

การดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้รากและลำต้นผักตบชวา ที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน

Adsorption of copper from synthetic wastewater using water hyacinth roots and stems modified with chitosan

ปรีชา ปัญญา^{1*} และสุพัตรา ราชฤทธิ์¹

Preecha Panya^{1*} and Suphattra Rachcharit¹

¹โปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร 62000

¹Program in Chemistry, Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University,

Kamphaeng Phet Province 62000

*Corresponding author Email : preecha@kpru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวดูดซับจากรากและลำต้นของผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซานซึ่งมีความสำคัญในการเพิ่มพื้นที่ผิวและมีหมู่ฟังก์ชันที่จับยึดไอออนโลหะหนักได้ ศึกษาพื้นที่ผิวตัวดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า พื้นที่ผิวของลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซานมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ลำต้นที่ไม่ปรับ รากที่ไม่ปรับ และรากที่ปรับ ตามลำดับ ซึ่งมีค่า 350.1, 283.3, 281.2 และ 116.3 m²/g ตามลำดับ พบว่าสอดคล้องกับผลขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นนำไปศึกษาการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้การดูดซับแบบแบทช์ พบว่า ปริมาณการดูดซับทองแดงโดยใช้ลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงจะมีปริมาณการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 44.82 mg/g รองลงไปได้แก่ ลำต้นที่ไม่ปรับ รากที่ไม่ปรับ และรากที่ปรับ ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณการดูดซับทองแดงเท่ากับ 20.99, 17.07 และ 14.25 mg/g ตามลำดับ พฤติกรรมการดูดซับทองแดงบนรากเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ส่วนลำต้นเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น สรุปได้ว่าการปรับปรุงวัสดุดูดซับจากรากและลำต้นด้วยไคโตซานช่วยให้ปริมาณการดูดซับทองแดงดีขึ้น

คำสำคัญ : การดูดซับ, ผักตบชวา, ไคโตซาน, แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม, ฟรุนดิชไอโซเทอร์ม

Abstract

The purpose of this research was to study the copper adsorption in synthetic wastewater using roots and stems of water hyacinth modified with chitosan which is important in increasing the surface area and having functional groups that can bind heavy metal ions. The surface area of the adsorbent was studied by using the Langmuir isotherm of methylene blue adsorption. The morphology and functional groups of the adsorbent were characterized using scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results showed that the surface area of chitosan-modified stems water hyacinth was the highest, followed by unmodified stems, unmodified roots, and modified roots, with values of 350.1, 283.3, 281.2,

and 116.3 m²/g, respectively. These results corresponded with the pore size of the adsorbents obtained from scanning electron microscopy. Finally, the copper adsorption in syntactic wastewater was studied using a batch adsorption method. The results revealed that the chitosan-modified stems water hyacinth showed the highest adsorption capacity of 44.82 mg/g, followed by unmodified stems, unmodified roots, and modified roots, with adsorption capacities of 20.99, 17.07, and 14.25 mg/g, respectively. The copper adsorption on roots fits to monolayer Langmuir model while stems follow the Freundlich isotherm, indicating multilayer adsorption. In conclusion, the modification of the stem adsorbent with chitosan improved the copper adsorption capacity

Keywords : adsorption, water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), chitosan, Langmuir isotherm, Freundlich isotherm.

บทนำ

การดูดซับ (adsorption) เป็นกลไกสำคัญในการกำจัดสารพิษ เช่น โลหะหนัก จากน้ำในระบบสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตัวดูดซับ (absorbent) ทำจากวัสดุเหลือใช้หรือวัสดุชีวภาพนำมาปรับใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น กลไกการดูดซับเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนประจุ ความซับซ้อนเชิงเคมี และปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณการดูดซับ นอกจากนี้งานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุดูดซับที่ยังชี้ให้เห็นว่าการปรับโครงสร้างผิวตัวดูดซับสามารถเพิ่มสมรรถนะการดูดซับได้อย่างมีนัยสำคัญ

ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) เป็นพืชน้ำที่แพร่กระจายอย่างรวดเร็วและก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม เช่น การอุดตันทางน้ำ และลดการหมุนเวียนออกซิเจนในระบบนิเวศ จากสภาพแหล่งน้ำคลองภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร พบว่ามีผักตบชวาอยู่ในปริมาณมาก จึงต้องมีการกำจัดอยู่เป็นระยะ ๆ อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติของผักตบชวาที่มีชีวมวลสูง และโครงสร้างที่อุดมไปด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ผักตบชวาจึงมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับสารมลพิษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหนัก ดังนั้นการเปลี่ยนผักตบชวาจากวัชพืชที่สร้างปัญหาให้เป็นวัสดุที่มีประโยชน์จึงเป็นแนวทางการศึกษาในปัจจุบัน

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีรายงานวิจัยที่แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของผักตบชวาในการดูดซับโลหะหนัก เช่น งานของ González-Tavares et al., (2023) รายงานว่าผักตบชวาที่ผ่านการเตรียมโดยการปรับสภาพด้วยน้ำและ NaOH สามารถดูดซับ Cu(II) และ Ni(II) ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สูงมาก อีกรายงานหนึ่งจาก Huynh et al., (2021) พบว่า ผักตบชวาสามารถดูดซับโลหะหนัก Cd, As, Pb, Zn และ Cu ได้ถึง 59–92% หลังทดลองใช้บำบัด 30 วันในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. นอกจากนี้ Murmu et al., (2024) รายงานว่าผักตบชวามีความสามารถในการกำจัด Pb และ Hg ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่ใช้ผักตบชวาที่ถูกปรับปรุงร่วมกับไคโตซานไคโตซานซึ่งมีความสำคัญในการเพิ่มพื้นที่ผิวและมีหมู่ฟังก์ชันที่จับยึดไอออนโลหะหนักได้ ได้แก่ Pisitsak et al., (2019) ได้เตรียมวัสดุจากไคโตซานและเส้นใยจากใบผักตบชวาเพื่อใช้ดูดซับโลหะ Cu(II) พบว่าสามารถดูดซับ Cu(II) ได้ดีกว่าไคโตซานเดี่ยวถึง 5 เท่า และ Chaiyaraksa et al., (2019) รายงานว่าการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ไคโตซาน-แม่เหล็กที่สังเคราะห์จากผักตบชวาสามารถกำจัด Cu และ Ni จากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีงานวิจัยที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ Cu(II) ของรากและลำต้น ผักตบชวาอย่างชัดเจน วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้จึงศึกษาการดูดซับทองแดง Cu(II) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้

วัสดุดูดซับจากรากและลำต้นผักตบชวาเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับรากและลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน ศึกษาคุณสมบัติเชิงพื้นผิวและโครงสร้างจาก SEM และ FT-IR ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อหาพฤติกรรมการดูดซับของแข็งในน้ำเสีย ซึ่งจะเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากวัสดุชีวภาพที่มีต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการบำบัดน้ำเสียต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1) ไคโตซาน (Chitosan from Shrimp Shells) Himedia, India 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) Merck, Germany 3) เมทิลีนบลู (Methylene blue) 80% Lab Grade, May & baker Ltd., Dagenham, England 4) กรดอะซิติก (Acetic acid) 98% A.R. Grade Merck, Germany 5) สารละลาย Cu (II) (Copper (II) sulphate) 249.68 g/mol A.R. grad. Asia Pacific Specialty Chemical, Australia.

2. การเตรียมวัสดุดูดซับ (รากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน)

เก็บรากหรือลำต้นผักตบชวานำมาล้างด้วยน้ำสะอาด นำมาหั่นให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำผักตบชวาที่แห้งแล้วมาต้มด้วย 2% NaOH ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชมีค่าเท่ากับน้ำกลั่นที่ใช้ล้าง อบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่นำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช จะได้วัสดุดูดซับจากรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับปรุง สำหรับการเตรียมวัสดุดูดซับจากรากและลำต้นของผักตบชวาที่เคลือบด้วยไคโตซาน เริ่มจากนำ 2 g ของไคโตซานละลายใน 3% กรดอะซิติก 500 mL กวนทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เติมผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับปรุง 10 g ใส่ลงไปกวนต่ออีก 24 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชคงที่ (pH =5.5) นำไปอบจนน้ำหนักคงที่

3. การทดลองการดูดซับเมทิลีนบลูบนผักตบชวาเพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับ

ชั่งผักตบชวา 0.2xxx g (อย่างละเอียด) ใส่ในขวด Polyethylene ขนาด 125 mL เขียนหมายเลขกำกับไว้ เติมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ pH =5.5 ลงไปในขวด Polyethylene ปิดฝา แล้วนำไปเข้าเครื่องผสมสารแบบหมุน (Roller mixer) ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer (SHIMADZU รุ่น UV-1800 ประเทศญี่ปุ่น) ที่ความยาวคลื่น 660 nm เทียบกับกราฟมาตรฐานของการดูดกลืนแสงจากสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู คำนวณปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู และศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ดังสมการ (ปรีชา, 2557)

$$\text{สูตรคำนวณหาปริมาณการดูดซับ} \quad q = \frac{(C_0 - C_{eq})V}{M} \quad (1)$$

เมื่อ q = ปริมาณการดูดซับที่สมดุล C_0 = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเริ่มต้น C_{eq} = ความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกละลาย V = ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการดูดซับ M = มวลของตัวดูดซับ

สูตรการคำนวณหาพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

$$S_{MB} = (N_s \times a_{MB} \times N_A \times 10^{-20})/M \quad (2)$$

เมื่อ S_{MB} = ค่าพื้นที่ผิว (m^2/g) N_s = จำนวนโมลเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว $a_{MB} = 197.2$ ($^{\circ}A^2$) N_A = เลขอาโวกาโดร = $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ M = มวลโมเลกุลของเมทิลีนบลู 373.9 g/mol

สูตรการคำนวณสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

$$\frac{C_{eq}}{q} = \left(\frac{1}{Kq_m} \right) + \left(\frac{C_{eq}}{q_m} \right) \quad (3)$$

เมื่อ q_m = ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g) K_L = ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์

สูตรการคำนวณหาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช

$$q_{eq} = K_F \cdot C_{eq}^{1/n} \quad (4)$$

เมื่อ K_F = ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรุนดิช n = ค่าคงที่

4. การหาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับโดยใช้วิธี FTIR

เตรียมตัวอย่างวัสดุดูดซับที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ที่อยู่ในสถานะของแข็ง บดตัวอย่างให้มีความละเอียดในโกร่งบดสาร นำตัวอย่างใส่เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared ยี่ห้อ Bruker รุ่น Alpha II ประเทศเยอรมนี) เริ่มการวัดโดยเครื่องจะส่งแสงอินฟราเรดผ่านตัวอย่าง เครื่องจะประมวลผลและวิเคราะห์ออกมาเป็นสเปกตรัม

5. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวตัวดูดซับของรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซาน

ติดเทปคาร์บอนสองหน้าแทนติดชิ้นงาน ตักตัวอย่าง (วัสดุดูดซับ) มาใส่ภาชนะ คว่ำแทนติดชิ้นงานที่ติดเทปคาร์บอนสองหน้าให้ผิวหน้าของเทปคาร์บอนสองหน้าสัมผัสกับอนุภาคของวัสดุดูดซับ ใช้ลูกยางเป่าส่วนที่ไม่ติดออกไป นำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT200 ประเทศญี่ปุ่น)

6. การศึกษาการดูดซับสารละลายทองแดงบนวัสดุดูดซับรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซาน

ศึกษาการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้การดูดซับแบบแบทช์ (Batch Method) ซึ่งน้ำหนักวัสดุดูดซับจากผักตบชวาลงไปในขวด Polyethylene 0.1xx กรัม (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) เติมสารละลายทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจาก Copper (II) Sulphate ที่ความเข้มข้นต่างๆกันที่ pH = 5.5 ลงไปในขวด Polyethylene ขวดละ 50 mL นำไปเขย่าด้วยเครื่อง Roller mixer ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 60 นาที เสร็จแล้วนำมารองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis ที่ความยาวคลื่น 808.0 nm นำค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยไปคำนวณความเข้มข้นที่สมดุลของทองแดง โดยใช้สมการจากกราฟมาตรฐาน จากนั้นคำนวณปริมาณการดูดซับและไอโซเทอร์มการดูดซับ

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาหาพื้นที่ผิวของรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซานโดยวิธีการศึกษาการดูดซับเมทิลินบลู

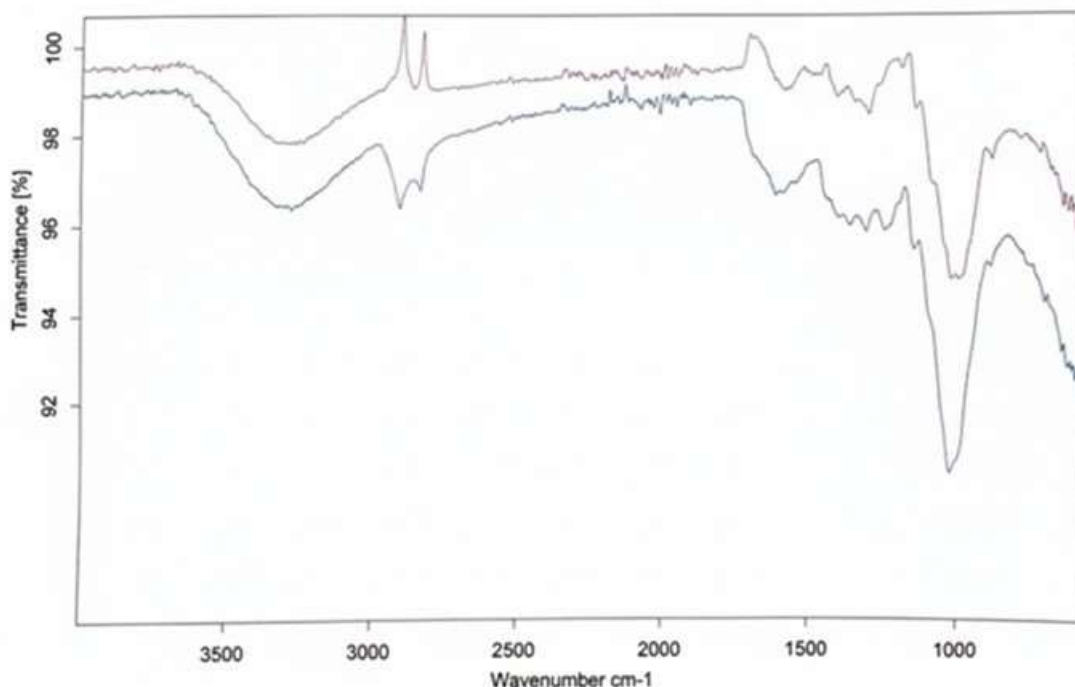
ตารางที่ 1 พื้นที่ผิวและค่าคงที่จากไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้รากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซาน

ชนิดของตัวดูดซับ	ค่าคงที่แบบแลงเมียร์			พื้นที่ผิว (m ² /g)
	q _m	K _L	R ²	
รากที่ไม่ปรับปรุง	75.76	0.2598	0.9997	281.2
รากที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน	31.35	2.4538	0.995	116.3
ลำต้นที่ไม่ปรับปรุง	76.34	0.1421	0.9845	283.3
ลำต้นที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน	94.34	0.1213	0.9850	350.1

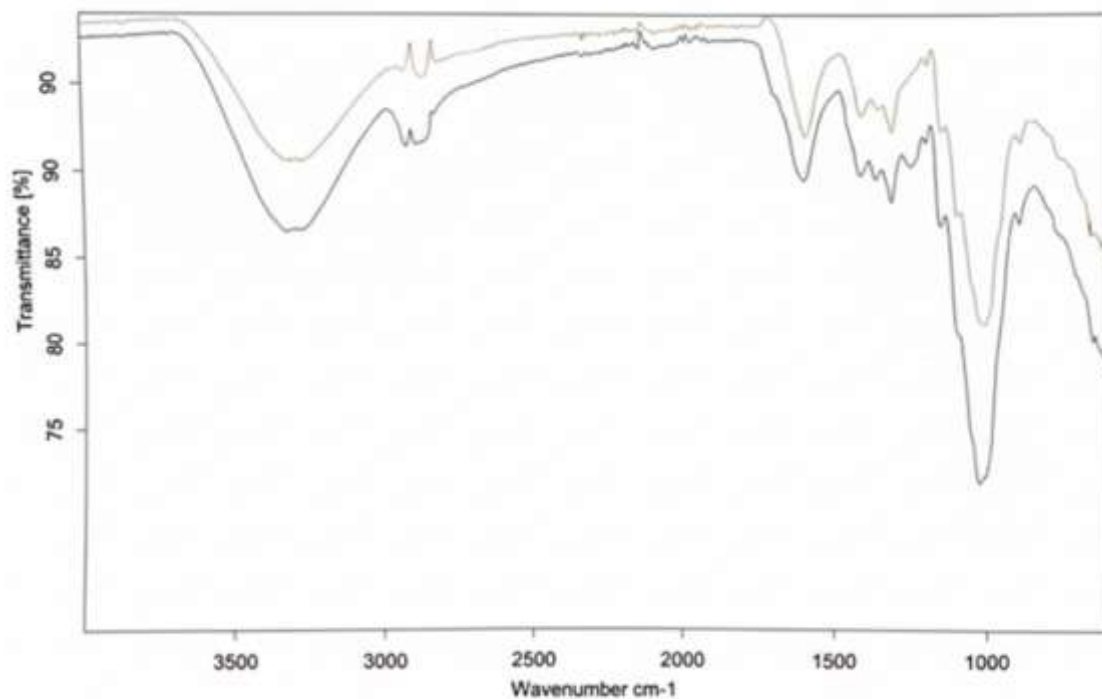
ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซานแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน มีพื้นที่ผิวสูงสุด รองลงมาได้แก่ ลำต้นที่ไม่ปรับปรุง รากที่ไม่ปรับปรุง และรากที่ปรับปรุง ตามลำดับ

2. ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างของวัสดุดูดซับโดยใช้ FTIR

จากการศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับจากรากผักตบชวาและลำต้นผักตบชวาทั้งที่ไม่ปรับปรุงและที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน ในช่วงเลขคลื่นความถี่ 500-4,000 cm⁻¹ ได้ผลดังภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2 ตามลำดับ

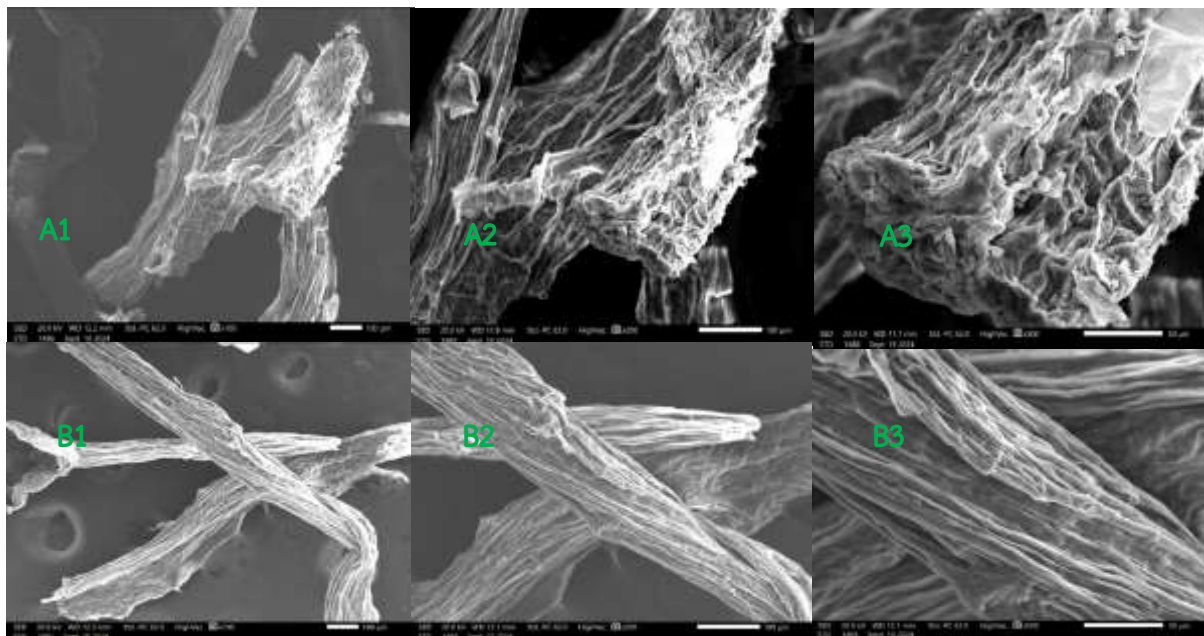


ภาพที่ 1 FTIR spectrum ของวัสดุดูดซับจากรากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุง (เส้นบน) และรากผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน (เส้นล่าง)

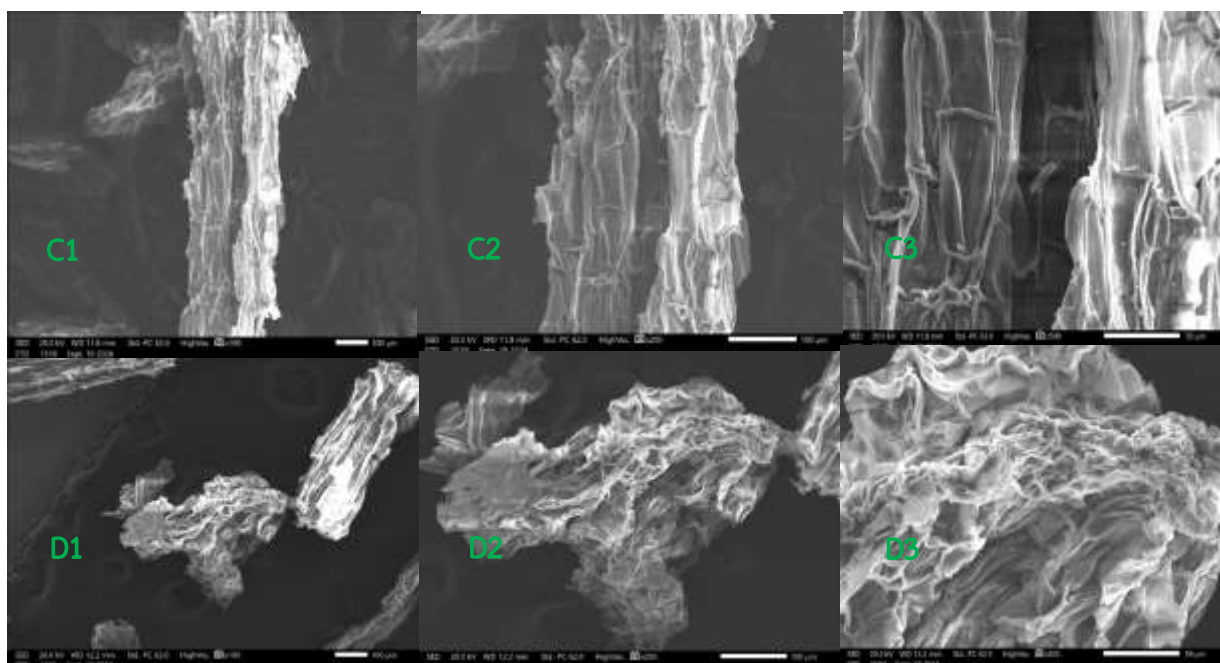


ภาพที่ 2 FTIR spectrum ของวัสดุดูดซับจากลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุง (เส้นบน) และลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน (เส้นล่าง)

3. ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซาน



ภาพที่ 3 ภาพ SEM แสดงโครงสร้างสัณฐานวิทยาของรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุง (A1, A2, A3 ที่กำลังขยาย 100x, 200x, 500x) , และลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน (B1, B2, B3 ที่กำลังขยาย 100x, 200x, 500x)



ภาพที่ 4 ภาพ SEM แสดงโครงสร้างสัณฐานวิทยาาก่อนดูดซับไคโตซาน ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุง (C1, C2, C3 ที่กำลังขยาย 100x, 200x, 500x) , และตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน (D1, D2, D3 ที่กำลังขยาย 100x, 200x, 500x)

ภาพที่ 1 พบว่า สเปกตรัมของรากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุง มีช่วงการสั่นของหมู่ O-H stretching ในช่วงเลขคลื่น $3,250\text{ cm}^{-1}$ และแถบการสั่นเนื่องมาจากหมู่ C-H stretching อยู่ในช่วงเลขคลื่น $2,800\text{--}2,990\text{ cm}^{-1}$ แถบการสั่นจากหมู่ C-O stretching ในช่วงเลขคลื่น $1,595\text{ cm}^{-1}$ ในขณะที่รากผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซานมีแถบการสั่นที่แตกต่างออกไปจากที่ไม่ปรับปรุง ได้แก่หมู่ O-H stretching และ N-H stretching ในช่วงเลขคลื่นที่เลื่อนเป็น $3,200\text{--}3,500\text{ cm}^{-1}$ และมีการสั่นของหมู่ C-N stretching ในช่วงเลขคลื่น $1,200\text{--}1,260\text{ cm}^{-1}$

ส่วนภาพที่ 2 พบว่า ลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซานมีแถบการสั่นของหมู่ O-H stretching และ N-H stretching ในช่วงเลขคลื่นที่เลื่อนไปจากลำต้นที่ไม่ปรับปรุง และมีการสั่นของหมู่ C-N stretching ในช่วงเลขคลื่น $1,200\text{--}1,260\text{ cm}^{-1}$

จากภาพที่ 3 พบว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจากรากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุง มีพื้นผิวลักษณะขรุขระ มีรูพรุนมาก และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจากรากผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน พบว่า พื้นที่ผิวมีลักษณะหยาบและเรียบ มีรูพรุนน้อยมาก โดยขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัสดุทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 2

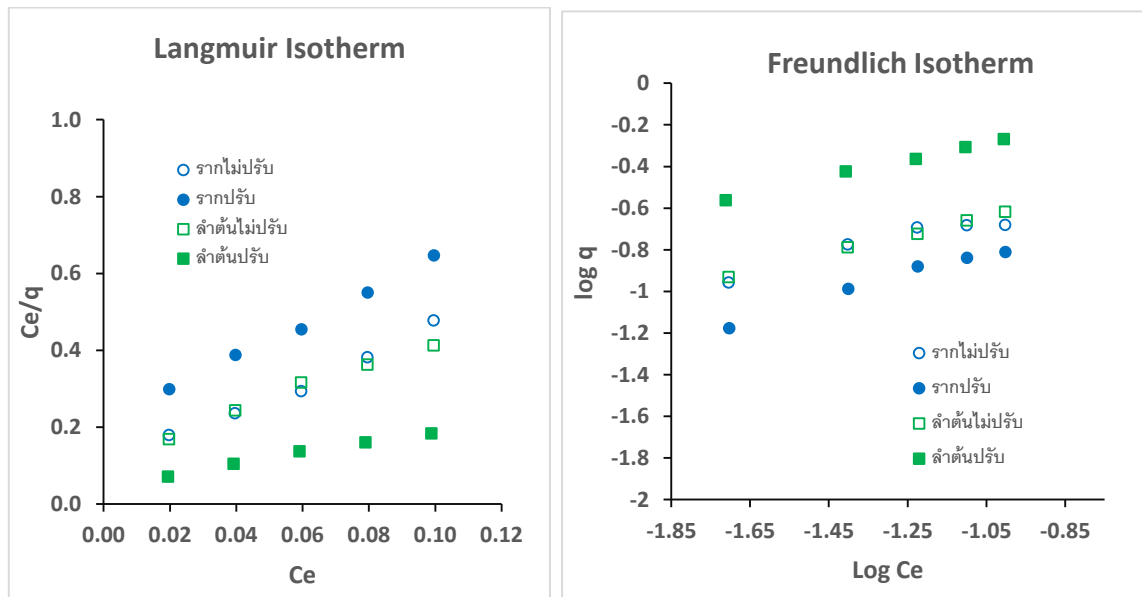
จากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุง พบว่า พื้นที่ผิวมีลักษณะหยาบและเรียบ มีรูพรุนน้อยมาก และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน พบว่า พื้นที่ผิวมีลักษณะขรุขระ มีรูพรุนมาก โดยขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัสดุทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิดจากเครื่อง SEM

ชนิดตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ขนาดรูพรุน (μm)					เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
		1	2	3	4	5	
รากที่ไม่ปรับปรุง	281.2	3.950	4.603	4.822	4.785	3.722	4.376±0.507
รากที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน	116.3	2.462	2.837	1.833	2.541	3.092	2.553±0.474
ลำต้นที่ไม่ปรับปรุง	283.3	5.781	4.480	3.932	4.377	4.229	4.559±0.713
ลำต้นที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน	350.1	7.519	7.641	6.687	7.449	6.498	7.159±0.526

4. ผลการศึกษาการดูดซับทองแดงด้วยวัสดุดูดซับจากรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซาน

การดูดซับสารละลายทองแดงด้วยวัสดุดูดซับจากรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซาน พบว่า พฤติกรรมการดูดซับของรากทั้งสองตัวดูดซับเป็นแบบไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ เนื่องจากค่าความเป็นเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ส่วนการดูดซับของลำต้นทั้งสองตัวดูดซับเป็นไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์จากการดูดซับตามสมการแลงเมียร์และฟรุนดิชได้ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (ซ้าย) และแบบฟรุนดิช (ขวา) การดูดซับทองแดงโดยใช้รากและลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์การดูดซับจากสมการแลงเมียร์และฟรุนดิชในการดูดซับทองแดงโดยใช้รากและลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน

ชนิดของผักตบชวา	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช		
	$q_{\max}$ (mg/g)	K_L	R^2	n	K_F	R^2
รากที่ไม่ปรับปรุง	17.066	0.6390	0.9843	2.4468	0.5865	0.9116
รากที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน	14.252	0.3333	0.9964	1.8741	0.5600	0.9819
ลำต้นที่ไม่ปรับปรุง	20.991	0.4005	0.9881	2.2523	0.6731	0.9982
ลำต้นที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน	44.823	0.4717	0.9925	2.4266	1.4015	0.9979

วิจารณ์ผล

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นที่ผิวตัวดูดซับจากรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซาน จากภาพ SEM โครงสร้างสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับจากรากและลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน จะมีรูพรุนขนาดเล็ก ๆ เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการปรับสภาพพื้นผิวด้วยไคโตซานทำให้เกิดรูพรุนและพื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับรายงานของ Ullah and Rahman (2024) เป็นการเปลี่ยนแปลงที่บ่งชี้ถึงการเพิ่มพื้นที่ผิวที่เอื้อต่อการดูดซับ ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ยืนยันการรวมตัวของไคโตซานเข้ากับโครงสร้างของผักตบชวาสอดคล้องกับรายงานของ Chaiyaraksa et al., (2019) และการเกิดอันตรกิริยาทางเคมีของหมู่ฟังก์ชันอะมิโนและไฮดรอกซิลสอดคล้องกับรายงานของ Rahman et al., (2023) ข้อมูลการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูยังได้ยืนยันการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับจากรากและลำต้นที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน ซึ่งนำไปสู่ความสามารถในการดูดซับทองแดงต่อไป แต่ในรากผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยไคโตซานมีพื้นที่ผิวลักษณะหยาบและเรียบ มีพื้นที่ผิวและรูพรุนน้อยลงอาจเกิดจากหมู่ฟังก์ชันในไคโตซานจะแทรกอยู่ในวัสดุดูดซับจนทำให้พื้นที่ผิวและรูพรุนลดลง

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณและชนิดของไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงจากส่วนต่าง ๆ ของผักตบชวา

ชนิดของตัวดูดซับจากผักตบชวา	ปริมาณการดูดซับ (mg/g)	ชนิดของไอโซเทอร์ม	Ref
รากที่ไม่ปรับปรุง	17.07	แลงเมียร์	งานวิจัยนี้
รากที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน	14.25	แลงเมียร์	งานวิจัยนี้
ลำต้นที่ไม่ปรับปรุง	20.99	ฟรุนดิช	งานวิจัยนี้
ลำต้นที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน	44.82	ฟรุนดิช	งานวิจัยนี้
รากที่ไม่ปรับปรุง	22.70	แลงเมียร์	Zheng et al., (2009)
ใบไม่ปรับปรุง	22.19	ฟรุนดิช	Oktaviyana et al., (2020)
ใบไอซาร์ไคโตซาน+แม่เหล็กที่สังเคราะห์จากผักตบชวา	38.46	แลงเมียร์	Chaiyaraksa et al., (2019)
เส้นใยจากใบ+ไคโตซาน	31.10	ฟรุนดิช	Pisitsak, et al., (2019)

สำหรับพฤติกรรมการดูดซับสารละลายทองแดงโดยใช้ตัวดูดซับทั้งสองชนิด ทั้งจากรากและลำต้นผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซาน พบว่า รากมีพฤติกรรมการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบ

แลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (ตารางที่ 4) เพราะมีค่า r^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับทองแดงเป็นการกระจายตัวที่เป็นเนื้อเดียวกันของแอคทิฟไซต์บนพื้นผิวตัวดูดซับและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zheng et al., (2009) ส่วนการดูดซับสารละลายทองแดงโดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาทั้งสองชนิดที่ทั้งที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงด้วยไคโตซาน พบว่า มีพฤติกรรมเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชมากกว่า เพราะมีค่า r^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับสารละลายทองแดงบนพื้นผิวตัวรากผักตบชวาทั้งสองชนิด เป็นการกระจายตัวที่เป็นเนื้อเดียวกันของแอคทิฟไซต์บนพื้นผิวตัวดูดซับและการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Oktaviyana et al., (2020) (ตารางที่ 4)

ดังนั้น การปรับปรุงด้วยไคโตซานไม่ได้อยู่ที่การเพิ่มพื้นที่ผิวทางกายภาพเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการเพิ่มจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่ออกฤทธิ์ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่อะมิโน (-NH₂) หมู่เหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการจับยึดไอออนโลหะหนักผ่านกลไกต่างๆ เช่น การสร้างสารเชิงซ้อน (chelation) การแลกเปลี่ยนไอออน และการดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต ดังนั้น แม้ว่าไคโตซานอาจไม่ได้เพิ่มพื้นที่ผิวอย่างมีนัยสำคัญในทุกกรณี แต่ก็ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ ซึ่งเป็นกลไกหลักที่ทำให้สารดูดซับมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการกำจัดทองแดงและโลหะหนักอื่น ๆ (Hsu, 2024, Guibal, 2004)

จากตารางที่ 4 ปริมาณการดูดซับทองแดงใช้ลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงจะมีปริมาณการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 44.82 mg/g รองลงไปได้แก่ ลำต้นที่ไม่ปรับ รากที่ไม่ปรับ และรากที่ปรับ ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณการดูดซับทองแดงเท่ากับ 20.99, 17.07, และ 14.25 mg/g ตามลำดับ สอดคล้องกับผลของพื้นที่ผิวที่สูงกว่าจะสามารถดูดซับได้ดีกว่า โดยปริมาณการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และใกล้เคียงกับรายงานของ Chaiyaraksa et al., (2019) และ Pisitsak, et al., (2019) ดังตารางที่ 4 จึงสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายทองแดงได้ เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมหรือชุมชน แต่ข้อจำกัดของการวิจัยนี้ยังเป็นวิธีการดูดซับแบบกะ ดังนั้นในอนาคตจึงควรศึกษาเพิ่มเติมวิธีการดูดซับแบบให้สารละลายน้ำเสียไหลผ่านตัวดูดซับที่อัตราการไหลต่าง ๆ และที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เป็นต้น

สรุปผล

การเตรียมตัวดูดซับสองชนิดจากรากและลำต้นผักตบชวาที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน ทำให้มีพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้ดูดซับสารละลายทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ พฤติกรรมดูดซับโดยรากเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ส่วนลำต้นเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุดูดซับ พบว่า การปรับปรุงวัสดุดูดซับจากลำต้นด้วยไคโตซานช่วยให้ปริมาณการดูดซับโลหะทองแดงดีขึ้น มีปริมาณการดูดซับสารละลายทองแดงสูงที่สุด สอดคล้องกับพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับ แต่วัสดุรากจะทำให้เกิดพื้นที่ผิวลดลงจึงมีปริมาณการดูดซับทองแดงลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโปรแกรมวิชาเคมีและศูนย์วิจัยเคมีพื้นผิว คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ที่ได้อนุเคราะห์ทุนวิจัย อุปกรณ์และเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ปรีชา ปัญญา. 2557. *เคมีพื้นผิว*. มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร, กำแพงเพชร.

Chaiyaraksa, C., W. Boonyakiat, W. Bukkontod, and W. Ngakom. 2019. Adsorption of copper (II) and nickel (II) by chemical modified magnetic biochar derived from *Eichhornia crassipes*. *EnvironmentAsia*. 12 (2): 14–23.

González-Tavares, C., C.G. Salazar-Hernández, A. Talavera-López, J. M. Salgado-Román, R.Hernández-Soto, and J. A. Hernández. 2023. Removal of Ni(II) and Cu(II) in aqueous solutions using treated water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as bioadsorbent. *Separations*. 10 (5): 289.

Guibal, E. 2004. Interactions of metal ions with chitosan-based sorbents: A review. *Separation and Purification Technology*. 38 (1): 43–74.

Hsu, C.-Y., Y. Ajaj, Z.H. Mahmoud, G. K. Ghadir, Z. K. Alani, M. M. Hussein, S.A. Hussein, M. M. Karim, A. Al-khalidi, J. K. Abbas, A. H. Kareem, and E. Kianfar. 2024. Adsorption of heavy metal ions using chitosan/graphene nanocomposites: A review study. *Results in Chemistry*. 7: 101332.

Huynh, A. T., Y. C. Chen, and B. N. Tran. 2021. A small-scale study on removal of heavy metals from contaminated water using water hyacinth. *Processes*. 9 (11): 1802.

Murmu, R., S. M. George, P. Yuvarani, P. Bhatnagar, K. Amudha, and M. S. Karuna. 2024. Sustainable solutions for heavy metal contamination: Characterization and regeneration of water hyacinth biosorbent in wastewater treatment. *Global NEST Journal*. 26 (6): 05910.

Oktaviyana, M., A. Wijayanti, R. A. Kusumadewi, and R. Hadisoebroto. 2020. The mixing speed effect and mass of adsorbent on copper (Cu) removal from wastewater by water hyacinth leaves. *E3S Web of Conferences: ETMC and RC EnvE*. 148: 05006.

Pisitsak, P., W. Phamonpon, P. Soontornchatchavet, and A. Sittinun. 2019. The use of water hyacinth fibers to develop chitosan-based biocomposites with improved Cu²⁺ removal efficiency. *Composites Communications*. 16: 1–4.

Rahman, A., M. A. Haque, S. Ghosh, P. Shinu, M. Attimarad, and G. Kobayashi. 2023. Modified shrimp-based chitosan as an emerging adsorbent removing heavy metals (chromium, nickel, arsenic, and cobalt) from polluted water. *Sustainability*. 15 (3): 2431.

Ullah, M. H., and M. J. Rahman. 2024. Adsorptive removal of toxic heavy metals from wastewater using water hyacinth and its biochar: A review. *Heliyon*. 10: e36869.

Zheng, J.-C., H.M. Feng, M. Lam, P. K. Lam, W. W. Ding, and H. Q. Yu. 2009. Removal of Cu (II) in aqueous media by biosorption using water hyacinth roots as a biosorbent material. *Journal of Hazardous Materials*. 171 (1–3): 780–785.