JPAGS
Journal of Physics & General Science

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีไอออนด้วยสารแทนนินจากเปลือกกล้วยที่ตรึงบนเส้นใยปอสา

A Study of Zinc Ion Adsorption Efficiency Using Banana Peel Tannins Immobilized on *Broussonetia papyrifera* (L.) Vent Pulp

ปุณยนุช ธรรมอาชีพ[1] อัญชนา ปรีชาวรพันธ์[1] พดารัตน์ นิลเจียรนัย[1] กุลวดี ปิ่นวัฒนะ[1,2] ชนิกาญจน์ จันทร์มาทอง[3] และรพิพรรณ จันทร์มะณี[1,*]

Punyanuch Thammaacheep[1], Anchana Preechaworapan[1], Padarat Ninjiaranai[1], Kulwadee Pinwatana[1,2], Chanikan Junmatong[3] and Rapiphun Janmanee[1,*]

[1]หลักสูตรสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก

[1]Program in Chemistry, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok

[2]หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก

[2]Program in Science Education, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok

[3]หลักสูตรสาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก

[3]Program in Biology, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok

*Corresponding author e-mail: rapiphun16@psru.ac.th

(Received: August 14, 2023, Revised: March 25, 2024, Accepted: July 24, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนของวัสดุดูดซับ ซึ่งเตรียมจากสารสกัดแทนนินจากเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบ โดยนำสารแทนนินมาตรึงบนเส้นใยปอสาและทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS) พบว่า การใช้วัสดุดูดซับหนัก 1.50 กรัม และเวลาในการดูดซับ 90 นาที มีค่าร้อยละการดูดซับสังกะสีไอออนมากที่สุด คือ 95.37 วัสดุดูดซับสามารถดูดซับสังกะสีไอออนได้ในช่วงความเข้มข้น 1-10 พีพีเอ็ม โดยความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนอยู่ในช่วง 0.08-0.86 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อพิจารณาไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีไอออน พบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับตามสมการแบบฟรุนดิช โดยมีค่า K = 0.47, n = 0.85 และ R^2 = 0.99 ดังนั้น จากผลการศึกษาจึงสรุปได้ว่า วัสดุดูดซับจากสารแทนนินที่ตรึงบนเส้นใยปอสานั้นสามารถกำจัดโลหะหนักและนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียได้

คำสำคัญ: วัสดุดูดซับ แทนนิน สังกะสีไอออน เปลือกกล้วย เส้นใยปอสา

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the adsorption capacity of zinc ions using a tannin-based adsorbent. Tannin was extracted from fresh banana peels and subsequently immobilized on *Broussonetia papyrifera* (L.) Vent pulp. The adsorption capacity of the adsorbent for zinc ions was determined using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Results showed that an adsorbent weight of 1.50 g and a contact time of 90 minutes yielded the highest zinc ion adsorption percentage at 95.37 %. The prepared adsorbent demonstrated the ability to adsorb zinc ions in the concentration range of 1-10 ppm, with adsorption capacities ranging from 0.08 to 0.86 mg/g. The adsorption isotherm for zinc ion removal was described by the Freundlich model, with experimental data yielding values for K, n, and R^2 of 0.47, 0.85, and 0.99, respectively. Therefore, it can be concluded that the tannin-immobilized *Broussonetia papyrifera* (L.) Vent pulp adsorbent is effective in removing heavy metals and holds promise for developing applications in wastewater treatment.

Keywords: adsorbent, tannin, zinc ion, banana peel, *Broussonetia papyrifera* (L.) Vent pulp

บทนำ

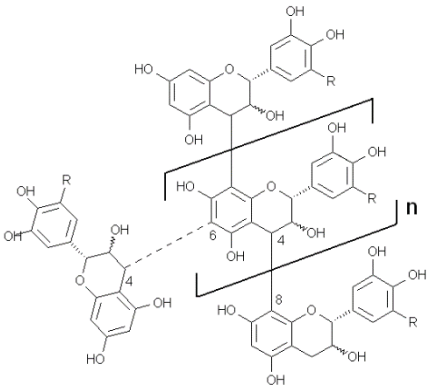
โลหะหนักมีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ อาทิ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ เป็นต้น ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งถือเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการเกิดปัญหามลพิษทางน้ำที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม [1-3] ปัจจุบันพบว่า มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้น โดยโลหะหนักเป็นพิษที่เจือปนมาในน้ำทิ้ง ได้แก่ ปรอท แคดเมียม โครเมียม ทองแดง และสังกะสี เป็นต้น [4-6] โดยสังกะสี (Zn) จัดเป็นโลหะหนักที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อเป็นโลหะโครงสร้าง หรือโลหะผสมกับโลหะอื่น สำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยและสารกำจัดศัตรูพืช อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมการชุบเคลือบโลหะ เป็นต้น [7-9] ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะสังกะสีก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ เพื่อป้องกันอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและเกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์

ในปัจจุบันวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสามารถทำได้หลากหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation process) กระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่น (membrane process) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange process) กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction process) และกระบวนการดูดซับ (adsorption process) และการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) เป็นต้น [2, 5, 10-13] ซึ่งมีข้อดี คือ เป็นวิธีการที่ง่ายและสามารถกำจัดไอออนที่สนใจได้แบบจำเพาะ แต่ต้องใช้สารเคมีจำนวนมาก มีขั้นตอนการแยกหลายขั้นตอน มีค่าดำเนินการและค่าบำรุงรักษาสูง และใช้เวลาดำเนินการค่อนข้างนาน [13] ปัจจุบันพบว่า การกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียนิยมใช้กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับ เนื่องจากเป็นกระบวนการกำจัดโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่ำ ขั้นตอนและวิธีการไม่ยุ่งยากซับซ้อน ต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพสมราคา โดยมุ่งเน้นการพัฒนาตัวดูดซับที่มาจากธรรมชาติและเป็นมิตรสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เช่น ถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และซากมวลชีวภาพและวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น แกลบ เปลือกถั่ว เปลือกข้าว และเปลือกกล้วย เป็นต้น [14-17]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงสนใจทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีไอออนของวัสดุดูดซับ ซึ่งเตรียมจากสารแทนนินจากเปลือกกล้วยที่ตรึงบนเส้นใยปอสา โดยสารแทนนินที่สกัดได้เป็นสารประกอบจำพวกโพลีฟีนอลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวนมาก จัดอยู่ในกลุ่มของคอนเดนซ์แทนนิน (condensed tannin) สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้วและยังมีคุณสมบัติการดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดีอีกด้วย [10, 18-19] ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างโมเลกุลได้ดังภาพที่ 1 โดยนำสารสกัดแทนนินมาตรึงบนเส้นใยปอสาที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญ คือ เส้นใยเซลลูโลสที่มีความเป็นขั้วสูงและมีสมบัติความชอบน้ำ ทำให้สามารถดูดซับและยึดเกาะกับสารชีวภาพได้ดี จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้น [5, 19-20] จากนั้น ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ของวัสดุดูดซับที่ได้เตรียมขึ้น นอกจากจะเป็นการนำเปลือกกล้วยที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกล้วยแปรรูปที่พบมากในเขตจังหวัดพิษณุโลกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาใช้เป็นตัวดูดซับไอออนโลหะหนักได้แล้ว ยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมวัสดุดูดซับสารสกัดแทนนินจากเปลือกกล้วยซึ่งตรึงบนเส้นใยปอสา
2. เพื่อศึกษาความสามารถการดูดซับสังกะสีไอออนของวัสดุดูดซับ



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลแทนนิน [21]

การดำเนินงานวิจัย

1. วัสดุ สารเคมี และเครื่องมือ

ในการศึกษาวิจัยนี้ทำการสกัดสารแทนนินจากเปลือกกล้วย โดยเลือกใช้กล้วยน้ำว้าดิบในพื้นที่ตำบลบ้านคลอง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก นำเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบมาล้างให้สะอาด ผึ่งไว้ให้แห้งแล้วนำมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ และบดให้ละเอียด นำไปอบให้แห้งสนิทที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

สารเคมีสำคัญที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (Unilab, Ajax Finechem) เอทานอลร้อยละ 99.9 (AR grade, RCI Labscan Ltd.) กรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 65 (AR grade, RCI Labscan Ltd.) และสารละลายมาตรฐานสังกะสี ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) (Lead Standard for AAS, VWR Chemicals BDH)

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสีไอออนในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer; AAS) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น PinAAcle 900F ประเทศสหรัฐอเมริกา

2. การสกัดสารแทนนินจากเปลือกกล้วย

ทำการสกัดสารแทนนินจากเปลือกกล้วย โดยนำเปลือกกล้วยที่เตรียมไว้หนัก 10 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายผสมของน้ำกลั่นและเอทานอล (อัตราส่วน 1:1) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เนื่องจากสารแทนนินสารสามารถละลายได้ดีในตัวทำลายที่มีขั้ว [17-18] นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้น กรองเอาเฉพาะส่วนที่เป็นสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำไประเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน

3. การเตรียมวัสดุดูดซับจากสารแทนนิน

นำเส้นใยปอสาหนัก 2 กรัม แช่ในสารละลายแทนนินที่เตรียมได้จากข้อ 2 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เส้นใยปอสาดูดซับสารแทนนินจนอิ่มตัว จากนั้นนำเส้นใยปอสาที่ตรึงด้วยแทนนินแล้วไปอบให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

4. การศึกษาความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนของวัสดุดูดซับ

ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับและไอโซเทอมของการดูดซับสังกะสีไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ของวัสดุดูดซับที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้สารละลายสังกะสี (pH=5) ในช่วงความเข้มข้น 1-10 ppm โดยการศึกษาผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับและเวลาในการดูดซับใช้สารละลายสังกะสีความเข้มข้น 10 ppm ซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงที่สุดของช่วงความเข้มข้นที่ใช้ในงานวิจัยสำหรับทำการศึกษา ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 การศึกษาผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับ

นำสารละลายสังกะสีความเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมวัสดุดูดซับปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นำสารละลายที่ได้หลังจากการดูดซับกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 จากนั้นเจือจางสารละลายที่กรองแล้วด้วยกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสีไอออนด้วยเครื่อง AAS

4.2 การศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ

นำสารละลายสังกะสีความเข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมวัสดุดูดซับปริมาณ 1.5 กรัม แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาที่แตกต่างกัน ได้แก่ 30 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ นำสารละลายที่ได้หลังจากการดูดซับกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 จากนั้นเจือจางสารละลายที่กรองแล้วด้วยกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีไอออนด้วยเครื่อง AAS

4.3 การศึกษาผลของระดับความเข้มข้นสารละลายของสังกะสี

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เตรียมขึ้นโดยใช้สารละลายสังกะสีความเข้มข้น 1, 3, 5, 7 และ 10 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้น เติมวัสดุดูดซับปริมาณ 1.5 กรัม และนำเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นำสารละลายที่ได้จากการดูดซับกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 จากนั้น เจือจางสารละลายที่กรองแล้วด้วยกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีไอออนด้วยเครื่อง AAS

4.4 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

นำผลการศึกษาวิจัยมาทำการวิเคราะห์ร้อยละการดูดซับไอออนโลหะหนัก ดังสมการที่ 1 [15]

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

ทำการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับสังกะสี ตามสมการที่ 2 [22]

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

ทำการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับสังกะสี ตามรูปแบบของสมการแลงเมียร์ ดังสมการที่ 3 [2]

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

ทำการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับสังกะสี ตามรูปแบบของสมการฟรุนดิช ดังสมการที่ 4 [23]

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

เมื่อ q_e คือ ค่าความสามารถในการดูดซับสังกะสีที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_o คือ ความเข้มข้นของสังกะสีเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นของสังกะสีที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรสารละลายสังกะสี (ลิตร)

W คือ น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)

q_m คือ ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

b คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

K คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

ผลการวิจัย

1. ผลการเตรียมวัสดุดูดซับจากสารแทนนิน

ผลการศึกษาการสกัดแทนนินจากเปลือกกล้วย พบว่า สารสกัดแทนนินที่ได้จากเปลือกกล้วยมีลักษณะเป็นสารละลายสีน้ำตาลแดง ดังภาพที่ 2 (ก) เนื่องจากแทนนินสามารถละลายได้ดีในน้ำ จึงไม่สามารถใช้กำจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสียได้โดยตรง ดังนั้น จึงต้องนำมาตรึงไว้บนวัสดุที่ไม่ละลายน้ำ เพื่อให้แทนนินสามารถดูดซับไอออนโลหะหนักได้ เมื่อพิจารณาโครงสร้างของแทนนิน ดังภาพที่ 1 พบว่า เป็นสารประกอบจำพวกโพลีฟีนอล โดยมีทั้งหมู่ไฮดรอกซิลและวงแหวนอะโรมาติก ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับเส้นใยปอสาที่มีองค์ประกอบกอบหลักเป็นเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ -OH ของแทนนินและหมู่ -OH ของเซลลูโลส [19-20] ดังนั้น จึงนำสารสกัดแทนนินมาตรึงบนเส้นใยปอสา เพื่อเตรียมเป็นวัสดุดูดซับ โดยนำเส้นใยปอสามาแช่ในสารละลายแทนนินจากเปลือกกล้วย พบว่า เส้นใยปอสาหลังแช่ในสารละลายแทนนินมีสีเข้มขึ้นมากกว่าเส้นใยปอสาก่อนแช่ในสาระลายแทนนินดังภาพที่ 2 (ข) ซึ่งแสดงถึงการเกาะของสารแทนนินบนเส้นใยปอสา

(ก) **(ข)**

ภาพที่ 2 แสดงลักษณะของ (ก) สารสกัดแทนนินจากเปลือกกล้วย และ (ข) เส้นใยปอสาก่อนและหลังแช่ในสารละลายแทนนินจากเปลือกกล้วย

2. ผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับ

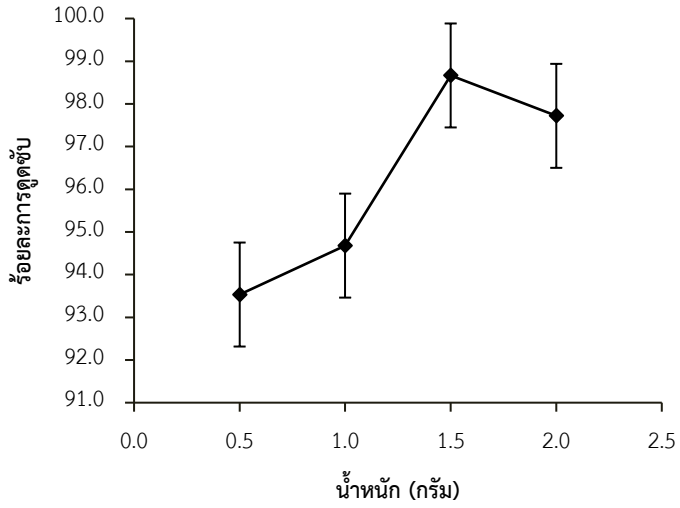
ผลการศึกษาน้ำหนักวัสดุดูดซับจากสารแทนนินที่ตรึงบนเส้นใยปอสาจากการดูดซับสังกะสีไอออน โดยใช้วัสดุดูดซับปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ด้วยเครื่อง AAS สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีหลังจากดูดซับด้วยวัสดุซับได้ดังตารางที่ 1 และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการดูดซับสังกะสีไอออนกับน้ำหนักวัสดุดูดซับ พบว่า ร้อยละการดูดซับสังกะสีไอออนมีค่าเท่ากับ 93.53, 94.68, 98.67 และ 97.72 เมื่อใช้วัสดุดูดซับปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงดังภาพที่ 3 เนื่องจากโครงสร้างของแทนนินประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ซึ่งสามารถจับกับสังกะสีไอออนในรูปของคีเลตคอมเพล็กซ์ (Chelate complex) ระหว่างแทนนินกับสังกะสีไอออนด้วยพันธะทางเคมีแบบโคออร์ดิเนชัน (coordination bond) อย่างไรก็ตาม แทนนินเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ ดังนั้น การนำ

แทนนินมาผ่านกระบวนการตรึงกับเส้นใยปอสาที่มีสมบัติไม่ละลายน้ำนั้น ช่วยให้วัสดุดูดซับสามารถดูดซับไอออนโลหะหนักในรูปของสารละลายได้ [6, 19] นอกจากนี้ การเพิ่มน้ำหนักของวัสดุดูดซับทำให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสังกะสีไอออนมากขึ้น วัสดุดูดซับจึงมีความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนได้มากขึ้น แต่เมื่อใช้น้ำหนักของวัสดุดูดซับที่มากเกินไป อาจส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากปริมาณสังกะสีไอออนที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับลดลง [24] ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ การใช้วัสดุดูดซับหนัก 1.5 กรัม มีค่าร้อยละการดูดซับสังกะสีไอออนมากที่สุด ดังนั้น จึงเลือกใช้วัสดุดูดซับหนัก 1.5 กรัม สำหรับทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีด้วยเครื่อง AAS โดยใช้วัสดุดูดซับที่มีน้ำหนักต่างกัน

น้ำหนักวัสดุดูดซับ (กรัม)	ความเข้นของสังกะสีไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าร้อยละการดูดซับ
0.5	0.65	93.53
1.0	0.53	94.68
1.5	0.13	98.67
2.0	0.23	97.72

หมายเหตุ ความเข้มข้นของสังกะสีไอออนเดิมวัสดุดูดซับ คือ 10 ppm



ภาพที่ 3 ผลของน้ำหนักวัสดุดูดซับที่มีต่อการดูดซับสังกะสีไอออน

2. ผลของเวลาในการดูดซับ

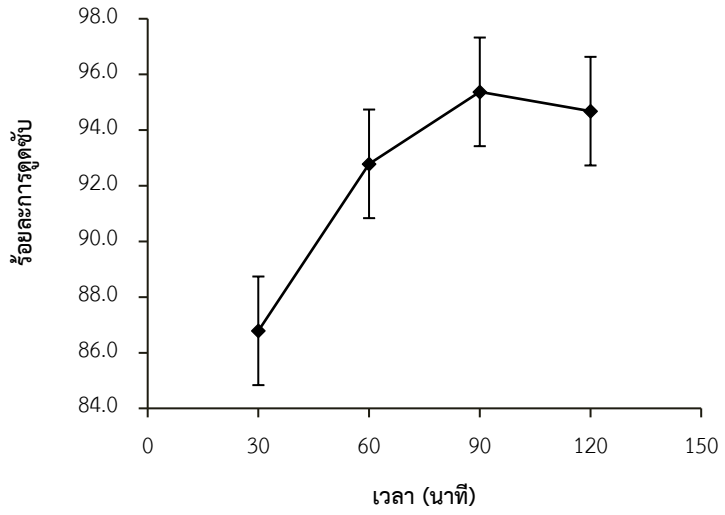
เมื่อได้น้ำหนักวัสดุดูดซับที่เหมาะสมแล้ว หลังจากนั้น ได้ทำการเตรียมวัสดุดูดซับขึ้นใหม่ จากนั้น จึงนำมาทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโดยใช้เวลาในการดูดซับแตกต่างกัน ได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ จากการใช้เครื่อง AAS ได้แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีได้ดังตารางที่ 2 พบว่า ร้อยละการดูดซับสังกะสีไอออน เท่ากับ 86.79, 92.79, 95.37 และ 94.68 ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4 เมื่อพิจารณาผลของเวลาในการดูดซับ พบว่า ความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยเวลาในการดูดซับ 90 นาที มีค่าร้อยละการดูดซับสังกะสีไอออนมากที่สุด เนื่องจากไอออนของสังกะสีสามารถแพร่ไปยังตำแหน่งที่ว่องไวในการดูดซับของวัสดุดูดซับได้เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาในการดูดซับเป็น 90 ถึง 120 นาทีนั้น ความสามารถในการดูดซับ

สังกะสีไอออนมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากอัตราการดูดซับและการคายออกระหว่างสังกะสีไอออนกับวัสดุดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยพื้นผิวของวัสดุดูดซับเต็มไปด้วยสารที่ถูกดูดซับในขณะที่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับลดลง [7, 24] ดังนั้น ในการวิจัยนี้ จึงเลือกใช้เวลาในการดูดซับสังกะสีไอออน 90 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตาม วัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นในแต่ละครั้งอาจมีปริมาณแทนนินที่ตรึงบนเส้นใยปอสาไม่เท่ากัน จึงอาจทำให้ค่าร้อยละการดูดซับสังกะสีไอออนแตกต่างกัน แต่ยังคงให้ผลใกล้เคียงกัน [25]

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีด้วยเครื่อง AAS โดยใช้เวลาในการดูดซับที่แตกต่างกัน

เวลาในการดูดซับ (นาที)	ความเข้นของสังกะสีไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าร้อยละการดูดซับ
30	1.32	86.79
60	0.72	92.79
90	0.46	95.37
120	0.53	94.68

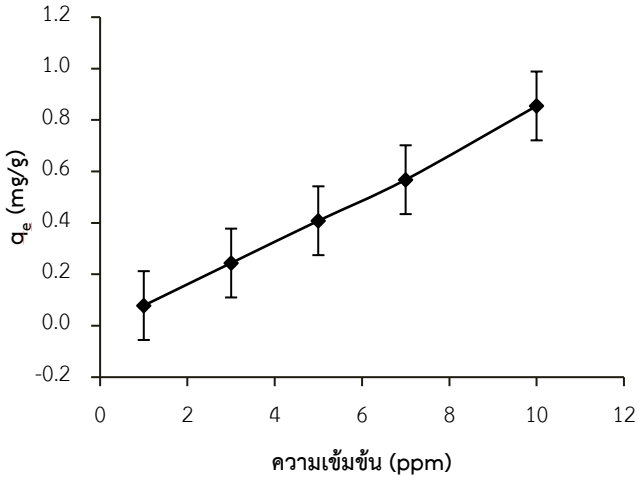
หมายเหตุ ความเข้มข้นของสังกะสีไอออนที่เวลา 0 นาที คือ 10 ppm



ภาพที่ 4 ผลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับสังกะสีไอออน

3. ผลของระดับความเข้มข้น

เมื่อพิจารณาภาพที่ 5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนที่ความเข้มข้น 1-10 ppm โดยใช้วัสดุดูดซับปริมาณ 1.5 กรัม และเวลาในการดูดซับ 90 นาที พบว่า ความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีเพิ่มขึ้น โดยค่าความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนที่สมดุล (q_e) มีค่าเท่ากับ 0.08, 0.24, 0.41, 0.57 และ 0.86 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้สารละลายสังกะสีความเข้มข้น 1, 3, 5, 7 และ 10 ppm ตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้มีจำนวนไอออนของสังกะสีที่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนมากขึ้น [11]



ภาพที่ 5 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีไอออนของวัสดุดูดซับที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

4. ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

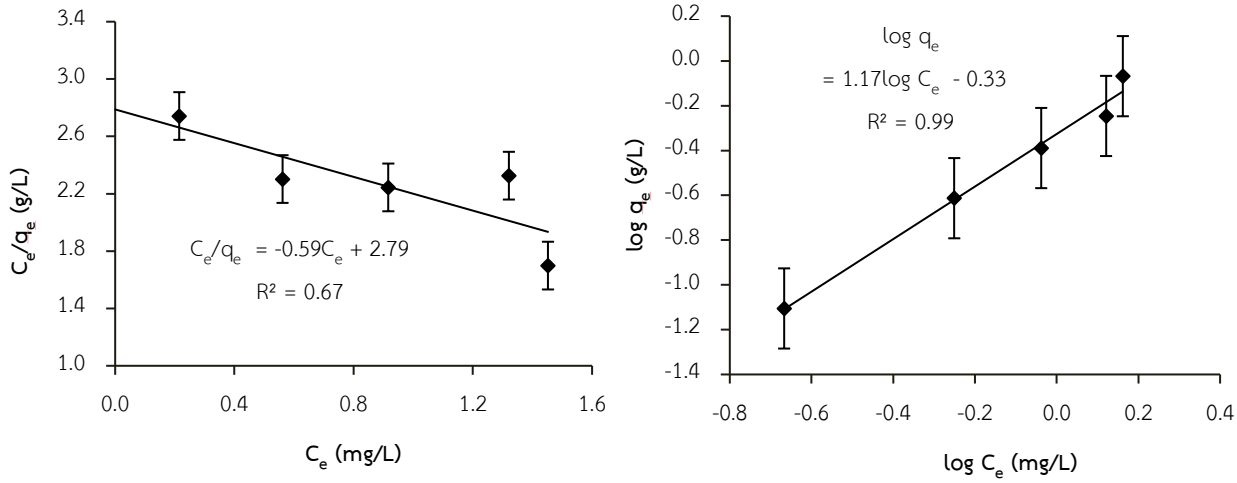
ภาพที่ 6 แสดงกราฟไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีไอออนของวัสดุดูดซับตามรูปแบบของสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่า มีค่าจุดตัดแกน Y ที่ X = 0 (intercept) เท่ากับ 2.79 และ -0.33 ตามลำดับ โดยค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับตามของสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีความใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่า การดูดซับสังกะสีไอออนของวัสดุดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชมากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยมีค่า R^2 = 0.99 แสดงว่า พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด ลักษณะของการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) และการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่ไม่สามารถผันกลับได้ [24]

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีไอออนตามสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ไอโซเทอมการดูดซับ	ไอโซเทอมพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์	q_m	-1.69
	b	-0.21
	R^2	0.67
ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช	K	0.47
	n	0.85
	R^2	0.99

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ สามารถเตรียมวัสดุดูดซับจากวัสดุธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งหาได้ง่าย ราคาถูก ขั้นตอนการเตรียมไม่ยุ่งยาก และใช้สารเคมีที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยสกัดแทนนินจากกล้วยน้ำว้าดิบที่มีความสามารถในการจับกับไอออนของโลหะหนักนำมาตรึงบนเส้นใยปอสา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับ ในการดูดซับสังกะสีไอออน พบว่า สามารถดูดซับสังกะสีไอออนที่ช่วงความเข้มข้น 1-10 ppm โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 0.08 - 0.86 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า



(ก) **(ข)**

ภาพที่ 6 ไอโซเทอมการดูดซับ (ก) แบบแลงเมียร์ และ (ข) แบบฟรุนดลิช ของวัสดุดูดซับในการดูดซับสังกะสีไอออน

วัสดุดูดซับจากสารแทนนินที่ตรึงบนเส้นปอสานั้น สามารถกำจัดโลหะหนักได้โดยใช้ต้นทุนต่ำ เนื่องจากเป็นวัสดุจากธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางพัฒนาประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมการชุบเคลือบโลหะ เป็นต้น ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

แนวทางการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์และการต่อยอดการวิจัย ผู้วิจัยควรศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับก่อนและหลังกระบวนการดูดซับ ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีไอออนของเส้นใยปอสา โดยเปรียบเทียบสารแทนนินที่ตรึงบนเส้นใยปอสา ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ อุณหพลศาสตร์ ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับในการดูดซับไอออนโลหะหนักชนิดอื่น ๆ และตัวอย่างน้ำเสียในสภาวะแวดล้อมจริง และการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ โดยศึกษาการใช้งานซ้ำของวัสดุดูดซับหลังการกำจัดโลหะหนักออกจากวัสดุดูดซับก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ รวมทั้งการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของงานวิจัยทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อนำข้อมูลไปใช้เป็นแนวทางในการเตรียมวัสดุดูดซับจากวัสดุธรรมชาติสำหรับการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ในการนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันวิจัยวิจัยและพัฒนา และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ เอื้อเฟื้อสถานที่ และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] กานต์มณี ทองศรี, นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, คณิตา ตังคณานุรักษ์ และวัชรพงษ์ วาระรัมย์, “การเตรียมซิลิกาซีโรเจลจากเถ้าแกลบเคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์เพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย,” *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, ปีที่ 18, ฉ. 4, น. 51-60, 2561.

[2] รัฐพล หงส์เกรียงไกร, อุษารัตน์ คาทับทิม, วิรัญญา เดชอุดม และวราวุฒิ หวังแววกลาง, “การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวดูดซับใบผักแพว,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.ธัญบุรี*, ปีที่ 9, ฉ. 1, น. 31-39, 2562.

[3] L. Xu, X. Xing and J. Peng, “Removal of Zn^{2+} from aqueous solution using biomass ash and its modified product as biosorbent,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 15, 2022.

[4] อาภัสรา สิงห์ยะบุศย์, สมปอง ทองงามดี และรุ่งทิวา ชิดทอง, “การกำจัดโลหะหนักโครเมียมและสังกะสีในน้ำเสียตัวอย่างด้วยผักตบชวาโดยเทคนิคอะตอมมิกแอพซอร์พชันสเปกโทรโฟโทเมทรี,” ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 12 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม*, นครปฐม, 2563, น. 307-313.

[5] Z. Raji, A. Karim, A. Karam and S. Khalloufi, “ Adsorption of heavy metals: mechanisms, kinetics, and applications of various adsorbents in wastewater remediation” *Waste*, vol.1, no. 3, pp. 775-805, 2023.

[6] W. Jiang, Y. Xing, T. Wang, J. Liao, J. He, W. Chen, J. Wang and L. Mo, “Green synthesis of tannin-polyethylenimine adsorbent for removal of Cu(II) from aqueous solution,” *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 65, pp. 5593-5605, 2020.

[7] นราทิพย์ รักษ์เดช, "การดูดซับไอออนสังกะสีจากน้ำเสียด้วยผงเหล็กช็อตบลาสท์และตะกรันอลูมิเนียมเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์,” ปริญญานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2561.

[8] พิณิตตา ผลาทิพย์, “การดูดซับโลหะหนักด้วยเส้นใยประดิษฐ์ดัดแปร,” ปริญญานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2559.

[9] F. Mulana, Mariana, A. Muslim, M. Mohibah and K. H. K. Halim, “ Removal of zinc (II) ion from aqueous solution by adsorption onto activated palm midrib bio-sorbent,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 334, 012027, 2018.

[10] V. U. Kavitha and B. Kandasubramanian, “ Tannins for wastewater treatment,” *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 1081, 2020.

[11] พนิดา สามพรานไพบูลย์, จารุวรรณ เหล็กเพชร และวัลย์วิสา นาคสมบูรณ์, “การดูดซับสังกะสีไอออนออกจากน้ำทิ้งจากการชุบโลหะด้วยเยื่อกระดาษ,” ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2557*, กรุงเทพฯ, 2557, น. 253-258.

[12] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, *รายงานการวิจัยการดูดซับโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผงไผ่และการดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์.* กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2561.

[13] เบญจวรรณ นิลวงค์ และกรรณิการ์ แก้วกิ้ม, “การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยระบบบึงประดิษฐ์และตัวดูดซับทางชีวภาพ,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ*, ปีที่ 2, ฉ. 2, น. 52-61, 2559.

[14] ประกร รามกุล, “นวัตกรรมตัวดูดซับแทนนิน,” *วิศวกรรมสาร มก.*, ปีที่ 23, ฉ. 72, น. 17-29, 2553.

[15] อดิศักดิ์ คิริรักษ์, “การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสีคริสตัลไวโอเลต,” ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2561.

[16] S. C. R. Santos, H. A. M. Bacelo, R. A. R. Boaventura and C. M. S. Botelho, “Tannin-adsorbents for water decontamination and for the recovery of critical metals: Current state and future perspectives,” *Biotechnology Journal*, vol. 2019, 1900060, 2019.

[17] มาริสา ทองหล่อง, ถิรวัฒน์ ยี่สุ่นแก้ว, กุลวดี ปิ่นวัฒนะ, อัญชนา ปรีชาวรพันธ์ และรพิพรรณ จันทร์มะณี, “ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับทางชีวภาพจากสารแทนนินที่ตรึงบนเส้นใยปอสาในการกำจัดไอออนตะกั่ว,” *วารสารวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี*, ปีที่ 16, ฉ. 2, น. 11-21, 2562.

[18] วิภา สุโรจะเมธากุลม และชิดชม ฮิรางะ, “การสกัดแทนนินจากเปลือกกล้วย,” *วารสารเกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์*, ปีที่ 28, ฉ. 4, น. 578-586, 2537.

[19] W. Luo, H. Lin, Z. Wu, J. Chen, R. Chi, X. Ye and J. Chen, “Preparation and physicochemical properties of tannin-immobilized membrane adsorbent,” *Applied Sciences*, vol. 2021, no. 11, 9684, 2021.

[20] K. T. Guerdelli, C. Lacoste, D. Perrin, P J. Liotier, P. Ouagne, J. Tirillò, F. Sarasini and A. Bergeret, “ Tannins as biobased molecules for surface treatments of flax wrapped rovings for epoxy/flax fabrics biocomposites: Influence on mechanical properties through a multi-scale approach,” *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 2, 2024.

[21] Wikipedia, (2023, 22 December), Condensed Tannin, [Online]. จาก: https://en.wikipedia.org/wiki/Condensed_tannin.

[22] พลากร บุญใส และเกรียงไกร บรรจงเมือง, “ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลโดยซีโอไลต์ชนิด SUZ-4 ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบ,” *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, ปีที่ 18, ฉ. 3, น. 64-71, 2558.

[23] โชติญา กุลแก้ว, นิศากานต์ หิมพล, จุฑาทิพย์ ดีระสาน, สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์ และอาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์, “การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์เจลแทนนินจากสารสกัดจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัส,” *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, ปีที่ 20, ฉ. 1, น. 76-89, 2563.

[24] ยุพดี เส้นขาว, “การกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียด้วยมะขามและเปลือกทับทิม,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 22, ฉ. 2, น. 184-201, 2557.

[25] รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทย์ ปิยะมังคลา, “จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมททิลีนบลูโดยใช้แกลบดัดแปร,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 21, ฉ. 2, น. 337-348, 2554.