

การบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยซังข้าวโพด

อาภาพร พิงจันทร์^{1*}, ปธานิน แสงอรุณ¹ และ พรสวรรค์ ศรีสวัสดิ์¹

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

*arphaphon.ap@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ (Cr(VI)) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ซังข้าวโพดเป็นวัสดุดูดซับชีวภาพ การทดลองดำเนินการแบบแบตช์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณวัสดุดูดซับ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ และอุณหภูมิ โดยวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ก่อนและหลังการดูดซับด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตรี ผลการศึกษาพบว่าซังข้าวโพดสามารถบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ได้สูงสุดร้อยละ 99.86 และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 5.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ค่า pH เท่ากับ 1 ปริมาณวัสดุดูดซับ 2.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองฟรุนด์ลิช และจลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม นอกจากนี้ การศึกษาลักษณะพื้นผิวของซังข้าวโพดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (SEM-EDX) พบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวหลังการดูดซับ และตรวจพบธาตุโครเมียม (Cr) บนพื้นผิวซังข้าวโพดในปริมาณ 0.11% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าซังข้าวโพดมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับชีวภาพเพื่อบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสีย ซึ่งไม่เพียงแต่เป็นประโยชน์ต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน แต่ยังเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอีกด้วย

คำสำคัญ: โครเมียมเฮกซะวาเลนท์ ซังข้าวโพด การดูดซับ วัสดุดูดซับชีวภาพ น้ำเสียสังเคราะห์

Removal of Hexavalent Chromium from Synthetic Wastewater Using Corncob

Arphaphon Phuengchan^{1*}, Pathanin Sangaroon¹ and Ponsawat Srisawat¹

¹School of Health Science, Sukhothai Thammathirat Open University

*arphaphon.ap@gmail.com

Abstract

This study investigated the removal efficiency and adsorption capacity of hexavalent chromium (Cr(VI)) in synthetic wastewater using corncob as a biosorbent. Batch adsorption experiments were conducted to evaluate the factors affecting the adsorption process, including pH, biosorbent dosage, contact time, initial Cr(VI) concentration, and temperature. The concentration of Cr(VI) before and after adsorption was determined using UV-Visible spectrophotometry. The results showed that corncob achieved a maximum removal efficiency of 99.86% for Cr(VI), with a maximum adsorption capacity of 5.14 mg/g under the optimum conditions of pH 1, a biosorbent dosage of 2.0 g/L, a contact time of 180 min, an initial Cr(VI) concentration of 10 mg/L, and a temperature of 40 °C. The adsorption isotherm data were best described by the Freundlich isotherm model, whereas the adsorption kinetics followed the pseudo-second-order kinetic model. Furthermore, scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX) confirmed the presence of chromium on the corncob surface after adsorption, with a chromium content of 0.11 wt%. These findings indicate that corncob has high potential as a biosorbent for the removal of hexavalent chromium from wastewater. In addition to contributing to sustainable environmental management, its utilization provides a value-added approach for the reuse of agricultural waste materials.

Keywords: Hexavalent chromium, Corncob, Adsorption, Biosorbent, Synthetic wastewater

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำเสียเป็นหนึ่งในปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เนื่องจากโลหะหนัก เช่น โครเมียม (Cr) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) มีความเป็นพิษสูงและไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เมื่อโลหะหนักสะสมในแหล่งน้ำ ดิน หรือสิ่งมีชีวิต อาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ เช่น ทำให้เกิดความผิดปกติของระบบประสาท ตับ ไต และระบบทางเดินหายใจ รวมทั้งอาจก่อให้เกิดมะเร็งในระยะยาว [1] โดยเฉพาะโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr(VI)) รายงานเกี่ยวกับสารก่อมะเร็ง (Report on Carcinogens) ระบุว่าสารประกอบโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ซึ่งมักเกิดขึ้นจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมเป็นหลัก โดยถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม การฟอกหนัง การผลิตสีทอ และการรักษาเนื้อไม้ [2] หากไม่ได้รับการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม

การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนิยมใช้วิธีทางเคมีและกายภาพ เช่น การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การกรองด้วยเมมเบรน และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ แม้ว่าวิธีเหล่านี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อจำกัดในด้านต้นทุนที่สูง และใช้สารเคมีปริมาณมาก ปัจจุบันแนวทางการบำบัดน้ำเสียมุ่งเน้นไปที่เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการใช้วัสดุดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น กะลามะพร้าว แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ชีเลื้อย กากชา กากกาแฟ หรือเปลือกผลไม้ เป็นต้น วัสดุเหล่านี้มีองค์ประกอบของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีหมู่ฟังก์ชัน เช่น $-OH$, $-COOH$ และ $-NH_2$ ซึ่งสามารถจับกับไอออนโลหะหนักได้ดี [3] การนำวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มาใช้บำบัดน้ำเสีย ไม่เพียงช่วยลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสีย แต่ยังเป็นแนวทางในการจัดการของเสีย ให้เกิดประโยชน์สูงสุด สอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals; SDGs)

การศึกษาการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรืออุตสาหกรรมเป็นวัสดุดูดซับชีวภาพสำหรับบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย จึงมีความสำคัญทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม เพราะสามารถช่วยลดมลพิษจากแหล่งน้ำ ลดปริมาณของเสีย และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและยั่งยืน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสียจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรืออุตสาหกรรมข้าวโพด ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย [4] และมีปริมาณมาก โดยซึ่งข้าวโพดมีปริมาณไม่น้อยกว่า 1.2 ล้านตันต่อปี [5] เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของซึ่งข้าวโพดที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับชีวภาพต่อการบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสีย

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

- 2.1.1 นำซึ่งข้าวโพดที่เก็บตัวอย่างจากร้านขายผักและผลไม้ในท้องถิ่น ช่วงเดือนพฤศจิกายน - ธันวาคม 2568 จำนวน 3 ร้าน และนำมาผสมกัน ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาตามด้วยน้ำกลั่นหลายครั้งเพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกออก
- 2.1.2 อบแห้งในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 - 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2.1.3 บดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด และคัดขนาดอนุภาคด้วยตะแกรง ขนาด 0.25 - 0.50 มิลลิเมตร
- 2.1.4 เก็บรักษาในภาชนะปิด เพื่อป้องกันความชื้นก่อนการทดลอง

2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ 1, 2, 5, 10, 20, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากโพแทสเซียมไดโครเมต 2.828, 5.656, 14.14, 28.28, 56.56, 141.4 และ 282.8 มิลลิกรัม ตามลำดับ ต่อน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร

2.3 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสีย

วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสียก่อนและหลังการดูดซับ ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF, 24th edition part 3000-Cr B โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร

2.4 การศึกษาการดูดซับโดยการทดลองแบบแบตช์ (Batch study)

2.4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสียก่อนการดูดซับ
- 2) ปรับสภาวะของน้ำเสียให้มีค่า pH อยู่ในช่วง 1 - 6 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก



- 3) ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.2 กรัม และเติมลงในน้ำเสียที่ปรับค่า pH 1 - 6 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
- 4) กวนน้ำเสียด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที
- 5) กรองน้ำเสียเพื่อแยกของแข็งออก
- 6) เก็บตัวอย่างน้ำใส และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียหลังการดูดซับ

2.4.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณวัสดุดูดซับ (Dose)

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียก่อนการดูดซับ
- 2) ปรับสถานะของน้ำเสียให้มีค่า pH 1 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก
- 3) ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.04, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 กรัม และเติมลงในน้ำเสีย ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
- 4) กวนน้ำเสียด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที
- 5) กรองน้ำเสียเพื่อแยกของแข็งออก
- 6) เก็บตัวอย่างน้ำใส และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียหลังการดูดซับ

2.4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการสัมผัส (Contract time)

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียก่อนการดูดซับ
- 2) ปรับสถานะของน้ำเสียให้มีค่า pH 1 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก
- 3) ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.4 กรัม และเติมลงในน้ำเสียที่ปรับค่า pH 1 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
- 4) กวนน้ำเสียด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 20, 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที
- 5) กรองน้ำเสียเพื่อแยกของแข็งออก
- 6) เก็บตัวอย่างน้ำใส และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียหลังการดูดซับ

2.4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย (Initial concentration)

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียก่อนการดูดซับ
- 2) ปรับสถานะของน้ำเสียให้มีค่า pH 1 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก
- 3) ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.4 กรัม และเติมลงในน้ำเสียที่ปรับค่า pH 1 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
- 4) กวนน้ำเสียด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที
- 5) กรองน้ำเสียเพื่อแยกของแข็งออก
- 6) เก็บตัวอย่างน้ำใส และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียหลังการดูดซับ

2.4.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการดูดซับ (Temperature)

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียก่อนการดูดซับ
- 2) ปรับสถานะของน้ำเสียให้มีค่า pH 1 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก
- 3) ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.4 กรัม และเติมลงในน้ำเสียที่ปรับค่า pH 1 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
- 4) กวนน้ำเสียด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที
- 5) กรองน้ำเสียเพื่อแยกของแข็งออก
- 6) เก็บตัวอย่างน้ำใส และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียหลังการดูดซับ

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.5.1 ประสิทธิภาพการบำบัด (%Removal Efficiency)

$$\% \text{Removal Efficiency} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

เมื่อ C_0 หมายถึง ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e หมายถึง ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.5.2 ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity, q_e)

$$\text{Adsorption Capacity, } q_e (\text{mg/g}) = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m}$$

เมื่อ C_0 หมายถึง ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e หมายถึง ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V หมายถึง ปริมาณน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัด (ลิตร)

m หมายถึง มวลของวัสดุดูดซับชีวภาพ (กรัม)

2.5.3 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

2.5.3.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order kinetic model)

$$\log (q_e - q_t) = \log (q_e) - \frac{K_1 t}{2.303}$$

เมื่อ q_e หมายถึง ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t หมายถึง ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_1 หมายถึง อัตราคงที่สำหรับ Pseudo-first-order model (หนึ่งต่อนาที)

t หมายถึง เวลาใด ๆ (นาที)

2.5.3.2 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order kinetic model)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{(K_2 \times q_e^2)} + \frac{1}{q_e} t$$

เมื่อ q_e หมายถึง ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t หมายถึง ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_2 หมายถึง อัตราคงที่สำหรับ Pseudo-second-order model (กรัมต่อมิลลิกรัมนาที)

t หมายถึง เวลาใด ๆ (นาที)

2.5.4 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherms)

2.5.4.1 แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

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

- เมื่อ C_e หมายถึง ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 q_e หมายถึง ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 $q_{\max}$ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 K_L หมายถึง ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

2.5.4.2 แบบจำลองฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e)$$

- เมื่อ C_e หมายถึง ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 q_e หมายถึง ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 K_F หมายถึง ค่าคงที่การดูดซับของฟรอนด์ลิช (ลิตรต่อกรัม)

2.6 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับ

ศึกษาลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับก่อนและหลังการดูดซับด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (Scanning Electron Microscope coupled with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, SEM-EDX)

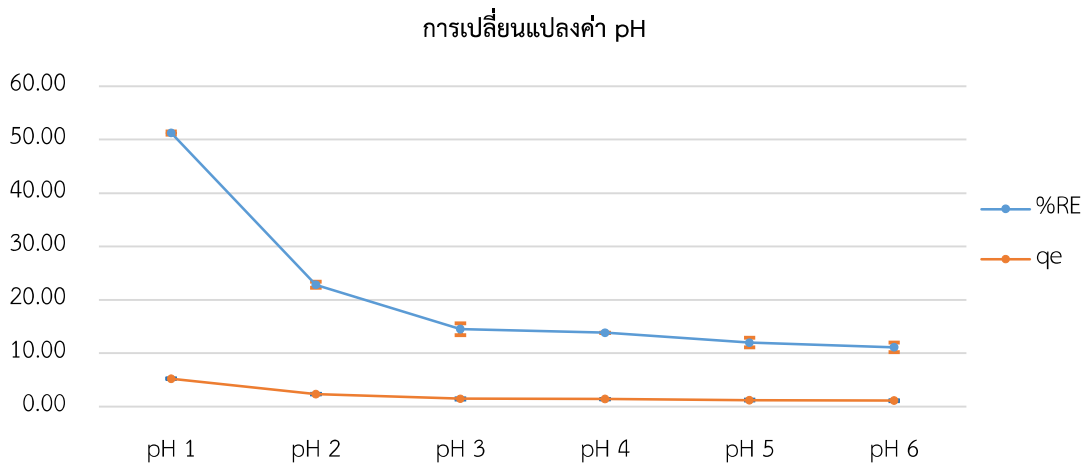
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH

การศึกษการเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียในช่วง pH ที่ 1 - 6 พบว่าที่ค่า pH 1 มีประสิทธิภาพการบำบัด (%Removal Efficiency) สูงสุดร้อยละ 51.24 ± 0.28 และมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity, q_e) เท่ากับ 5.25 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัม รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์มักเกิดได้ดีในสภาวะกรด เนื่องจากที่ค่า pH ต่ำ ผิวของวัสดุดูดซับมีประจุบวกมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตกับไอออนโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ซึ่งอยู่ในรูปแอนไอออน เช่น HCrO_4^- และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น

ตารางที่ 1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า pH

ค่า pH	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
pH 1	51.24 ± 0.28	5.25 ± 0.03
pH 2	22.85 ± 0.59	2.34 ± 0.06
pH 3	14.51 ± 1.10	1.49 ± 0.11
pH 4	13.84 ± 0.02	1.42 ± 0.002
pH 5	12.01 ± 0.91	1.23 ± 0.09
pH 6	11.12 ± 0.89	1.14 ± 0.09



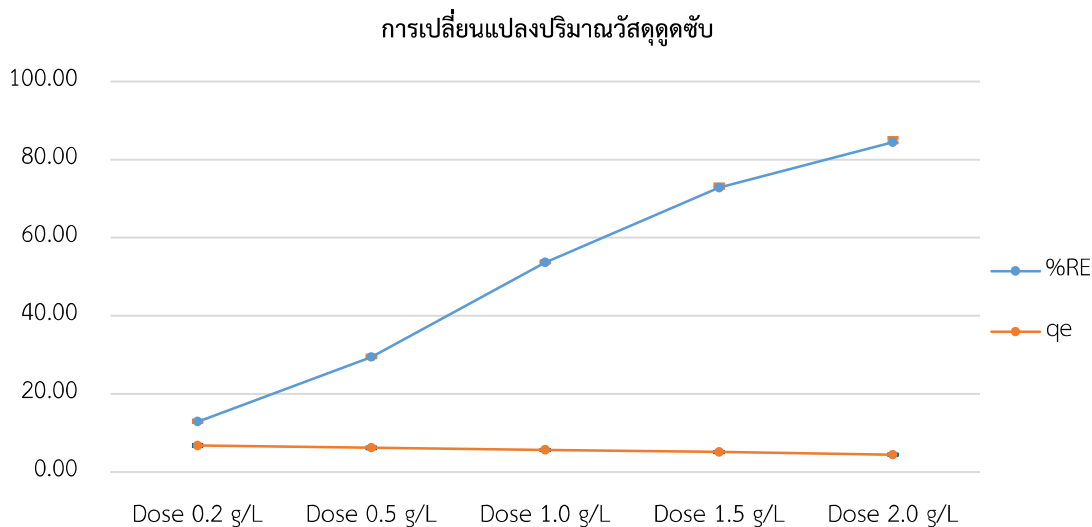
ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนทีนในน้ำเสียในช่วง 1-6

3.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณวัสดุดูดซับ (Dose)

การศึกษการเปลี่ยนแปลงปริมาณวัสดุดูดซับต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนทีนในน้ำเสียในช่วง 0.2 - 2.0 กรัมต่อลิตร พบว่า ที่ปริมาณวัสดุดูดซับ 2.0 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัด (%Removal Efficiency) สูงสุดร้อยละ 84.47 ± 1.11 และมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity, q_e) เท่ากับ 4.43 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อกรัม รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับส่งผลให้พื้นที่ผิวและจำนวนตำแหน่งออกฤทธิ์ (Active Sites) สำหรับการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไอออนโครเมียมเฮกซะวาเลนทีนสามารถถูกดูดซับได้มากขึ้น และประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยมวลของวัสดุ (q_e) อาจมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับ เนื่องจากเกิดการรวมตัวของอนุภาควัสดุดูดซับและตำแหน่งดูดซับบางส่วนที่ไม่ถูกใช้งานอย่างเต็มประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณวัสดุดูดซับ

ปริมาณวัสดุดูดซับ	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0.2 กรัมต่อลิตร	12.89 ± 0.30	6.76 ± 0.16
0.5 กรัมต่อลิตร	29.41 ± 0.43	6.17 ± 0.09
1.0 กรัมต่อลิตร	53.65 ± 0.33	5.63 ± 0.04
1.5 กรัมต่อลิตร	72.78 ± 0.83	5.09 ± 0.06
2.0 กรัมต่อลิตร	84.47 ± 1.11	4.43 ± 0.06



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณวัสดุดูดซับของการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสียในช่วง 0.2-2.0 กรัมต่อลิตร

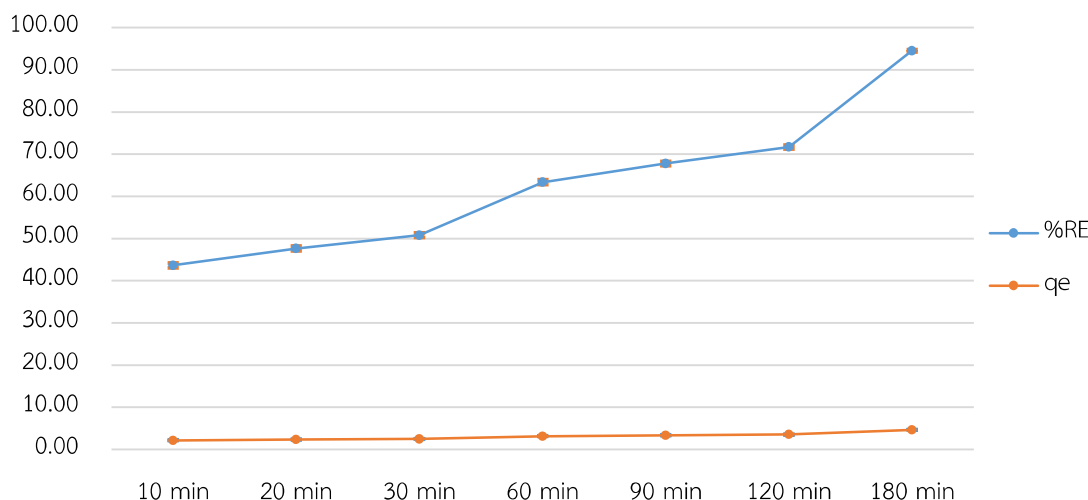
3.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาสัมผัส (Contact time)

การศึกษการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสียในช่วง 10 - 180 นาที พบว่า ที่ระยะเวลา 180 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัด (%Removal Efficiency) สูงสุดร้อยละ 94.49 ± 0.29 และมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity, q_e) เท่ากับ 4.64 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อกรัม รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3 และภาพที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาการสัมผัสระหว่างวัสดุดูดซับและน้ำเสียเพิ่มขึ้น จะทำให้ไอออนโครเมียมเฮกซะวาเลนท์มีโอกาสแพร่เข้าสู่ตำแหน่งออกฤทธิ์ (Active Sites) บนผิววัสดุดูดซับได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการทดลอง และเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงสมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium) อัตราการดูดซับจะเริ่มคงที่ เนื่องจากตำแหน่งดูดซับบนผิววัสดุถูกใช้งานเกือบเต็มทั้งหมด ส่งผลให้ที่ระยะเวลา 180 นาที ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลาการสัมผัส	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
10 นาที	43.62 ± 0.55	2.14 ± 0.03
20 นาที	47.64 ± 0.58	2.34 ± 0.03
30 นาที	50.78 ± 0.55	2.49 ± 0.03
60 นาที	63.33 ± 0.56	3.11 ± 0.03
90 นาที	67.77 ± 0.48	3.33 ± 0.02
120 นาที	71.67 ± 0.44	3.52 ± 0.02
180 นาที	94.49 ± 0.29	4.64 ± 0.01

การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการสัมผัส



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการสัมผัสของการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียในช่วง 10-180 นาที

เพื่อศึกษากลไกควบคุมของกระบวนการดูดซับ ได้ใช้แบบจำลองจลนศาสตร์ (Adsorption kinetics) ได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first-order) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second-order) เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ โดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่คำนวณได้จากกราฟเชิงเส้นและพารามิเตอร์จลนศาสตร์อื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 4 จากผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม ให้ค่า R^2 ไม่แตกต่างกันมาก (0.9774 และ 0.9529 ตามลำดับ) แต่ทั้งนี้ ความสามารถในการดูดซับ (q_e) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีค่า 4.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าทดลองได้ที่ 4.64 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วยซังข้าวโพดสอดคล้องกับแบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมากที่สุด โดยบ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับอาจเกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมี (chemisorption) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอออน $Cr(VI)$ กับตำแหน่งออกฤทธิ์บนพื้นผิวของซังข้าวโพด

ตารางที่ 4 จลนศาสตร์ของการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วยซังข้าวโพด

Kinetics	q_e (mg/g)	K	R^2
แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first-order)	2.63	K_1 0.0076 min^{-1}	0.9774
แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second-order)	4.80	K_2 0.0079 $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$	0.9529

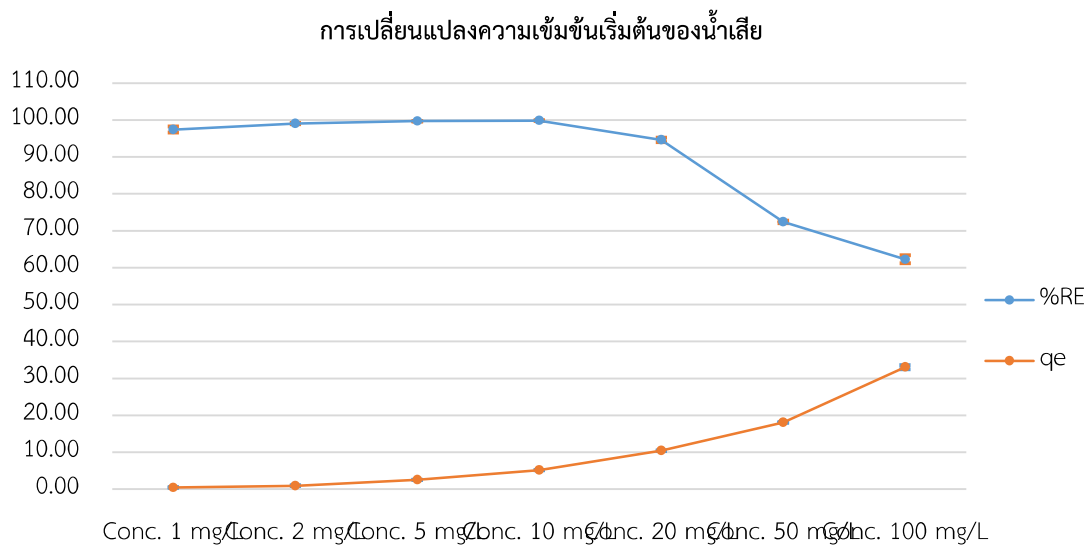
3.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย (Initial concentration)

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียในช่วง 1 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัด (%Removal Efficiency) สูงสุดร้อยละ 99.86 ± 0.01 และมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity, q_e) เท่ากับ 5.14 ± 0.0004 มิลลิกรัมต่อกรัม รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5 และภาพที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายกับพื้นผิวของวัสดุดูดซับ

ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้น จำนวนไอออนโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสียจะมากกว่าจำนวนตำแหน่งออกฤทธิ์ (Active Sites) ที่มีอยู่บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ ทำให้เกิดการอิ่มตัวของตำแหน่งดูดซับและส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง แม้ว่าความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยมวลของวัสดุ (q_e) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นที่สูงขึ้น เนื่องจากมีไอออนของสารปนเปื้อนเข้าสู่สัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุดูดซับมากขึ้นก็ตาม

ตารางที่ 5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย

ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1 มิลลิกรัมต่อลิตร	97.42 ± 0.80	0.43 ± 0.004
2 มิลลิกรัมต่อลิตร	99.02 ± 0.15	0.95 ± 0.001
5 มิลลิกรัมต่อลิตร	99.66 ± 0.01	2.53 ± 0.0002
10 มิลลิกรัมต่อลิตร	99.86 ± 0.01	5.14 ± 0.0004
20 มิลลิกรัมต่อลิตร	94.59 ± 0.60	10.44 ± 0.07
50 มิลลิกรัมต่อลิตร	72.41 ± 0.34	18.11 ± 0.09
100 มิลลิกรัมต่อลิตร	62.26 ± 1.07	33.07 ± 0.57



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียของการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ในน้ำเสียในช่วง 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร

เพื่ออธิบายไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherms) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง 2 แบบ คือ แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir) และแบบจำลองฟรอนด์ลิช (Freundlich) ในการเปรียบเทียบข้อมูลการดูดซับ โดยแบบจำลองแลงเมียร์ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) บนพื้นผิวที่มีความสม่ำเสมอ (Homogeneous Surface) ขณะที่แบบจำลองฟรอนด์ลิชใช้อธิบายการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous surface) และอาจเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption) ความสัมพันธ์เชิงเส้นและผลการเปรียบเทียบของทั้งสองแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 6 จากผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองฟรอนด์ลิชให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สูงกว่าแบบจำลองแลงเมียร์ โดยมีค่า

เท่ากับ 0.9393 และ 0.8886 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วยซิงข้าวโพดมีความสอดคล้องกับแบบจำลองฟรอนด์ลิชมากกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ และอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น นอกจากนี้ ค่าคงที่ฟรอนด์ลิช (K_F) มีค่าเท่ากับ 9.4146 แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของซิงข้าวโพดต่อโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ขณะที่ค่า $1/n$ เท่ากับ 0.3102 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 บ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี (Favorable Adsorption) และพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีความเหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ทั้งนี้ แม้แบบจำลองแลงเมียร์จะสามารถอธิบายการดูดซับได้ในระดับที่ดี โดยให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) เท่ากับ 43.20 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่แลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.0695 ลิตรต่อมิลลิกรัม แต่ค่า R^2 ที่ต่ำกว่าแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของซิงข้าวโพดอาจไม่ได้มีลักษณะสม่ำเสมอทั้งหมด จึงทำให้แบบจำลองฟรอนด์ลิชสามารถอธิบายพฤติกรรมดูดซับได้เหมาะสมกว่าในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 6 ค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรอนด์ลิช (Freundlich)

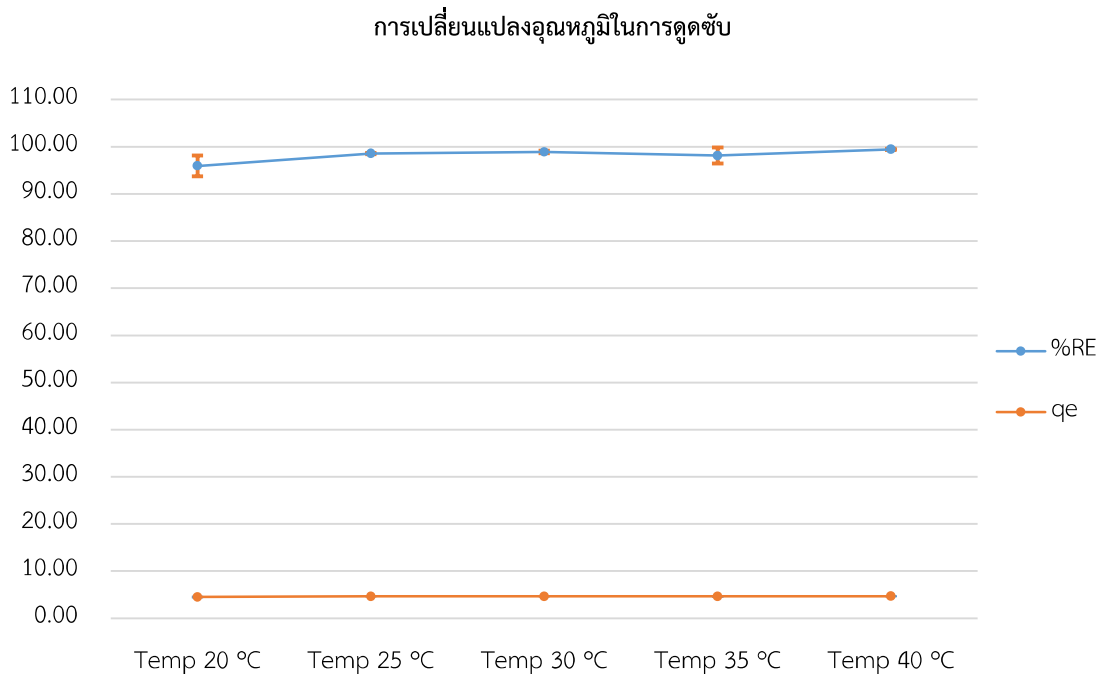
Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
q_{max} (mg/g)	K_L	R^2	K_F	$1/n$	R^2
43.20	0.0695	0.8886	9.4146	0.3102	0.9393

3.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการดูดซับ (Temperature)

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการดูดซับต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียในช่วง 20 - 40 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการบำบัด (%Removal Efficiency) สูงสุดร้อยละ 99.44 $\pm$ 0.16 และมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity, q_e) เท่ากับ 4.68 $\pm$ 0.01 มิลลิกรัมต่อกรัม รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ของไอออนโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่และแพร่เข้าสู่ตำแหน่งออกฤทธิ์ (Active Sites) บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับได้ดีขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e) ที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงจำกัด แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ควบคุมกระบวนการดูดซับ

ตารางที่ 7 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการดูดซับ

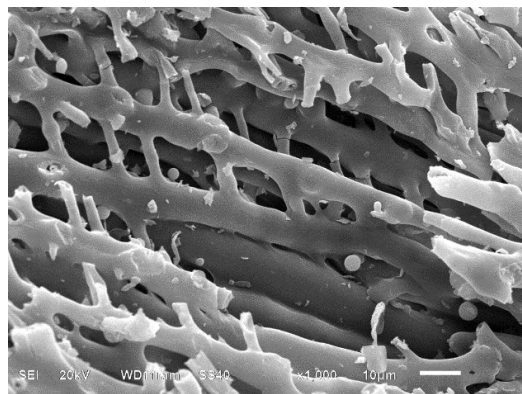
อุณหภูมิในการดูดซับ	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
20 องศาเซลเซียส	95.93 $\pm$ 2.20	4.52 $\pm$ 0.10
25 องศาเซลเซียส	98.55 $\pm$ 0.14	4.64 $\pm$ 0.01
30 องศาเซลเซียส	98.87 $\pm$ 0.28	4.66 $\pm$ 0.01
35 องศาเซลเซียส	98.12 $\pm$ 1.72	4.62 $\pm$ 0.08
40 องศาเซลเซียส	99.44 $\pm$ 0.16	4.68 $\pm$ 0.01



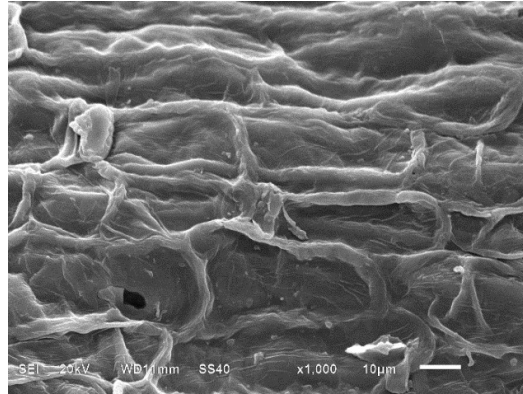
ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการดูดซับของการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนทีนในน้ำเสียในช่วง 20-40 องศาเซลเซียส

3.6 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับ

การศึกษาลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของธาตุนบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับก่อนและหลังการดูดซับด้วยเทคนิค SEM-EDX พบว่า ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หลังการดูดซับ พื้นผิวของซังข้าวโพดมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและรูพรุนบางส่วนถูกปกคลุม ซึ่งสะท้อนถึงการสะสมของโครเมียมบนพื้นผิววัสดุ แสดงดังภาพที่ 6 ถึงภาพที่ 7 ในขณะที่ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีเอกซ์ (EDX) ตรวจพบธาตุโครเมียม (Cr) บนพื้นผิวของซังข้าวโพดหลังการดูดซับในปริมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่พบในสภาวะก่อนการดูดซับ แสดงดังตารางที่ 8 ผลการทดสอบดังกล่าวเป็นการยืนยันว่าซังข้าวโพดมีความสามารถในการดูดซับและยึดจับโครเมียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 6 พื้นผิวของซังข้าวโพดก่อนการดูดซับ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



ภาพที่ 7 พื้นผิวของซังข้าวโพดหลังการดูดซับ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

ตารางที่ 8 องค์ประกอบธาตุของซังข้าวโพดก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับ

ธาตุ	ก่อนการดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	หลังการดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
คาร์บอน (C)	91.57	43.96
ออกซิเจน (O)	ND	55.03
ซิลิกอน (Si)	ND	0.26
กำมะถัน (S)	ND	0.65
โครเมียม (Cr)	ND	0.11
คลอรีน (Cl)	2.33	ND
โพแทสเซียม (K)	6.10	ND
รวมทั้งหมด	100	100

หมายเหตุ: ND = Not detected (ไม่พบธาตุ)

4. สรุปผล

การศึกษาการบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซังข้าวโพดเป็นวัสดุดูดซับชีวภาพ พบว่า ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ค่า pH ปริมาณวัสดุดูดซับ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ และอุณหภูมิ ล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการวิจัย คือ ค่า pH เท่ากับ 1 ปริมาณวัสดุดูดซับ 2.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดร้อยละ 99.86 และมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 5.14 มิลลิกรัมต่อกรัม

ผลการศึกษาทางจลนศาสตร์การดูดซับพบว่า กระบวนการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมากที่สุด โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ใกล้เคียง 1 และค่าความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้ (q_e) เท่ากับ 4.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง (4.64 มิลลิกรัมต่อกรัม) บ่งชี้ว่าอัตราการดูดซับอาจถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาระหว่างไอออน $Cr(VI)$ กับตำแหน่งออกฤทธิ์ (active sites) บนพื้นผิวของซังข้าวโพด และอาจเกี่ยวข้องกับกลไกการดูดซับทางเคมี (chemisorption) สำหรับการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่า แบบจำลองฟรุนด์ลิช สามารถอธิบายพฤติกรรมดูดซับได้ดีกว่าแบบจำลองแลงเมียร์ โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9393 สูงกว่าแบบจำลองแลงเมียร์ที่มีค่า 0.8886 สะท้อนว่าพื้นผิวของซังข้าวโพดมีลักษณะไม่สม่ำเสมอและการดูดซับอาจเกิดขึ้นได้หลายชั้น นอกจากนี้ ค่า $1/n = 0.3102$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 ยังบ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีและมีความเหมาะสมต่อการบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์

ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของซังข้าวโพดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (SEM-EDX) พบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวหลังการดูดซับมีลักษณะหนาแน่นเพิ่มขึ้น รูพรุนบางส่วนถูกปกคลุม และตรวจพบธาตุโครเมียม (Cr) บนพื้นผิวซังข้าวโพดในปริมาณ 0.11% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นหลักฐานสนับสนุนว่าซังข้าวโพดสามารถดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าซังข้าวโพดมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับชีวภาพต้นทุนต่ำสำหรับการบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสีย อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและสนับสนุนแนวคิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มสิ่งแวดล้อม ศูนย์ห้องปฏิบัติการอ้างอิงเคมี สถาบันห้องปฏิบัติการอ้างอิงแห่งชาติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือสำหรับการวิจัยตลอดจนการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Abd Elnabi, M. K., Elkhaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhailifa, S. A., Elmasry, S., Mouhamed, M. S., Shalamesh, E. M., Alhorieny, N. A., Abd Elaty, A. E., Elgendy, I. M., Etman, A. E., Saad, K. E., Tsigkou, K., Ali, S. S., Kornaros, M., & Mahmoud, Y. A.-G. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>
- [2] National Institute of Environmental Health Sciences. (2025). Hexavalent chromium. <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/hex-chromium>
- [3] Sen, T. K. (2023). Agricultural solid wastes based adsorbent materials in the remediation of heavy metal ions from water and wastewater by adsorption: A review. *Molecules*, 28(14), 5575. <https://doi.org/10.3390/molecules28145575>
- [4] Agricultural Research Development Agency (Public Organization). (n.d.). Economic crops: Income-generating products for households and the country. <https://www.arda.or.th/detail/6166> (In Thai)
- [5] Land Development Department, Soil Biotechnology Division. (2025). Operational manual for the value-added project from agricultural waste materials. Land Development Department. https://orgweb.ddd.go.th/sources/img/part_document/FILES_9905_6853ba6fb3abf.pdf (In Thai)