถดูดซับโลหะหนักได้ทุกชนิด จึงมีความน่าสนใจ ในการนำไปประยุกต์ใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

**คำสำคัญ** : โลหะหนัก, การดูดซับ, ต้นกล้วย

\*Corresponding author. E-mail : wankassama@gmail.com

### Abstract

The objective of this work was to investigate the bract, stem, midrib, and banana peel of cultivated banana as an adsorbent for the removal of five heavy metals which are Pb(II), Ni(II), Cu(II), Mn(II), and Zn(II) from synthetic wastewater. The adsorption factors studied were the contact time, concentration of solutions and pH. Moreover, we also compared the adsorption processes based on the Langmuir and Freundlich isotherms. The adsorption efficiency in 10 mg/L of heavy metals were found, from high to low efficiencies as follow: banana peel (91.50 – 98.43%), bract (82.77 – 96.80%), stem (77.40 – 96.73%), and midrib (67.77 – 98.03%), respectively. The adsorption capacity of M(II) ions on the adsorbents were proportional to the initial concentration of solutions. From this work, the adsorbents can be used to adsorb all kinds of these heavy metal ions, therefore, they might be applied for another wastewater treatment

**Keywords :** heavy metal, adsorption, banana tree

### บทนำ

ปัจจุบันภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ ของประเทศไทยกำลังประสบปัญหาน้ำปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งเป็นปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่ควรหาทางแก้ไขอย่างเร่งด่วน

จากรายงานสถานการณ์น้ำปนเปื้อนโลหะหนักรายภาคประจำปี พ.ศ. 2559 – มีนาคม พ.ศ.2560 ของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้ให้ข้อมูลคุณภาพน้ำรายภาคไว้พอสังเขปดังนี้ คุณภาพน้ำทางภาคเหนือ : พบโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ร้อยละ 1.7 ของพื้นที่ที่ตรวจวัด สัดส่วนของโลหะหนักที่เกินมาตรฐานได้แก่ สารหนู ร้อยละ 56, ตะกั่ว ร้อยละ 16, แมงกานีส ร้อยละ 12, แคดเมียม ร้อยละ 12, และปรอท ร้อยละ 4, คุณภาพน้ำทางภาคกลาง : พบปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ร้อยละ 0.4 ของการตรวจวัดทั้งหมด โดยพบสารหนู ปรอท และแมงกานีส มีสัดส่วนที่เกินมาตรฐานอยู่ร้อยละ 37, 29 และ 14 ตามลำดับ คุณภาพน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ : พบโลหะหนักเจือปนในน้ำร้อยละ 1.5 ของพื้นที่ที่สุ่มตรวจทั้งหมด โลหะหนักที่มีปริมาณเกินมาตรฐานมีอยู่ 5 ชนิด คือ สังกะสี ปรอท แมงกานีส แคดเมียม และอาร์เซนิก ทั้งนี้โลหะหนักทั้ง 5 ชนิดนี้มีสัดส่วนที่เกินมาตรฐานอยู่ร้อยละ 39, 32, 22, 14 และ 4% ตามลำดับ คุณภาพน้ำในภาคใต้ : พบว่าโลหะหนักเจือปนในน้ำปริมาณร้อยละ 0.6 ของพื้นที่ที่สุ่มตรวจวัดทั้งหมด โดยพบโลหะแมงกานีสมีปริมาณที่เกินสัดส่วนมาตรฐานอยู่ร้อยละ 50 ขณะที่พบโลหะสังกะสีและปรอท มีสัดส่วนเกินมาตรฐานอยู่อย่างละ ร้อยละ 25 จากการสำรวจคุณภาพน้ำรายภาค พบว่า มีเพียงภาคตะวันออกเฉียงเหนือในประเทศไทยที่มีคุณภาพน้ำตามมาตรฐานและไม่พบโลหะหนักในปริมาณที่เกินมาตรฐาน (Pollution control department, 2017)

พิษภัยของโลหะหนักที่เจือปนในน้ำมีมากมาย เช่น ทำให้อวัยวะต่างๆภายในร่างกายทำงานผิดปกติ ก่อเกิดโรคอันตราย เช่น โรคมินามาตะ โรควิลสัน และโรคคะเร็ง เป็นต้น เมื่อร่างกายรับโลหะหนักในปริมาณมาก จะทำให้เกิดอาการช็อกและเสียชีวิตในที่สุด ตัวอย่างพิษของโลหะหนัก สารหนู แคดเมียม ทองแดง สังกะสี แมงกานีส และตะกั่ว มีดังนี้ สารหนู มีผลทำลายระบบทางเดินอาหารและระบบประสาทส่วนกลาง การรับในปริมาณน้อยจะทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดศีรษะ และร่างกายเคลื่อนไหวช้าลง หากรับเข้าสู่ร่างกายปริมาณมากๆจะทำให้ผิวหนังกระดากกระด้างเป็นหย่อมๆ และเป็นมะเร็ง

ผิวหนัง แคลเซียม เมื่อสูดดมเข้าไปจะทำให้เป็นไข้ ไอ โลหะ และมีอาการเจ็บหน้าอก หากรับประทานเข้าไปจะทำให้เป็นนิ่ว เม็ดเลือดแดงถูกทำลาย กระดูกพรุน และไตวาย (Kerdcry & chaninmanu, 2004; Li *et al*, 2015; Umpuch *et al*, 2017) ทองแดง ทำให้เกิดการอักเสบในช่องท้องและท้องเสีย การรับทองแดงเข้าสู่ร่างกายมากเกินไปและรับติดต่อกันเป็นระยะเวลานานๆ จะทำให้เป็นโรควิลสัน คือร่างกายสันตลอดเวลา ไม่สามารถควบคุมการดูดได้ (Usanawarong, 2006) สังกะสี มีผลทำให้ท้องเดินและมีอาการปวดบริเวณลำคอและปาก แมงกานีส มีผลทำลายระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้มีอาการปวดกล้ามเนื้อ และเป็นอัมพาต ตะกั่ว ทำให้มีอาการปวดท้องและคลื่นไส้ อาเจียน (Pintawong *et al*, 2011) การรับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากๆ จะทำให้เป็นโรคโลหิตจางและเสียชีวิตในที่สุด (Adam, 2015; Chaibu & Chawanchai, 2007; Dubey *et al*, 2015; Kumtabtim & Siripinyanon, 2017; Nambang, 2014; Pengpean *et al*, 2013).

การกำจัดโลหะหนักในน้ำทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการตกตะกอนร่วมทางเคมี วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน วิธีการเวอร์สออสโมซิส วิธีการทางไฟฟ้าเคมี และวิธีดูดซับ เป็นต้น เมื่อพิจารณาต้นทุนในการดำเนินการ ถือได้ว่า การดูดซับเป็นวิธีที่ใช้งบประมาณลงทุนในกระบวนการบำบัดน้อยที่สุดอีกทั้งยังสามารถทำได้ง่ายที่สุด ควบคุมสภาวะได้ง่ายที่สุด และมีวิธีการไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับที่นำมาใช้เพื่อการบำบัดน้ำโดยวิธีการดูดซับ มีทั้งตัวดูดซับธรรมชาติ เช่น เปลือกมังคุด ถ่านกัมมันต์ และตัวดูดซับสังเคราะห์ที่เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการ เช่น ซีโอไลต์ (zeolite) และโลหะออกไซด์ (metal oxides) (Dana., 2017; Franco *et al*, 2016; Lina *et al*, 2017; Phaphromphuek, 2016; Peng *et al*, 2016; Rath *et al*, 2017; Singthuan, 2015; Wang *et al*, 2017)

ผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่จะนำศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ต้นกล้วยน้ำว้า แบ่งออกเป็น 4 ส่วน เพื่อทำการเปรียบเทียบกัน คือ ลำต้นกล้วย ก้านกล้วย กาบปลีกล้วย และเปลือกกล้วย ทั้งนี้เนื่องจากเห็นว่าแต่ละส่วนมีปริมาณส่วนเส้นใยแตกต่างกัน (Seangsesot, 2000; T.K.park, 2017; Wikipedia, 2017). ดังนั้นจึงคาดว่า อาจมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแตกต่างกัน สำหรับโลหะหนักที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นโลหะมีพิษ 5 ชนิด คือ ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล โคบอลต์ และสังกะสี ซึ่งล้วนเป็นโลหะที่เมื่อรับเข้าไปในร่างกายแล้วทำให้เกิดการสะสมในร่างกายและก่อให้เกิดโรคร้ายแรงได้ทั้งหมด

ความน่าสนใจของงานวิจัยนี้ คือ ยังไม่มีนักวิจัยกลุ่มใดศึกษาการนำส่วนประกอบเหลือใช้ของต้นกล้วยมาใช้ประโยชน์เพื่อกำจัดโลหะมีพิษในน้ำมาก่อน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเรื่องนี้โดยกำหนดวัตถุประสงค์ 3 ข้อ คือ

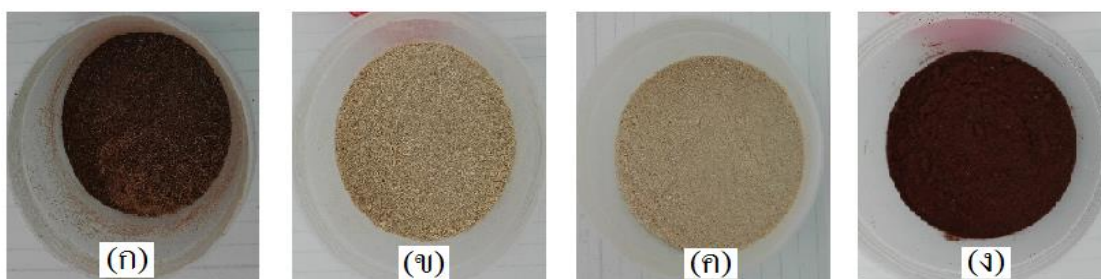
- (1) เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะมีพิษ 5 ชนิด คือ ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล ทองแดงและสังกะสีของต้นกล้วย โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟ คัปเปิลพลาสมา - ออปติคอลล อิมิสชัน สเปกโตรมิเตอร์ (Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometer, ICP-OES)
- (2) เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับโดยใช้เครื่องมือขั้นสูง
- (3) เพื่อศึกษารูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์กับไอโซเทอรัมแบบฟรุนดลิช

ทั้งนี้คณะผู้วิจัยคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กำจัดโลหะหนักได้ และสามารถนำไปใช้ได้จริงในกระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

## วิธีดำเนินการวิจัย

### การเตรียมสารตัวอย่าง

ตัวอย่างของต้นกล้วยที่นำมาทำวิจัย เป็นต้นกล้วยน้ำว้าจากบ้านสระมาลา ตำบลคลองมาโนง อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี ทำการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ กาบปลีกล้วย ก้านกล้วย ลำต้นกล้วย และเปลือกกล้วย โดยคัดเลือกตัวอย่างกาบปลีกล้วยขนาดความยาว 25-28 ซม, ก้านกล้วยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-6 ซม, ลำต้นกล้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-16 ซม และเปลือกกล้วยสุก นำตัวอย่างทั้งหมดมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำเปล่าจากนั้นทำการหั่นลดขนาดก่อนนำตัวอย่างไปปั่นให้มีขนาดเล็กลง และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3 วัน จะได้ตัวอย่างกาบปลีกล้วยเป็นผงที่ไม่ละเอียดผสมกับเส้นใย, ตัวอย่างก้านกล้วยที่มีลักษณะเป็นเส้น, ตัวอย่างลำต้นกล้วยที่เป็นเส้นหยาบ และตัวอย่างเปลือกกล้วยเป็นผงหยาบ นำตัวอย่างแต่ละชนิดไปทำการบดให้เป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบดไฟฟ้า แล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนเมทขนาด 50 mesh เพื่อคัดเลือกผงที่มีขนาด 300 ไมโครเมตร (ภาพที่ 1 (ก – ง)) ไปศึกษาการดูดซับโลหะหนักต่อไป



ภาพที่ 1 ผงตัวอย่าง 4 ชนิดที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก : (ก) กาบปลีกล้วย (ข) ก้านกล้วย (ค) ลำต้นกล้วย และ (ง) เปลือกกล้วย

### การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวอย่าง

นำผงตัวอย่างของปลีกล้วยและเปลือกกล้วย และเส้นใยตัวอย่างของก้านกล้วยและลำต้นกล้วย มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ โดยวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) ในตัวอย่างด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR) ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) และทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างทั้งหมดด้วยเครื่องวิเคราะห์รังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDS หรือ EDX)

### การทดสอบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำ

#### การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และนิกเกิล เจือปนอยู่ในปริมาณ 10 – 50 มก./ลิตร โดยเริ่มต้นจากเตรียมสารละลายเข้มข้น (Stock Solution) ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร ได้ 1 mM  $Pb(NO_3)_2$  มีปริมาณของ  $Pb^{2+}$  207.2 มก./ลิตร, 1 mM  $Zn(NO_3)_2$  มีปริมาณของ  $Zn^{2+}$  65.06 มก./ลิตร, 1 mM  $Cu(NO_3)_2$  มีปริมาณของ  $Cu^{2+}$  63.13 มก./ลิตร, 1 mM  $Mn(NO_3)_2$  มีปริมาณของ  $Mn^{2+}$  56.00 มก./ลิตร และ 1 mM  $Ni(NO_3)_2$  มีปริมาณของ  $Ni^{2+}$  58.93 มก./ลิตร จากนั้นนำ Stock Solution มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ความเข้มข้นของสารละลายโลหะตามที่ต้องการ

### การศึกษาผลของเวลาเขย่าต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

เตรียมขวดรูปชมพู่ 5 ใบ แต่ละใบเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และนิกเกิล ความเข้มข้น 10 มก./ลิตร ลงไปปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งตัวอย่างกาบปลีกล้วยน้ำหนัก 1.0 กรัม ใส่ลงไปในแต่ละขวด และนำไปเขย่าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5, 30, 60, 120 และ 180 นาที ภายหลังเขย่าตัวอย่างแล้วนำตัวอย่างไปใส่ในหลอดทดลองและทำการหมუნเหวี่ยงจนเกิดการแยกชั้นของสารละลายใสและผงตัวอย่าง เลือกเฉพาะส่วนสารละลายใสไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง ICP-OES ทำการทดลองซ้ำ โดยในการทดลองแต่ละครั้งให้เปลี่ยนผงตัวอย่างเป็นก้านกล้วย ลำต้นกล้วย และเปลือกกล้วย ตามลำดับ

### การศึกษาผลของความเข้มข้นโลหะหนักต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

เตรียมขวดรูปชมพู่ 20 ใบ ใบที่ 1-4 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว ความเข้มข้น 20, 30, 40 และ 50 มก./ลิตร ลงไปปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใบที่ 5 – 8 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสี ความเข้มข้น 20, 30, 40 และ 50 มก./ลิตร ลงไปปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใบที่ 9 – 12 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดง ความเข้มข้น 20, 30, 40 และ 50 มก./ลิตร ลงไปปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใบที่ 13 – 16 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแมงกานีส ความเข้มข้น 20, 30, 40 และ 50 มก./ลิตร ลงไปปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ และใบที่ 17 – 20 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิลความเข้มข้น 20, 30, 40 และ 50 มก./ลิตร ลงไปปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นชั่งตัวอย่างกาบปลีกล้วยน้ำหนัก 1.0 กรัม ใส่ลงไปในแต่ละขวด และนำไปเขย่าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120, 120, 30, 30 และ 30 นาที สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และนิกเกิลตามลำดับ (เวลา ณ ความเข้มข้นที่สมดุล ( $C_e$ )) ภายหลังเขย่าตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างไปใส่ในหลอดทดลองและทำการหมუნเหวี่ยงจนเกิดการแยกชั้นของสารละลายใสและผงตัวอย่าง เลือกเฉพาะส่วนสารละลายใสไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง ICP-OES

ทำการทดลองซ้ำ โดยในการทดลองแต่ละครั้งให้เปลี่ยนผงตัวอย่างเป็นก้านกล้วย (เขย่าเป็นเวลา 60, 120, 60, 120 และ 120 นาที สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และนิกเกิล ตามลำดับ) ลำต้นกล้วย (เขย่าเป็นเวลา 120, 60, 60, 120 และ 30 นาที สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และนิกเกิล ตามลำดับ) และเปลือกกล้วย (เขย่าเป็นเวลา 60, 5, 60, 5 และ 60 นาที สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และนิกเกิล ตามลำดับ)

### การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วความเข้มข้น 50 มก./ลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ 4 ใบ ใบละ 100 มิลลิลิตร ทำการปรับค่า pH ด้วยสารละลาย 1M HCl และ 1M NaOH ให้มีค่า pH 1, 4, 7 และ 10 ตามลำดับ จากนั้นชั่งตัวอย่างกาบปลีกล้วยน้ำหนัก 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ทั้ง 4 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ เป็นเวลา 120 นาที นำตัวอย่างไปใส่ในหลอดทดลองและทำการหมუნเหวี่ยงจนเกิดการแยกชั้นของสารละลายใสและผงตัวอย่าง เลือกเฉพาะส่วนสารละลายใสไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง ICP-OES สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะอื่นๆ และตัวอย่างผงดูดซับอีก 3 ชนิดให้ทำในลักษณะเดียวกันนี้ โดยใช้เวลาเขย่าเป็นเวลา ณ ความเข้มข้นที่สมดุล ( $C_e$ ) ทำการทดลองซ้ำโดยในการทดลองแต่ละครั้งให้เปลี่ยนผงตัวอย่างเป็นก้านกล้วย, ลำต้นกล้วย และเปลือกกล้วย ตามลำดับ

### การยืนยันผลการดูดซับโลหะหนัก

ภายหลังการดูดซับโลหะหนัก นำตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดมาตรวจสอบธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS เพื่อยืนยันผลการดูดซับโลหะหนักว่าการดูดซับเกิดได้จริงหรือไม่ โดยหากเกิดการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นจริง ข้อมูลใน EDS spectrum จะต้องปรากฏธาตุโลหะหนักตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แมงกานีส และนิกเกิล เป็นธาตุองค์ประกอบร่วมกับธาตุอื่นในตัวดูดซับด้วย

### การศึกษารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด ศึกษาโดยเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ในสารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 10 – 50 มก./ลิตร ซึ่งไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชจะใช้ในการอธิบายรูปแบบการยึดเกาะระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับหลังจากเข้าสู่จุดสมดุลแล้ว โดยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์จะยืนยันผลของการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวโดยมีตำแหน่งยึดเกาะระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับที่แน่นอน ในขณะที่ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชจะยืนยันผลของการเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ

### การวิเคราะห์ข้อมูล

#### การคำนวณความสามารถในการดูดซับ

คำนวณความสามารถในการดูดซับจากร้อยละการดูดซับโลหะหนักโดยใช้สมการที่ 1 และความจุของโลหะหนักบนตัวดูดซับที่ใช้สมการที่ 2 ดังนี้

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

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

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

#### การหารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับ

วิเคราะห์รูปแบบของการดูดซับโดยใช้สมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยใช้สมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่อไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ตั้งอยู่บนสมมติฐานคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนผิวของวัสดุดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ขณะที่ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชมีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของวัสดุดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะขรุขระ พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุดูดซับต่อสารถูกดูดซับเกิดไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว ทำให้ระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัดและการดูดซับเกิดแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) (Phalathip, 2016)

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

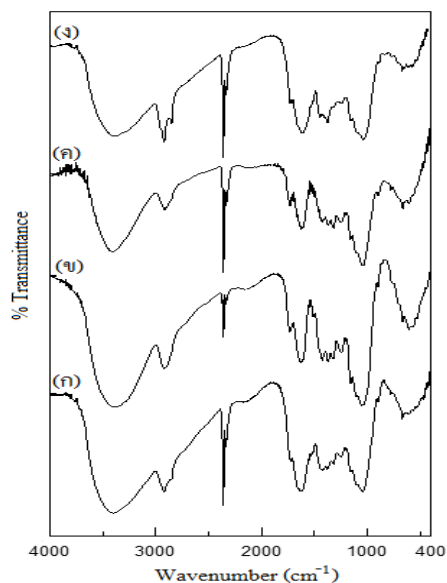
$$\text{Log } q_e = 1/n \text{ log } C_e + \text{log } K_F \quad 4$$

เมื่อ  $\alpha_{\max}$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มก./กรัม) เพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว  $K_L$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตร/มก.)  $K_F$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (มก./กรัม) และ  $n$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

## ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

สเปกตรัม FTIR ของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งพบว่าพีคที่ปรากฏมีลักษณะเหมือนกันทั้งกาบปลีกล้วย (ภาพที่ 2(ก)), ลำต้นกล้วย (ภาพที่ 2(ข)), ก้านกล้วย (ภาพที่ 2(ค)) และเปลือกกล้วย (ภาพที่ 2(ง)) โดยพบพีคกว้าง (Broad peak) ที่ประมาณ  $3300 - 3500 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งบ่งชี้ว่าเป็น  $-\text{OH}$  และ  $-\text{NH}$  stretching ของคาร์โบไฮเดรต, วัสดุผนังพืช (Cell wall material) และโปรตีน พีคที่ตำแหน่งประมาณ  $2500 \text{ cm}^{-1}$  บ่งชี้  $-\text{CH}$  asymmetric stretching ใน  $\text{CH}_3$  และ  $\text{CH}_2$  พีคที่ประมาณ  $1700 \text{ cm}^{-1}$  บ่งชี้ว่าเป็นพีคของคาร์บอนิลซึ่งเป็นสารประกอบของเอสเทอร์ (Ester) และคีโตน (Ketone) ที่พบได้ในเนื้อเยื่อพืช แพคติน และแทนนิน พีคที่ปรากฏที่  $1700$  และ  $1500 \text{ cm}^{-1}$  เป็นเอไมด์ 1 แบนด์ คือ  $\text{C}=\text{O}$  stretching และ เอไมด์ 2 แบนด์ คือ  $\text{N-H}$  bending และ  $\text{C-N}$  stretching ตามลำดับ พีคที่ตำแหน่ง  $1500 - 1400 \text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคขนาดเล็กซึ่งบ่งชี้  $\text{C-O}$  stretching ในคาร์บอกซิเลตไอออน (Carboxylate ion;  $-\text{COO}-$ ) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ แพคติน พีคที่ตำแหน่งประมาณ  $1400 - 1300 \text{ cm}^{-1}$  เป็น symmetric  $\text{CH}_3$  bending ในโปรตีนและเซลลูโลส พีคที่ตำแหน่งประมาณ  $1000 \text{ cm}^{-1}$  บ่งชี้  $\text{CO}$  stretching ของไฮดรอกซิลอีเธอร์ หรือเอสเทอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของผนังพืช เช่น คาร์โบไฮเดรต ประเภทเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (Deng *et al.*, 2013)



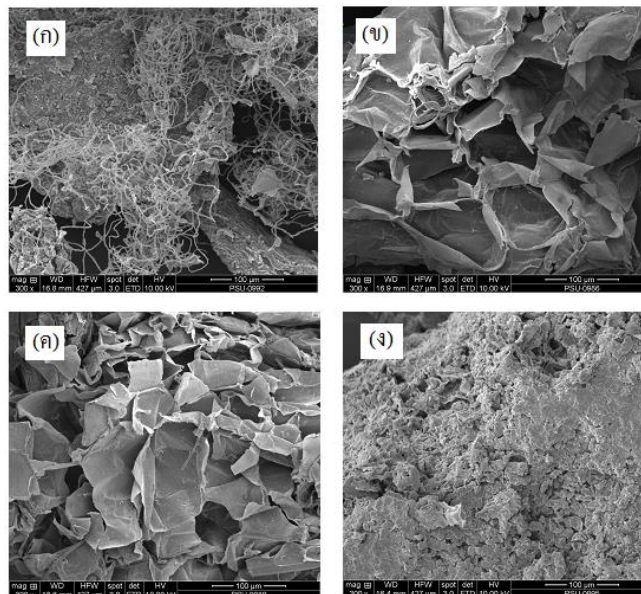
ภาพที่ 2 สเปกตรัม FTIR ของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด : (ก) กาบปลีกล้วย (ข) ก้านกล้วย (ค) ลำต้น และ (ง) เปลือกกล้วย

การหาองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) และ การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

องค์ประกอบของธาตุในตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดของกาบปลีกล้วย ลำต้นกล้วย ก้านกล้วย และเปลือกกล้วย พบว่า มีธาตุ C และ O อยู่ในปริมาณมาก ขณะที่ธาตุปริมาณน้อยอยู่ 5-7 ชนิด ได้แก่ K, Mg, Ca, Si, P, Cl และ S ดังแสดงในตารางที่ 1 พื้นผิวของตัวอย่างทั้งหมดจากภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะเฉพาะตัว โดยพื้นผิวของตัวอย่างกาบปลีกล้วยประกอบด้วยเกรนที่เป็นเส้นใย (ภาพที่ 3(ก)) ขณะที่ตัวอย่างลำต้นกล้วยมีพื้นผิวที่ประกอบด้วยเกรนลักษณะเป็นแผ่นมาียดเกาะกันและมีรูที่เกิดระหว่างการเกาะติดของแผ่นเกรนด้วย (ภาพที่ 3 (ข)) ลักษณะนี้ยังพบในตัวอย่างก้านกล้วยอีกด้วย แต่สังเกตเห็นได้ว่าขนาดของแผ่นเกรนในก้านกล้วยมีขนาดเล็กกว่าแผ่นเกรนในพื้นผิวของลำต้นกล้วย (ภาพที่ 3(ค)) ลักษณะพื้นผิวของเปลือกกล้วยประกอบด้วยเกรนทรงกลมขนาดเล็กจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นและมีรูพรุนขนาดเล็กในพื้นผิวด้วย (ภาพที่ 3(ง))

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของธาตุในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	องค์ประกอบของธาตุ	
	ธาตุที่มีปริมาณมาก	ธาตุที่มีปริมาณน้อย
กาบปลีกล้วย	C, O	K, Mg, Ca, Si, P, Cl
ลำต้นกล้วย	C, O	K, Mg, Ca, Si, Cl
ก้านกล้วย	C, O	K, Mg, Ca, Si, Cl
เปลือกกล้วย	C, O	K, Mg, Ca, Si, P, Cl, S



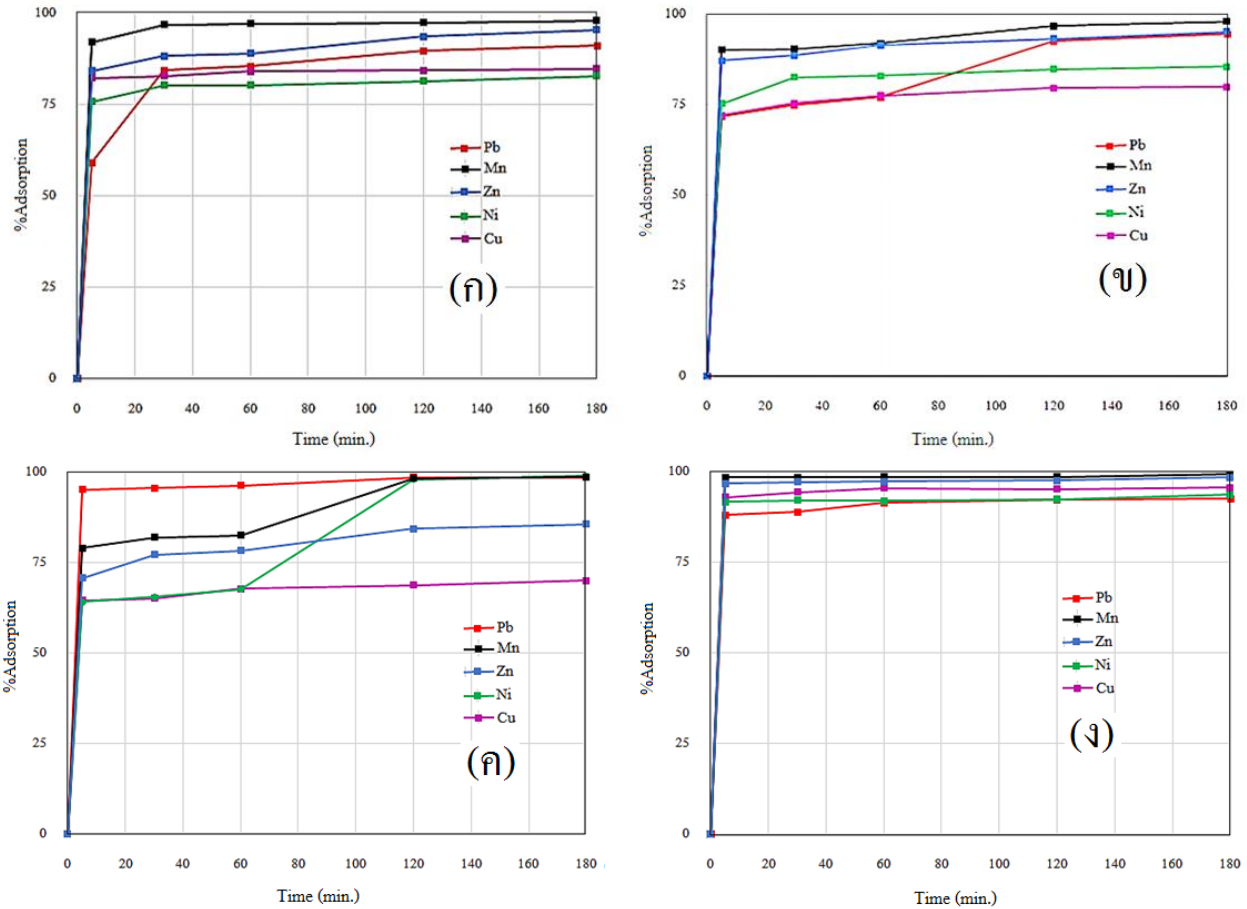
ภาพที่ 3 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง (ก) กาบปลีกล้วย (ข) ลำต้นกล้วย (ค) ก้านกล้วย และ (ง) เปลือกกล้วย



การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโลหะหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ 4 ชนิด

ผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนัก

การดูดซับสารละลายโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี โดยใช้กาบปลีกล้วย ได้แสดงผลวิจัยในภาพที่ 4(ก) พบว่า กาบปลีกล้วยสามารถดูดซับโลหะหนักทุกชนิดได้โดยใช้เวลาในการดูดซับในช่วง 30-120 นาที โดยกาบปลีกล้วยสามารถดูดซับทองแดง นิกเกิล และแมงกานีส ได้ที่เวลา 30 นาที ขณะที่ดูดซับตะกั่วและสังกะสี ได้ที่เวลา 120 นาที ค่าร้อยละการดูดซับของตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล ทองแดง และสังกะสีของกาบปลีกล้วย เท่ากับ 89.66, 96.80, 80.26, 82.77 และ 93.58 ตามลำดับ ขณะที่ลำต้นกล้วยสามารถดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดได้ โดยมีค่าร้อยละการดูดซับในช่วง 77.4 – 96.73 ทั้งนี้เวลาที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยลำต้นกล้วยดูดซับนิกเกิลได้ที่เวลา 30 นาที ขณะที่ดูดซับทองแดงและสังกะสีได้ที่เวลา 60 นาที ส่วนโลหะหนักตะกั่วและแมงกานีสจะใช้เวลาในการดูดซับ 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4(ข) ก้านกล้วยเป็นของเหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับโลหะหนักได้ โดยสามารถการดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดได้โดยใช้เวลาในการดูดซับอยู่ในช่วง 60-120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4(ค) จากการวิจัยพบว่าก้านกล้วยสามารถดูดซับตะกั่วและทองแดงได้ที่เวลา 60 นาที ขณะที่ดูดซับนิกเกิล แมงกานีส และสังกะสีได้ที่เวลา 120 นาที ค่าร้อยละการดูดซับของตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล ทองแดง และสังกะสีของกาบปลีกล้วย เท่ากับ 96.30, 67.77, 98.03, 98.30 และ 84.28 ตามลำดับ การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับของตัวอย่างเปลือกกล้วย พบว่า เปลือกกล้วยสามารถดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดได้โดยมีประสิทธิภาพสูงมาก โดยมีค่าร้อยละการดูดซับในช่วง 91.50 – 98.43 และใช้เวลาในการดูดซับโลหะหนักเพียง 5-30 นาที ระยะเวลาในการดูดซับนิกเกิล แมงกานีสและสังกะสีของเปลือกกล้วยเท่ากับ 5 นาที ขณะที่เวลาที่ใช้ดูดซับโลหะตะกั่วและทองแดงเท่ากับ 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4(ง)



ภาพที่ 4 ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักของตัวอย่าง(ก) กาบปลีกล้วย (ข) ลำต้นกล้วย (ค) ก้านกล้วย และ (ง) เปลือกกล้วย

ผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย ได้ศึกษาโดยใช้สารละลายโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด คือ ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล ทองแดงและสังกะสี แต่ละชนิดเตรียมให้มี 5 ความเข้มข้น คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./ลิตร และใช้เวลาเขย่าเป็นเวลาที่ความเข้มข้นโลหะหนักสมดุล ( $C_e$ ) พบว่า ในตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดได้แก่กาบปลีกล้วย ลำต้นกล้วย ก้านกล้วย และเปลือกกล้วย ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นปริมาณโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดบนพื้นผิวตัวดูดซับจะเกิดได้เพิ่มขึ้น ดังผลวิจัยที่แสดงในตารางที่ 2 - 5

**ตารางที่ 2** ปริมาณโลหะบนตัวดูดซับ ( $q_e$ ) ของกาบปลีกล้วย

Conc. (mg/L)	$q_e$ (mg/g)				
	Pb	Ni	Cu	Zn	Mn
0	0	0	0	0	0
10	0.8966	0.8026	0.8277	0.9358	0.968
20	1.9037	1.7055	1.6944	1.9040	1.8945
30	2.8593	2.6745	2.6414	2.8680	2.8204
40	3.8517	3.2742	3.5627	3.8571	3.7313
50	4.7429	4.2270	4.2757	4.8543	4.6547

**ตารางที่ 3** ปริมาณโลหะบนตัวดูดซับ ( $q_e$ ) ของลำต้นกล้วย

Conc.	$q_e$ (mg/g)				
	Pb	Ni	Cu	Zn	Mn
0	0	0	0	0	0
10	0.9258	0.8251	0.7740	0.9138	0.9673
20	1.9455	1.4656	1.6372	1.8498	1.7206
30	2.9424	2.3471	2.5666	2.7599	1.9971
40	3.9297	2.9440	3.3803	3.7033	2.9260
50	4.8793	3.7290	4.0798	4.5020	3.5750

ตารางที่ 4 ปริมาณโลหะบนตัวดูดซับ ( $q_e$ ) ของก้านกล้วย

Conc.	$q_e$ (mg/g)				
	Pb	Ni	Cu	Zn	Mn
0	0	0	0	0	0
10	0.963	0.9803	0.6777	0.8428	0.9830
20	1.9428	1.5512	1.4263	1.7778	1.5000
30	2.8955	2.2577	2.1363	2.7641	2.2798
40	3.8918	3.0194	2.8630	3.7149	2.6230
50	4.7107	3.7978	3.8290	4.5702	3.5750

ตารางที่ 5 ปริมาณโลหะบนตัวดูดซับ ( $q_e$ ) ของเปลือกกล้วย

Conc.	$q_e$ (mg/g)				
	Pb	Ni	Cu	Zn	Mn
0	0	0	0	0	0
10	0.9150	0.9201	0.9546	0.9671	0.9843
20	1.9618	1.8746	1.9155	1.9542	1.9666
30	2.8885	2.7936	2.8478	2.9349	2.9151
40	3.6639	3.6746	3.7859	3.9328	3.8609
50	4.4724	4.6409	4.7266	4.9157	4.8590

## ผลของพีเอชของสารละลายโลหะต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก

การศึกษาผลของ pH ของสารละลายโลหะ ได้ศึกษาโดยใช้สารละลายโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด คือ ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล ทองแดงและสังกะสี ที่ความเข้มข้น 50 มก./ลิตร และค่า pH 1 – 10 พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีและมีปริมาณโลหะหนักบนตัวดูดซับ ( $q_e$ ) ใกล้เคียงกันที่ทุกค่า pH (ตารางที่ 6) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิล พบว่า ตัวดูดซับกาบปลีกล้วย ลำต้นกล้วย และก้านกล้วย สามารถดูดซับโลหะนิกเกิลได้ดีที่ pH 4 ขณะที่เปลือกกล้วยสามารถดูดซับโลหะนิกเกิลได้ดีที่ทุกค่า pH (ตารางที่ 7) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสี พบว่า สามารถปรับค่า pH ได้ค่าสูงสุดเท่ากับ 7 เท่านั้น เนื่องจากสารละลายเกิดการตกตะกอนของซิงค์ไฮดรอกไซด์ ดังนั้นค่า pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสังกะสีของตัวดูดซับกาบปลีกล้วยและเปลือกกล้วยคือ pH 1, 4 และ 7 ส่วนลำต้นกล้วยและก้านกล้วย ดูดซับสังกะสีได้ดีที่ pH 4 และ 7 (ตารางที่ 8) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดงและแมงกานีส พบว่า สามารถปรับ pH ได้ 2 ค่าเท่านั้น คือ pH 1 และ 4 เนื่องจากสารละลายเกิดการตกตะกอนของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่ pH 7 โดยตัวดูดซับลำต้นกล้วยและก้านกล้วยสามารถดูดซับโลหะทองแดงและ

แมงกานีสได้ดีที่ pH 4 ขณะที่เปลือกกล้วยสามารถดูดซับโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดได้ดีที่ pH 1 และ 4 สำหรับความสามารถในการดูดซับทองแดงและแมงกานีสของตัวอย่างกาบปลีกล้วย พบว่า ดูดซับทองแดงได้ดีที่ pH 4 และดูดซับแมงกานีสได้ดีที่ pH 1 และ 4 (ตารางที่ 9-10)

**ตารางที่ 6** ปริมาณโลหะตะกั่วบนตัวดูดซับ

pH	q <sub>e</sub> (mg/g)			
	กาบปลีกล้วย	ลำต้นกล้วย	ก้านกล้วย	เปลือกกล้วย
1	4.724	4.591	4.851	4.773
4	4.743	4.512	4.529	4.553
7	4.454	4.870	4.941	4.038
10	4.738	4.823	4.870	4.798

**ตารางที่ 7** ปริมาณโลหะนิกเกิลบนตัวดูดซับ

pH	q <sub>e</sub> (mg/g)			
	กาบปลีกล้วย	ลำต้นกล้วย	ก้านกล้วย	เปลือกกล้วย
1	1.570	2.002	1.352	4.001
4	4.577	4.627	4.620	4.536
7	3.684	3.748	3.613	4.070
10	3.219	3.678	2.753	4.126

**ตารางที่ 8** ปริมาณโลหะสังกะสีบนตัวดูดซับ

pH	q <sub>e</sub> (mg/g)			
	กาบปลีกล้วย	ลำต้นกล้วย	ก้านกล้วย	เปลือกกล้วย
1	4.019	1.974	1.931	4.572
4	4.515	4.550	4.543	4.509
7	4.763	4.695	4.486	4.853

**ตารางที่ 9** ปริมาณโลหะทองแดงบนตัวดูดซับ

pH	q <sub>e</sub> (mg/g)			
	กาบปลีกล้วย	ลำต้นกล้วย	ก้านกล้วย	เปลือกกล้วย
1	3.609	2.162	1.788	4.145
4	4.572	4.592	4.617	4.527

**ตารางที่ 10** ปริมาณโลหะทองแดงบนตัวดูดซับ

pH	q <sub>e</sub> (mg/g)			
	กาบปลีกล้วย	ลำต้นกล้วย	ก้านกล้วย	เปลือกกล้วย
1	4.264	2.175	2.229	4.739
4	4.535	4.653	4.693	4.532

**รูปแบบไอโซเทอรั่มของการดูดซับ**

การศึกษาแบบไอโซเทอรั่มการดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดของตัวดูดซับกาบปลีกล้วย ลำต้นกล้วย ก้านกล้วย และเปลือกกล้วย ที่ความเข้มข้นของสารละลายโลหะในช่วง 10-50 มก/ลิตร พบว่า การดูดซับโลหะหนักของกาบปลีกล้วย (ตารางที่ 11)และลำต้นกล้วย (ตารางที่ 12) สอดคล้องกับไอโซเทอรั่มแบบฟรุนดลิช พิจารณาจากค่า R<sup>2</sup><sub>F</sub> ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็น

ว่าการดูดซับเกิดแบบหลายชั้น ขณะที่การดูดซับโลหะหนักของก้านกล้วยสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์หรือการดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว พิจารณาจากค่า  $R^2_L$  ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 (ตารางที่ 13) ส่วนรูปแบบการดูดซับโลหะหนักของเปลือกกล้วย (ตารางที่ 14) สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช เมื่อโลหะหนักคือ ทองแดง, แมงกานีส และสังกะสี (ค่า  $R^2_F > R^2_L$ ) ขณะที่การดูดซับของนิกเกิลและตะกั่วสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ( $R^2_L > R^2_F$ ) ค่าต่างๆที่คำนวณได้ในแสดงในตารางที่ 11-14 คำนวณได้จากกราฟไอโซเทอร์มดังแสดงในภาพที่ 5

**ตารางที่ 11** การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มของการดูดซับของตัวดูดซับก้านกล้วย

โลหะ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช		
	$q_m$	$K_L$	$R^2_L$	$n$	$K_F$	$R^2_F$
Ni	1.0693	5.6433	0.3259	1.0047	0.7700	0.8276
Cu	1.1442	5.9773	0.2393	0.8300	0.7270	0.9201
Pb	3.0066	2.2904	0.1072	0.7308	1.2103	0.6510
Mn	4.7847	0.0112	0.7757	1.5267	1.3396	0.9937
Zn	4.2337	1.5179	0.1472	0.5482	1.3671	0.9639

**ตารางที่ 12** การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มของการดูดซับของตัวดูดซับลำต้นกล้วย

โลหะ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช		
	$q_m$	$K_L$	$R^2_L$	$n$	$K_F$	$R^2_F$
Ni	0.8018	2.0807	0.5730	1.7931	0.8915	0.8680
Cu	0.7302	7.0671	0.1292	1.3194	0.8673	0.7842
Pb	2.9464	15.150	0.0240	5.4705	1.4275	0.0066
Mn	6.0423	0.1642	0.6767	3.0139	1.0863	0.8776
Zn	2.5138	2.6969	0.4947	1.0266	1.0463	0.9652

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มของการดูดซับของตัวดูดซับก้านกล้วย

โลหะ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช		
	$q_m$	$K_L$	$R_L^2$	$n$	$K_F$	$R_F^2$
Ni	3.4518	0.3678	0.7327	3.4953	1.1661	0.8089
Cu	0.3322	13.980	0.0349	0.8127	0.4520	0.9789
Pb	8.2919	1.4835	0.5782	1.3353	1.5270	0.8488
Mn	1.3534	0.5676	0.7627	4.0568	1.1594	0.8085
Zn	0.9964	27.624	0.0091	0.5904	0.7338	0.8618

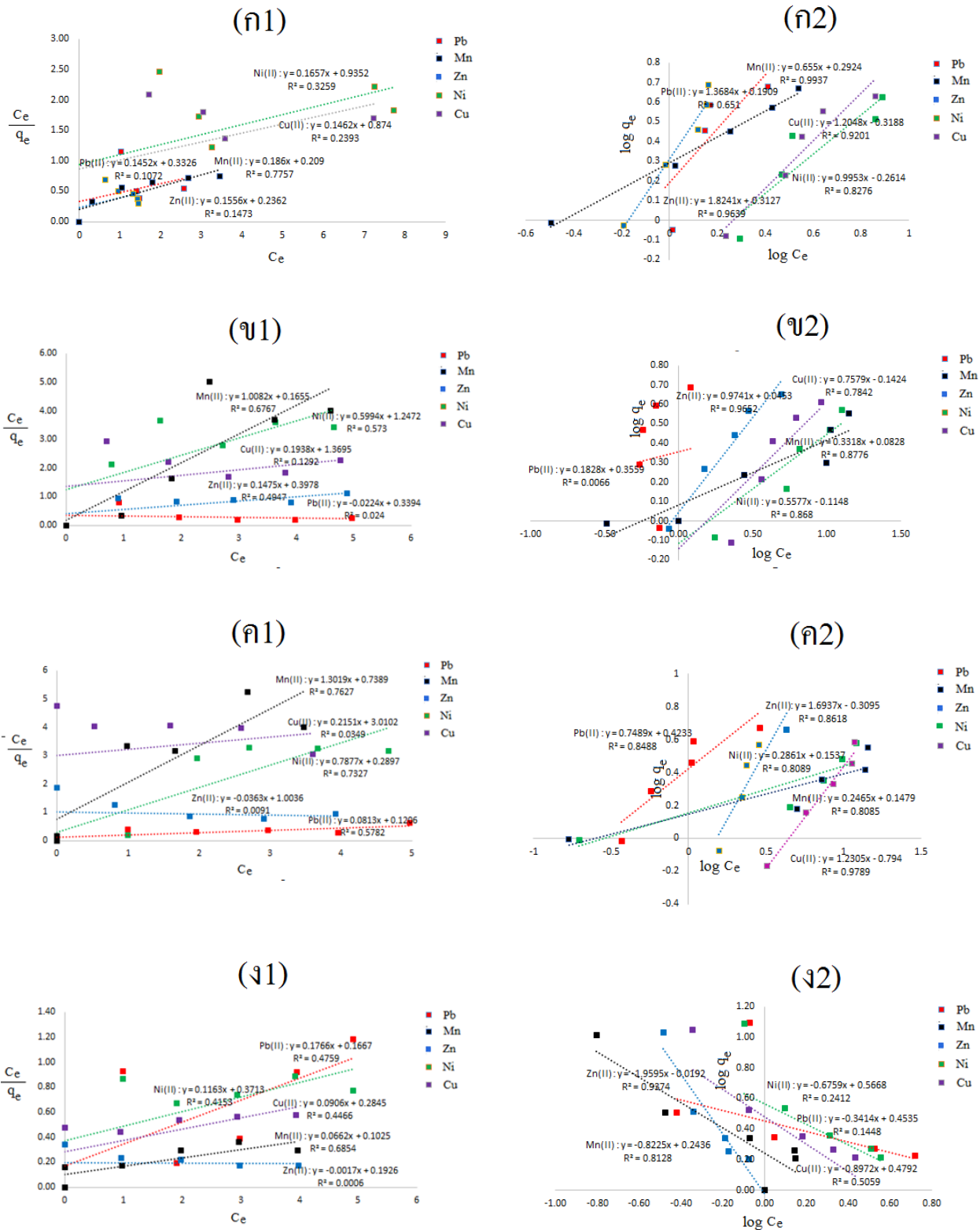
ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มของการดูดซับของตัวดูดซับเปลือกกล้วย

โลหะ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช		
	$q_m$	$K_L$	$R_L^2$	$n$	$K_F$	$R_F^2$
Ni	2.6932	3.1928	0.4153	1.4795	1.7626	0.2412
Cu	3.5149	3.1397	0.4466	1.1146	1.6148	0.5059
Pb	5.9988	0.9439	0.4759	2.9291	1.5738	0.1448
Mn	9.7561	1.5482	0.6854	1.2158	1.2758	0.8128
Zn	5.1921	11.636	0.0006	0.5103	0.9810	0.9874

การยืนยันผลของการดูดซับโลหะหนักด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

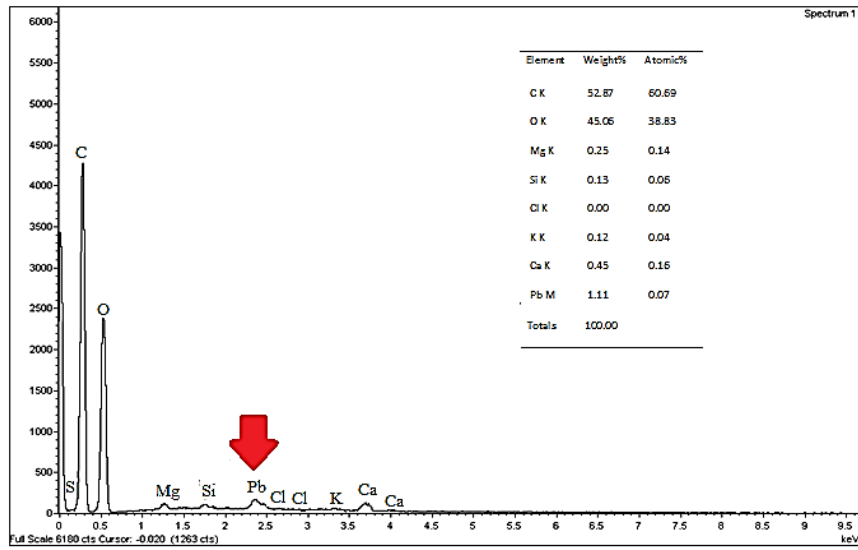
ภายหลังจากการศึกษาการดูดซับโลหะหนัก ได้นำตัวดูดซับไปทดสอบหาองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDS เพื่อยืนยันผลความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก จากการวิเคราะห์พบว่าสเปกตรัม EDS ของตัวดูดซับผลิตภัณฑ์ธรรมชาติทั้งหมด (กาบปลีกล้วย ลำต้นกล้วย ก้านกล้วยและเปลือกกล้วย) แสดงพีกของโลหะหนักอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น การทดสอบการดูดซับตะกั่วของลำต้นกล้วย ซึ่งปรากฏพีกของตะกั่วในสเปกตรัม EDS และแสดงปริมาณที่พบเท่ากับร้อยละ 0.11 (ภาพที่ 6) ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS จึงช่วยยืนยันได้ว่าตัวดูดซับทั้งหมดสามารถดูดซับโลหะหนักได้จริง

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ EDS นี้เป็นเพียงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพที่สามารถระบุชนิดธาตุองค์ประกอบได้อย่างถูกต้องเท่านั้นแต่ในส่วนของปริมาณที่บ่งชี้เป็นเพียงปริมาณธาตุองค์ประกอบ ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่งที่ทดสอบซึ่งไม่ใช่ปริมาณธาตุทั้งหมดที่ทุกบริเวณของตัวอย่าง



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของตัวดูดซับ (ก1) กาบปลีกล้วย (ข1) ลำต้นกล้วย (ค1) ก้านกล้วย (ง1) เปลือกกล้วย และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของตัวดูดซับ (ก2) กาบปลีกล้วย (ข2) ลำต้นกล้วย (ค2) ก้านกล้วย (ง2) เปลือกกล้วย





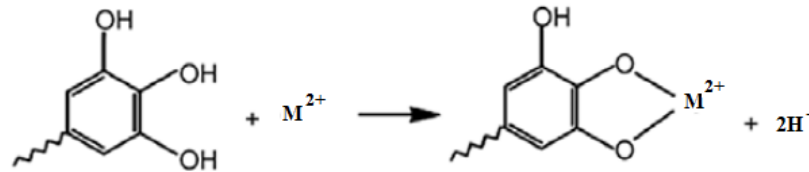
ภาพที่ 6 สเปกตรัม EDS ของตัวดูดซับลำต้นกล้วยภายหลังจากดูดซับโลหะหนักตะกั่วเข้มข้น 10 มก./ลิตร

### วิจารณ์ผลการวิจัย

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับ โดยทั่วไปแล้วพิจารณาได้จาก 2 ปัจจัยหลัก คือ 1. ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ : ตัวดูดซับที่มีรูพรุนมากจะสนับสนุนให้เกิดการดูดซับโลหะหนักได้ดี เนื่องจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวมาก ขณะที่ตัวดูดซับที่มีรูพรุนน้อยหรือมีพื้นที่ผิวน้อยจะทำให้การดูดซับของโลหะหนักเกิดขึ้นได้ไม่ดี 2. ขนาดของโลหะ : โลหะที่มีขนาดเล็กจะสามารถดูดซับบนตัวดูดซับได้ดีกว่าโลหะที่มีขนาดใหญ่ จากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนัก 5 ชนิดบนตัวดูดซับซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ 4 ชนิดที่มีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาขนาดของโลหะหนักแล้วพบว่า ขนาดของตะกั่ว (Pb(II) = 119 pm) > สังกะสี (Zn(II) = 74 pm) ~ ทองแดง (Zn(II) = 73 pm) ~ นิกเกิล (Ni(II) = 70 pm) = แมงกานีส (Mn(II) = 70 pm) ดังนั้นแนวโน้มของค่าร้อยละการดูดซับของตัวดูดซับ (% adsorption) แต่ละชนิดจึงควรเป็น ตะกั่ว < สังกะสี ~ ทองแดง ~ นิกเกิล = แมงกานีส แต่จากการทดลองพบว่า แนวโน้มของค่าร้อยละการดูดซับคลาดเคลื่อนไปจากแนวโน้มดังกล่าวเล็กน้อย คือ ค่าร้อยละการดูดซับของโลหะทรานซิชันแถวแรกทั้ง 4 ชนิด แม้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการดูดซับแล้วพบว่า ตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดใช้เวลาดูดซับไม่เท่ากัน ทั้งนี้อาจเกิดจากลักษณะพื้นผิวตัวดูดซับที่แตกต่างกัน ประกอบกับความเร็วในการเขย่ามาก (150 รอบ/นาที) อาจทำให้โลหะที่เกาะบนตัวดูดซับบางส่วนหลุดออกไปได้ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนด้านเวลาดูดซับรวมถึงค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับด้วย

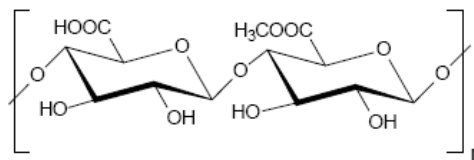
เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของการดูดซับของตะกั่ว พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดทั้งที่ควรมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากโลหะหนักตะกั่วมีความสามารถในการเกิดสารเชิงซ้อนกับลิแกนด์อินทรีย์ คือ แพคติน แทนนิน และเซลลูโลสได้ดี กล่าวคือ ตัวดูดซับที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปทางเคมี จึงทำให้ในตัวดูดซับมีโมเลกุลของแพคติน แทนนิน และเซลลูโลสอยู่ด้วย โมเลกุลเหล่านี้เป็นลิแกนด์อินทรีย์ที่สามารถเกิดการรวมตัวกับโลหะหนักแล้วเกิดเป็นสารเชิงซ้อนได้

เซลล์ลูโลสมีความสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีโดยโลหะหนักจะถูกดูดซับได้มากที่สุดที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอกซิล (Dokbua *et al*, 2008; Dupont *et al*, 2006., Narawong, & Panya, 2017) แทนนิน สามารถดูดซับโลหะหนักได้เช่นกัน โดยเกิดจากการพหุประจุเชิงซ้อนของโลหะหนักที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลของแทนนิน ดังแสดงในสมการที่ 5



สมการที่ 5 การดูดซับโลหะหนักที่เกิดจากโครงสร้างของแทนนินสร้างพันธะกับโลหะ (Ramkul, 2010).

แพคติน เป็นโพลีเมอร์สายยาวของกรดคาร์บอกซิลิก (D-galacturonic acid) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง  $\alpha(1-4)$  โดยโมเลกุลแพคตินสามารถจับกับโลหะหนักได้ที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชัน 4 หมู่ ของคาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล เอไมด์ และเมทอกซิล ดังนั้นหากตัวดูดซับมีโมเลกุลแพคตินเป็นองค์ประกอบก็จะช่วยส่งเสริมให้การดูดซับโลหะหนักเกิดได้ดียิ่งขึ้น (Hastuti *et al*, 2015) โครงสร้างของแพคตินแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 โครงสร้างของแพคติน (Hastuti *et al*, 2015)

ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ปัจจัยส่งเสริมให้เกิดการดูดซับโลหะหนักของตัวดูดซับผลิตภัณฑ์ธรรมชาติในงานวิจัยนี้มี 3 ปัจจัย ได้แก่ 1. ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ 2. ขนาดของโลหะหนัก และ 3. ความสามารถในการเกิดสารเชิงซ้อนกับลิแกนด์อินทรีย์ของโลหะหนัก

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองที่มีระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี โดยเริ่มต้นด้วยการนำผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ คือ ต้นกล้วย แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนลำต้นกล้วย ก้านกล้วย กาบปลีกล้วย และเปลือกกล้วย ภายหลังจากเตรียมตัวอย่างให้เป็นผงขนาด 300 ไมโครเมตรแล้วจึงทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพโดยใช้เครื่องมือขั้นสูง การศึกษาความสามารถในการนำตัวอย่างธรรมชาติที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักในน้ำ ได้ทำการทดสอบกับโลหะหนัก 5 ชนิดคือ ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล ทองแดงและสังกะสี

จากการวิจัย พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มก./ลิตร ของโลหะเป็นดังนี้ : เปลือกกล้วย (ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 91.500 – 98.43) > กาบปลีกล้วย (ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 82.77 – 96.80) > ลำต้นกล้วย (ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 77.40 – 96.73) ~ ก้านกล้วย (ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 67.77 – 98.03) โดยค่าการดูดซับโลหะบนตัว

ดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนัก ดังนั้นตัวดูดซับจากงานวิจัยนี้จึงมีสามารถดูดซับโลหะหนักได้ทุกชนิด และมีความน่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาชายแดนใต้ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่ได้มอบทุนวิจัยจากงบประมาณบำรุงการศึกษา ปี พ.ศ. 2561 (เลขที่ทุน บกศ. 019 / 2561) เพื่อสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณหน่วยวิทยาศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุเคราะห์วิเคราะห์ผลทางโครงสร้างและพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และ EDS ตลอดจนวัดผลโลหะหนักด้วยเทคนิค ICP-OES นอกจากนี้แล้วคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อนุเคราะห์วิเคราะห์ตัวอย่างภายหลังการดูดซับโลหะหนักด้วยเทคนิค EDS เพื่อการยืนยันผลความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของตัวอย่าง

### เอกสารอ้างอิง

- Adam, R. (2015). *Report - Study of quantity of heavy metal : a case study of Balekhiley community fishing Narathiwat province*. Narathiwat: Princess of Naradhiwas University. (in Thai).
- Chaibu, P., & Chawanchai, B. (2007). Use of longan peel as an adsorbent for metal ion(cadmium and lead) adsorbtion in aqueous solution. In *Proceedings of 45th Kasetsart University Annual Conference: Architecture and Engineering and Natural Resources and Environment*. (pp. 858 – 866). Thailand. Kasetsart University. (in Thai).
- Dana, E. (2017). Adsorption of heavy metals on functionalized-mesoporous silica: A review. *Microporous and Mesoporous Material*, 247, 145 – 157.
- Deng, P.Y., Liu, W., Zeng, B.Q., Qiu, Y.K., & Li, L.S. (2013). Sorption of heavy metals from aqueous solution by dehydrated powders of aquatic plants. *International Journal of Environment Science and Technology*, 10, 559 – 566.
- Dokbua, J., Phasuk, S., & Tundulawessa, Y. (2008). Effectcency of cellulose phosphate from straw and bagasse for adsoerption lead and cadmium in waste water. *Journal of graduate studies valaya alongkron rajabhat university*, 2, 1 – 8. (in Thai)
- Dubey, A., & Shiwani, S. (2012). Adsorption of lead using a new green material obtained from Portulaca plant. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 15 – 20.
- Dupont M, 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.

- Franco, F., Benítez-Guerrero, M., Gonzalez-Trivino, I., Perez-Recuerda, R., Assiego, C., Cifuentes-Melchor, J., & Pascual-Cosp, J. (2016). 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*, 119, 321 – 332.
- Hastuti, B., Mudasir, D., Siswanta., & Triyono. (2015). 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*, 6, 77 – 82.
- Kerdcry, S., & chaninmanu, S. (2004). *Report - Heavy metal toxicity*. Phayao: Phayao provincial public health office. (in Thai).
- Kumtabtim, U., & Siripinyanon, A. (2017). Study of remove ability for heavy metals in waste water by using applied Cassava leaves. *Science and Technology RMUTT Journal*, 6(2), 37 – 47. (in Thai).
- Li, J., Yu, H., & Luan, Y. (2015). Meta-analysis of the copper, zinc, and cadmium absorption capacities of aquatic plants in heavy metal-polluted Water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 14958 – 14973.
- Lina, S., Lianb, C., Xua, M., Zhanga, W., Liua, L., & Lin, K. (2017). 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*, 422, 675 – 681.
- Nambang, W. (2014). *Report - Distribution of heavy metals in rice field around the landfill pond (case study of tumbon Wangnumkoo, Muang, Phitsanulok)*. Phitsanulok: Naresuan university. (in Thai).
- Narawong, W. & Panya, P. (2017). 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*. (pp. 957 – 966). Thailand. Kamphaeng Phet Rajabhat University. (in Thai).
- Pengpean, W., Wongtanet, J., Junanurat, A., & Sornsuan, P. (2013). Performance of typical adsorbent for lead in waste water. *Journal of environmental health*, 15(3), 29 – 37. (in Thai)
- Phaphromphuek, P. (2016). Adsorption and waste water treatment. *MSU research digest*, 3, 51 – 57. (in Thai).
- Peng, W., Li, H., Liu, Y., & Song, S. (2016). A review on heavy metal ions adsorption from water by graphene oxide and its composites. *Journal of Molecular Liquids*, 230, 496 – 504.
- Phalathip, P. (2016). *Thesis - the adsorption of heavy metal using modified synthetic fiber*. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology. (in Thai).
- Pintawong, J., Nontaso, A., & Kawinate, S. (2011). *Report - Management to approach of manganese mineral for fiscal year 2011*. Bangkok: Department of mineral resources. (in Thai).

- Pollution control department. (2017). *Report of Thailand's pollution situation : water quality in each region*. Bangkok. Ministry of Natural Resources and Environment. (in Thai).
- Ramkul, P. (2010). Innovation of tannin adsorbent for removing metal from solution. *Kasetsart Engineering Journal*, 72, 17 – 29. (in Thai).
- Rath, S.S., Singh, S., Rao, D.S., Nayak, B.B., & Mishra, B.K. (2017). Adsorption of heavy metals on a complex Al-Si-O bearing mineral system: Insights from theory and experiments. *Separation and Purification Technology*, 186, 28 – 38.
- Singthuan, P. (2015). *Thesis : Effect of copper on the treatment of oxytetracycline contaminated water by narrow-leaved cat-tail (Typna angustifolia L.)*. Bangkok: Silpakorn University. (in Thai).
- Seangsesot, S. (2000). Banana: high benefit fruit. *Department of science service journal*, 153, 3 – 5. (in Thai).
- TK park. (2017). Handbook of activity model for banana's topic. Bangkok: Thai Health Promotion Foundation. (in Thai).
- Umpuch, C., Namduang, P., & Yawong, P. (2017). Adsorption of cadmium from aqueous solutions by pomelo peel (*Citrus grandis*). *Journal of science and technology*, 19(1), 138 – 151. (in Thai).
- Usanawarong, S. (2006). Zinc and high blood pressure. *Journal of community service*, 2, 23 – 28. (in Thai).
- Wang, F., Pan, Y., Cai, P., Guo, T., & Xiao, H. (2017). Single and binary adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions using sugarcane cellulose-based adsorbent. *Bioresource Technology*, 241, 482 – 490.
- Wikipedia. (2017). *Banana*. Retrived February 15, 2017, from <http://www.th.wikipedia.org/wiki/banana>. (in Thai).