

การกำจัดโครเมียม (VI) โดยใช้ไคโตซานแบบเชื่อมขวางในคอลัมน์เบตนิ่ง

CHROMIUM (VI) REMOVAL USING CROSSLINKED CHITOSAN IN FIXED BED COLUMN

รัตนากร ยวงสวัสดิ์^{*1} สุรเชษฐ์ ปิโย² ณัฐพล เกษตรนิยม³Ratanaporn Yuangsawad¹, Surachet Piyo², Nattapol Kasetniyom³^{*1,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.^{*}ratanaporn.y@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับโครเมียมด้วยไคโตซานในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง วัสดุดูดซับสังเคราะห์จากการเชื่อมขวางของไคโตซานโดยใช้โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมขวาง วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 mm ทำการทดสอบการดูดซับในคอลัมน์แบบเบตนิ่งโดยศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายโครเมียม (150, 250 และ 350 cm³/h) ความสูงเบต (5, 10 และ 15 cm) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (1, 2 และ 3 ppm) ที่มีผลต่อการดูดซับ ทำการทดลองโดยป้อนสารละลายโครเมียมเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์และเก็บตัวอย่างที่ทางออกด้านบนตามเวลาเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สี ด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 540 nm จากการทดลองพบว่าเวลาเบรคทูร์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมมีค่าลดลง ในขณะที่การเพิ่มความสูงของเบตส่งผลให้เวลาเบรคทูร์เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาแบบจำลองการดูดซับ โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของโทมัส อัดัม-โบฮาร์ท และ ยูน-เนลสัน พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองของโทมัสเป็นอย่างดี

คำสำคัญ: ไคโตซานแบบเชื่อมขวาง การดูดซับ คอลัมน์เบตนิ่ง โลหะหนัก

ABSTRACT

This research aims to study the adsorption of chromium ion using chitosan in fixed bed column. The adsorbent prepared from crosslinking of chitosan, sodium tripolyphosphate was used as crosslinking agent. The spherical beads with the diameter of 2.5 mm were achieved. The continuous adsorption was carried out in the fixed bed column. The effect of feed flow rate (150, 250 and 350 cm³/h), bed height (5, 10 and 15 cm) and initial chromium concentration (1, 2 and 3 ppm) on the breakthrough curve were investigated. The chromium solution was fed at the bottom

วันที่รับบทความ 28 กุมภาพันธ์ 2564

วันที่แก้ไขบทความ 9 มีนาคม 2564

วันที่ตอบรับบทความ 20 มีนาคม 2564

and chromium effluent was collected at the top of column. The chromium concentration was determined by colorimetric technique with UV-Vis spectrophotometer at wavelength of 540 nm. The results showed that breakthrough time increased with increasing bed height, decreasing feed flow rate and initial chromium concentration. The adsorption model study indicated that Thomas model was in good agreement with the experimental results.

Keywords: crosslinked chitosan, adsorption, fixed bed column, heavy metal

1. บทนำ

โลหะหนักเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่กำจัดได้ยากและมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่สามารถเสื่อมสลายได้ตามธรรมชาติ และเมื่อเข้าสู่สิ่งมีชีวิตจะทำให้เป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่างๆ ตามมา [1] เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ก่อนจะปล่อยน้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมจึงต้องทำการบำบัดให้ปริมาณของโลหะหนักอยู่ในระดับที่กฎหมายกำหนด รัฐบาลจึงมีกฎหมายในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น Cr^{6+} ไม่เกิน 0.25 mg/L, Cr^{3+} ไม่เกิน 0.75 mg/L, Ni ไม่เกิน 1.0 mg/L, Cd ไม่เกิน 0.03 mg/L และ Cu ไม่เกิน 2.0 mg/L เป็นต้น [2] วิธีในการกำจัดโลหะหนักสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ออสมิซิสผกผัน การสะเทิน การเกิดออกซิเดชันและรีดักชันทางเคมี [3] การกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีแต่วิธีการและเทคโนโลยีที่ใช้ยังคงมีความซับซ้อน ส่งผลถึงต้นทุนที่ใช้ในการกำจัด ดังนั้นจึงได้มีความพยายามในการหาวิธีที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีแต่ต้นทุนต่ำ โดยวิธีการที่ได้รับความสนใจ คือ การดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และยังสามารถเลือกใช้วัสดุดูดซับได้หลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสารที่ต้องการดูดซับ

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นอนุพันธ์ของไคติน (Chitin) ซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์อย่างหนึ่ง สามารถพบได้ในธรรมชาติ เช่น เปลือกหอย เปลือกกุ้ง กระจงปู เป็นต้น โครงสร้างของไคโตซานประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) และหมู่อะมิโน (NH_2) ซึ่งสามารถจับไอออนของโลหะหนักได้ จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ [4] แต่เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของไคโตซานมีความถ่วงจำเพาะต่ำ พองตัวในน้ำ มีเสถียรภาพต่ำ สลายตัวได้ง่าย จึงต้องมีการดัดแปลงเพื่อพัฒนาสมบัติโดยวิธีต่างๆ เช่น การตรึง (Immobilization) การกราฟต์ (Grafting) และการเชื่อมระหว่างโมเลกุล (Crosslinking) [5-6] เป็นต้น

งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงไคโตซานโดยทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของไคโตซาน (Crosslinked chitosan) และศึกษาการนำไคโตซานแบบเชื่อมขวางมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในระบบต่อเนื่อง โดยเลือกโครเมียม (IV) เป็นตัวแทนของโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ อัตราการไหล ความสูงของเบตนิ่ง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก และศึกษาแบบจำลองการดูดซับเพื่อทำนายเส้นโค้งการดูดซับ (Breakthrough curve) บนวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกำจัดโลหะในน้ำเสียโดยใช้วัสดุดูดซับนั้นได้มีการวิจัยอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือวัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย ราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยวัสดุดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ชังข้าวโพด ฟางข้าว [7-9] รวมไปถึงไคโตซานที่สามารถสังเคราะห์ได้จากการกำจัดหมู่ Acetyl ออกจากโครงสร้างของไคติน ทำให้ไคโตซานมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยทั่วไปไคโตซานที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปของเกล็ดหรือผงไคโตซาน Ahmad และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ไคโตซานชนิดผงและเกล็ดในการดูดซับน้ำมันจากน้ำทิ้งของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม พบว่าไคโตซานสามารถดูดซับน้ำมันได้ถึงร้อยละ 99 อย่างไรก็ตามการใช้ไคโตซานที่อยู่ในรูปผงหรือเกล็ดนั้นจะมีแนวโน้มเกิดการฟุ้งกระจายและเสียเสถียรภาพได้ง่ายโดยเฉพาะในสารละลายกรดอ่อน อีกทั้งยังแยกออกจากระบบภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการได้ยากซึ่งทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ การปรับปรุงโครงสร้างของไคโตซานโดยวิธีการเชื่อมขวางทำให้ไคโตซานมีเสถียรภาพและสามารถแยกออกจากสารละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยสมบัติด้านการดูดซับของไคโตซานยังคงอยู่ สารเชื่อมขวางที่นิยมใช้ เช่น Glutaraldehyde, Ethylene glycol และ Sodium tripolyphosphate เป็นต้น [4] Wan Ngah และคณะ [11] ได้ศึกษาการกำจัดไอออนทองแดง โดยใช้ไคโตซานและไคโตซานแบบเชื่อมขวางพบว่าไคโตซานแบบเชื่อมขวางสามารถฟื้นฟูสภาพได้โดยทำให้เกิดการคายซับด้วย EDTA Sebastain และคณะ [12] ศึกษาการใช้ไคโตซานแบบเชื่อมขวางกับฟอสโฟเนียม (PCC) เพื่อกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียพบว่าวัสดุดูดซับสามารถดูดซับได้ในช่วง pH ระหว่าง 6-10 ความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 142 mg/L ที่ pH 6 และสามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยแมกนีเซียมซัลเฟตและแมกนีเซียมคลอไรด์เพื่อนำมาใช้ซ้ำ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการดูดซับในคอลัมน์หรือในระบบต่อเนื่องซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลเพื่อใช้ในการพัฒนาระบบดูดซับในระดับอุตสาหกรรม Jaime และคณะ [4] ใช้ไคโตซานที่เชื่อมขวางด้วย Glutaraldehyde เพื่อดูดซับสีย้อมในคอลัมน์เบตนิ่งโดยได้ความจุสูงสุดในการดูดซับประมาณ 343.59 mg/g และเส้นโค้งการดูดซับสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลอง BDST (Bed depth service time model) Suhong และคณะ [9] ใช้ชังข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรในการดูดซับโครเมียมในคอลัมน์เบตนิ่ง พบว่าความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามความสูงเบต แต่จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น และทั้งแบบจำลองของ Thomas และ Yoon-Nelson สามารถใช้ทำนายเส้นโค้งการดูดซับได้เป็นอย่างดี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ไคโตซานที่ปรับปรุงโครงสร้างโดยการทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลจะทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพมากขึ้นและสมบัติด้านการดูดซับยังคงอยู่ จึงเหมาะสมในการนำมาใช้ดูดซับไอออนของโลหะหนักและยังสามารถแยกออกจากระบบหลังการใช้งานได้ง่ายทำให้นำกลับมาใช้ซ้ำได้ จึงสามารถลดต้นทุนของกระบวนการลงได้ด้วย

3. วิธีการวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

ละลายไคโตซานปริมาณ 2 กรัม ในสารละลายกรดแอสซิติคความเข้มข้น 2%v/v ปริมาตร 150 ml กวนทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง หยดสารละลายไคโตซานลงในสารละลายโซเดียมไตรฟอสเฟตความเข้มข้น 10%w/v กวนทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อให้ได้ปฏิกิริยารูปร่างสมบูรณ์ ล้างปฏิกิริยาที่ได้น้ำปราศจากไอออนจน pH คงที่ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform spectroscopy (FTIR) วัสดุที่สังเคราะห์ได้จะถูกใช้เป็นวัสดุดูดซับในขั้นต่อไป

3.2 การดูดซับในคอลัมน์

บรรจุวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ในคอลัมน์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ณ ตำแหน่งกึ่งกลางโดยปรับความสูงของเบตด้วยเมตแก้ว ป้อนสารละลายโครเมียมเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ และเก็บตัวอย่างที่ทางออกตามเวลา เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมด้วยวิธี Colorimetric ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 nm ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับโครเมียม ได้แก่ อัตราการไหลเท่ากับ 150, 250 และ 350 cm³/h ความสูงเบตเท่ากับ 5, 10 และ 15 cm และ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม(VI) เท่ากับ 1, 2 และ 3 ppm

3.3 แบบจำลองการดูดซับ

แบบจำลองการดูดซับของโทมัส อัดัมโบฮาร์ท และยูน-เนลสัน เป็นแบบจำลองที่นิยมนำมาศึกษาเส้นโค้งการดูดซับในคอลัมน์ที่มีการไหลต่อเนื่อง [4,9] โดยแบบจำลองดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เวลาในการดูดซับ อัตราการไหล และความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ ดังสมการ (1)-(3)

แบบจำลองของ Thomas;

$$C_t = \frac{1}{1 + e^{\frac{K_{Th} q_m^m}{v} - K_{Th} C_0 t}} \quad (1)$$

แบบจำลองของ Yoon-Nelson;

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{k_{YN}(\tau - t)}} \quad (2)$$

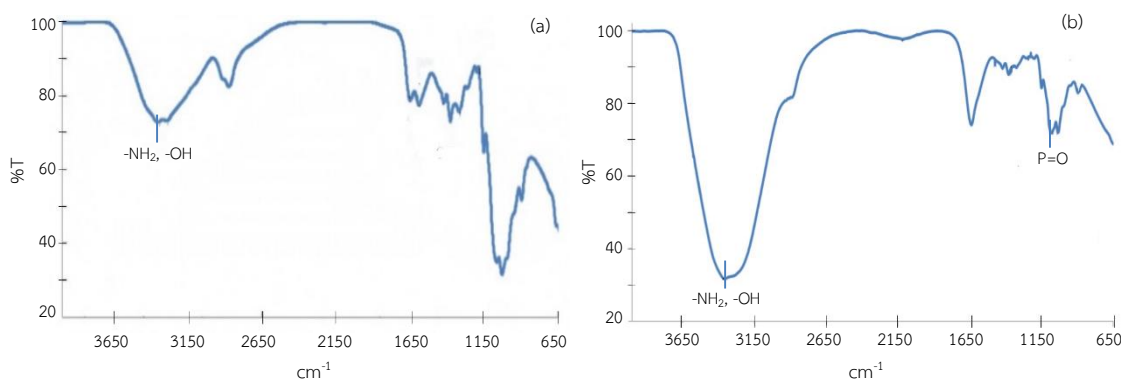
แบบจำลองของ Adam-Bohart;

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp(k_{AB} C_0 t - k_{AB} N_0 \left(\frac{Z}{U_0} \right)) \quad (3)$$

4. ผลการวิจัย

4.1 สมบัติของวัสดุดูดซับ

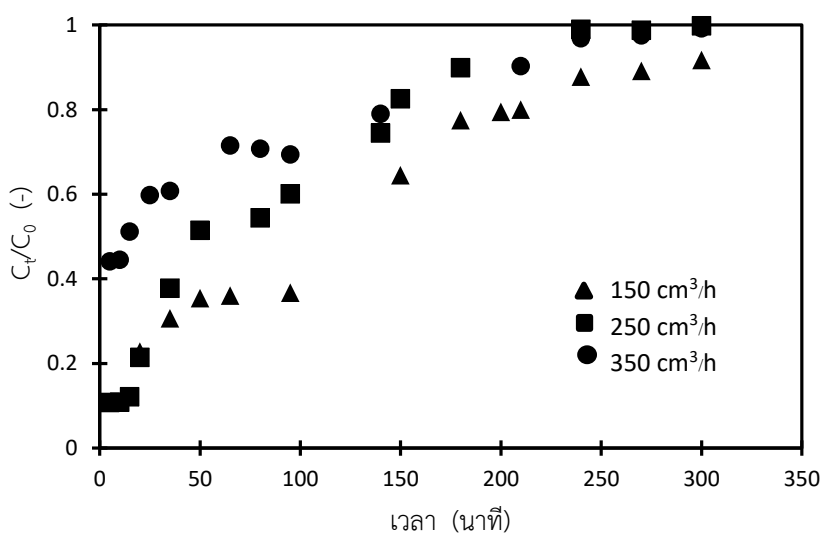
วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาวขุ่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 mm ผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิค FTIR ของไคโตซานและไคโตซานที่สังเคราะห์โดยการเชื่อมขวางด้วยโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต แสดงดังภาพที่ 1 (a)-(b) โดยพบพิกที่ 3400 cm⁻¹ แสดงถึงหมู่ -NH₂ และหมู่ -OH ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของไคโตซาน และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางด้วยโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟตพบว่ามีพิกที่เกิดขึ้นที่ 1250 และ 1100 cm⁻¹ แสดงถึงการเกิดขึ้นของพันธะ P=O [6]



ภาพที่ 1 สเปกตรัม FTIR ของ (a) Chitosan (b) Crosslinked chitosan

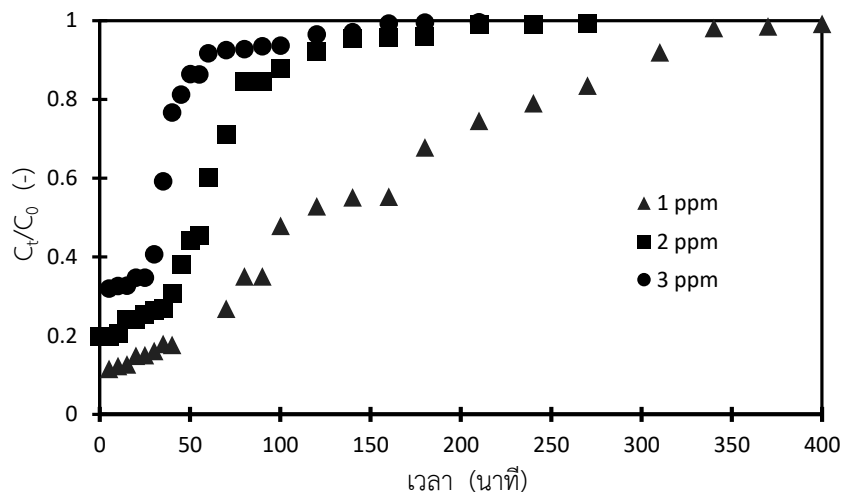
4.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง

ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกตามเวลา เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายที่เข้าสู่คอลัมน์ โดยให้ความสูงของเบตเท่ากับ 10 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเท่ากับ 1 ppm จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เวลา Breakthrough จะมีค่าลดลง โดยที่อัตราการไหล 150 cm³/h จะมีการดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรกหลังจากนั้นการดูดซับจะเริ่มช้าลงและอิ่มตัวที่เวลา 240 นาที และเมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นเวลาที่วัสดุดูดซับอิ่มตัวจะเร็วขึ้นโดยมีค่าประมาณ 180 และ 140 นาที ที่อัตราการไหล 250 cm³/h และ 350 cm³/h ตามลำดับ การที่เวลา Breakthrough สั้นลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็นผลมาจากการลดลงของระยะเวลาที่ตัวถูกดูดซับ (โครเมียม) สัมผัสกับวัสดุดูดซับ โดยเวลาสัมผัส (Contact time) มีค่าลดลงจาก 10.61 นาที เหลือ 4.57 นาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 150 เป็น 350 cm³/h

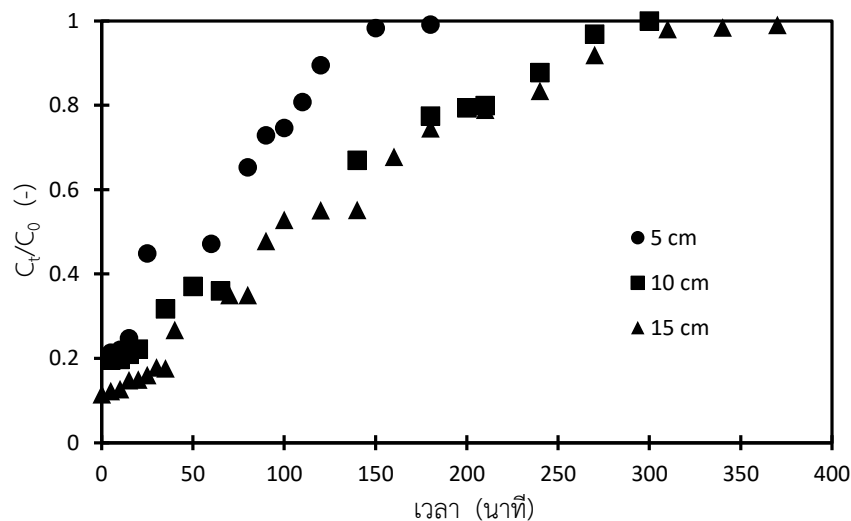


ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกตามเวลา ที่อัตราการไหลต่างๆ (ความสูงเบต = 10 cm, ความเข้มข้นเริ่มต้น = 1 ppm)

เมื่อทำการทดสอบการดูดซับโดยให้อัตราการไหลคงที่เท่ากับ $150 \text{ cm}^3/\text{h}$ ความสูงของเบตนิ่งเท่ากับ 15 cm และเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเป็น 1, 2 และ 3 ppm ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 3 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมมีค่ามาก การดูดซับจะเกิดอย่างรวดเร็วและถึงจุดอิ่มตัวเร็วกว่า สารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยเวลาที่วัสดุดูดซับอิ่มตัวมีค่าเท่ากับ 340, 240 และ 160 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมเป็น 1, 2 และ 3 ppm ตามลำดับ เนื่องมาจากความเข้มข้นของโครเมียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทมวลสาร กล่าวคือเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายมีค่ามากเมื่อเทียบกับปริมาณโครเมียมที่อยู่นบนผิววัสดุดูดซับ โครเมียมจะมีการเคลื่อนที่จากสารละลายเข้าไปยังพื้นผิวของวัสดุดูดซับได้เร็ว จนกระทั่งปริมาณโครเมียมที่พื้นผิวมีปริมาณมากขึ้นทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายและบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีค่าน้อยลงทำให้อัตราการดูดซับจึงค่อยๆ ลดลง



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกตามเวลา ที่ความเข้มข้นต่างๆ
(ความสูงเบต = 15 cm , อัตราการไหล $150 \text{ cm}^3/\text{h}$)



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกตามเวลา ที่ความสูงเบตต่างๆ
(อัตราการไหล $150 \text{ cm}^3/\text{h}$, ความเข้มข้นเริ่มต้น = 1 ppm)

ภาพที่ 4 แสดงผลของความสูงเบตที่มีต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียม เมื่อให้อัตราการไหลคงที่ที่ $150 \text{ cm}^3/\text{h}$ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเท่ากับ 1 ppm พบว่า เวลา Breakthrough มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของเบต โดยเวลาที่วัสดุดูดซับอิ่มตัวมีค่าเป็น 150, 270 และ 340 นาที เมื่อความสูงของเบตเป็น 5, 10 และ 15 cm ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณที่ใช้ในการดูดซับมีค่ามากขึ้นทำให้สามารถกำจัดโครเมียมได้เพิ่มขึ้น

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการดูดซับโครเมียมบนโคโตซานแบบเชื่อมขวางจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาเส้นโค้งการดูดซับในหัวข้อต่อไป

4.3 การศึกษา Breakthrough curve

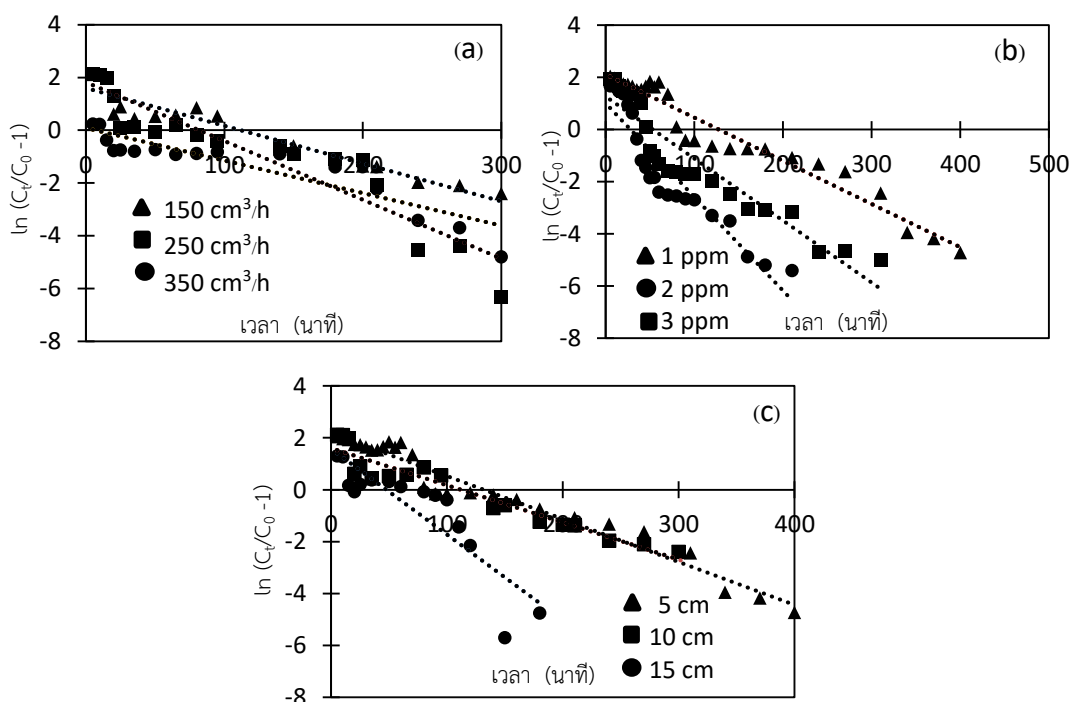
จากแบบจำลองของ Thomas, Adams-Bohart และ Yoon-Nelson ที่แสดงในสมการ (1) – (3) จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังนี้

$$\text{Thomas ;} \quad \ln\left(\frac{C_t}{C_0} - 1\right) = \frac{K_{Th} q_m m}{v} - K_{Th} C_0 t \quad (4)$$

$$\text{Adams-Bohart ;} \quad \ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = K_{AB} C_0 t - K_{AB} N_0 \left(\frac{Z}{U_0}\right) \quad (5)$$

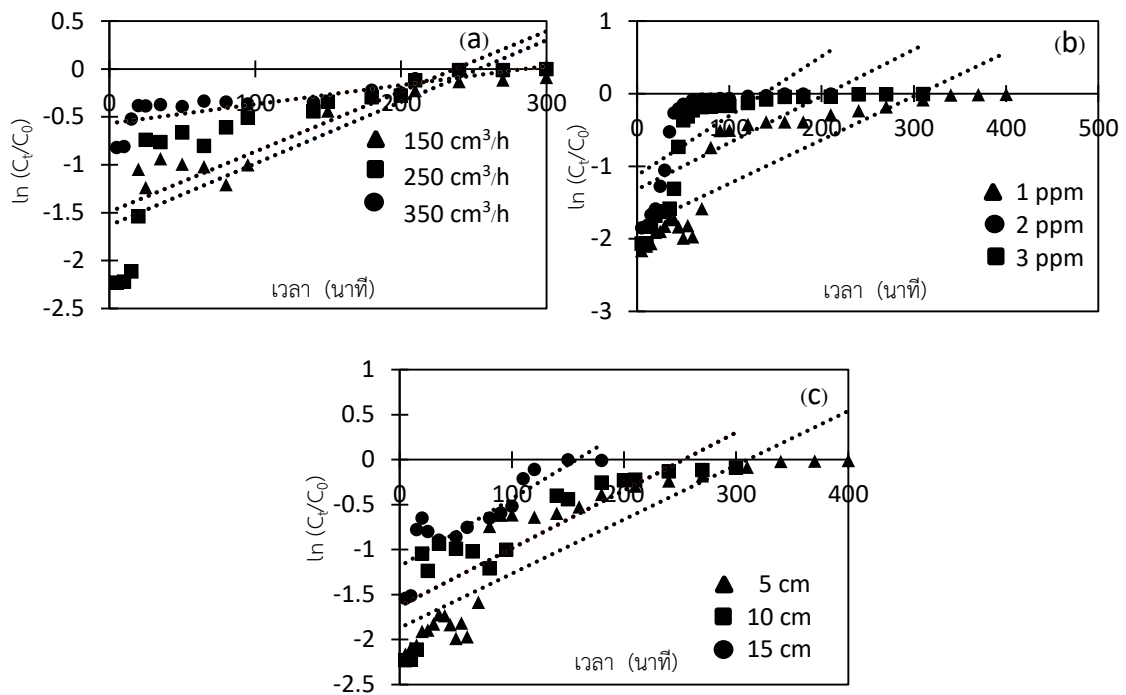
$$\text{Yoon-Nelson ;} \quad \ln\left(\frac{C_t}{C_0 - C_t}\right) = K_{YN} t - \tau K_{YN} \quad (6)$$

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองต่างๆ จากสมการ (4) – (6) ได้ดังภาพที่ 5 – 7 และมีค่า R^2 ดังตารางที่ 1 โดยในการเลือกแบบจำลองการดูดซับจะพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด



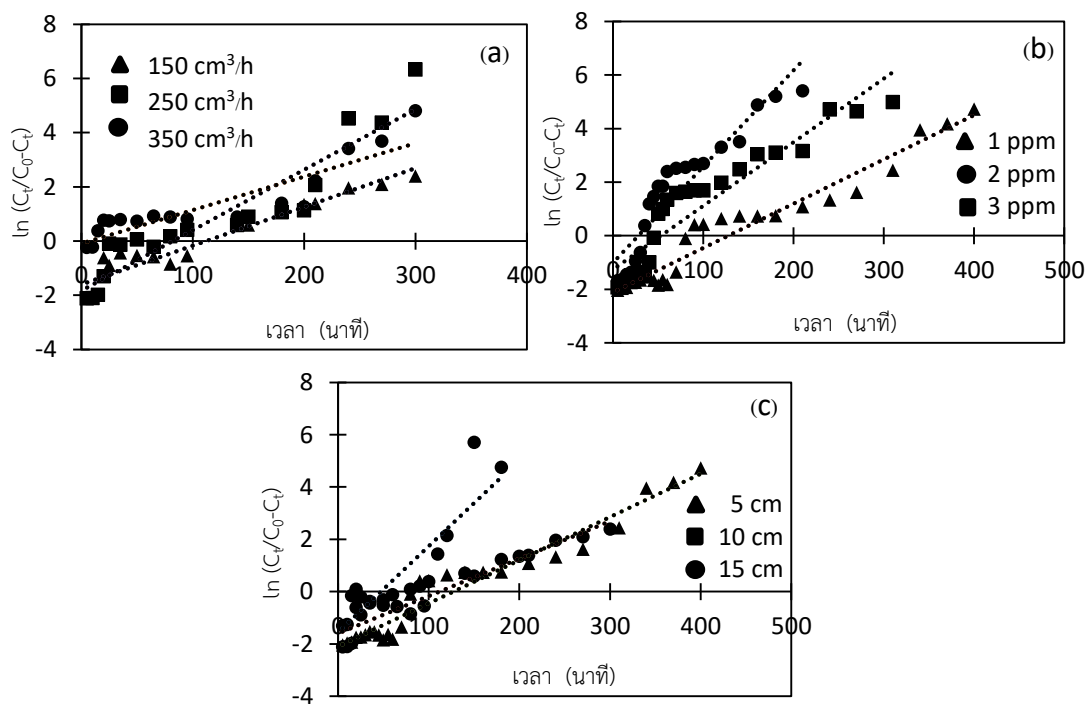
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองของ Thomas

(a) อัตราการไหล (b) ความเข้มข้นเริ่มต้น (c) ความสูงเบต



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองของ Adams-Bohart

(a) อัตราการไหล (b) ความเข้มข้นเริ่มต้น (c) ความสูงเบด



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองของ Yoon-Nelson

(a) อัตราการไหล (b) ความเข้มข้นเริ่มต้น (c) ความสูงเบด

ตารางที่ 1 ค่า R^2 ของแบบจำลองต่างๆ

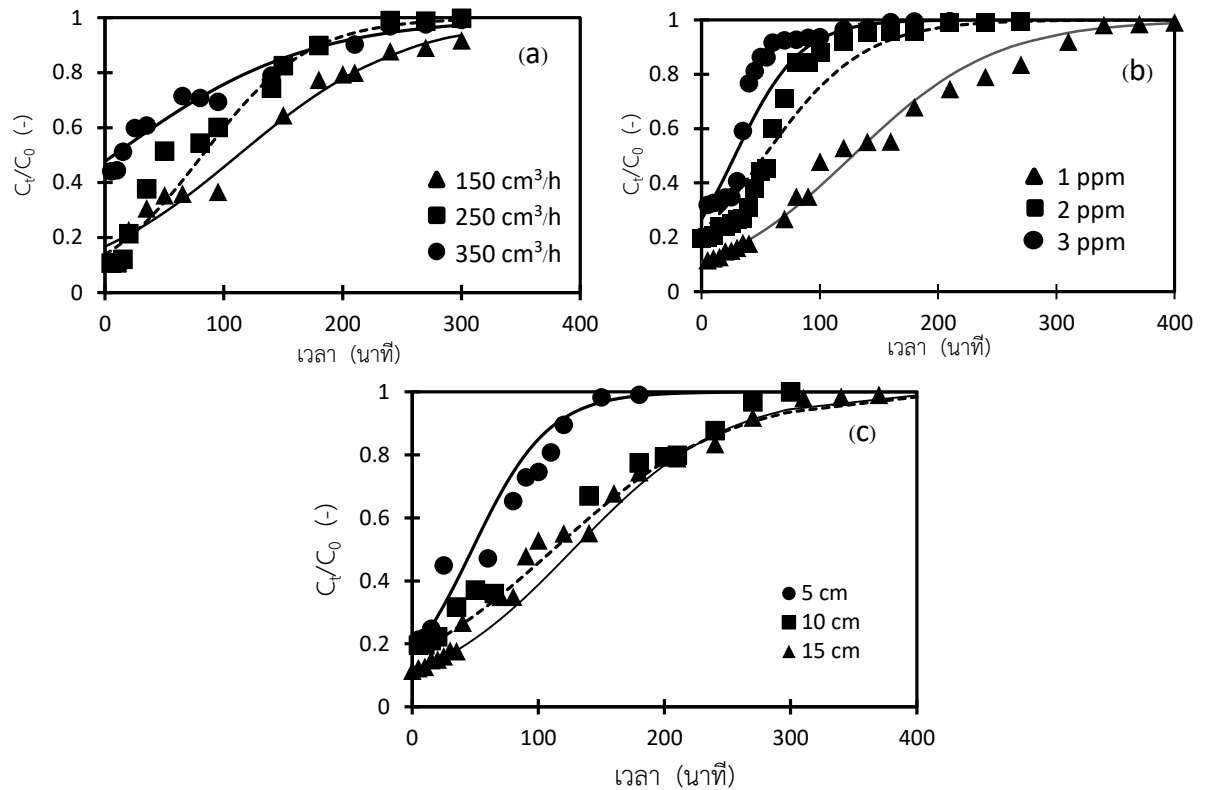
ตัวแปร	ค่า	R^2		
		Thomas	Adams-Bohart	Yoon-Nelson
อัตราการไหล (cm ³ /h)	150	0.920	0.751	0.920
	250	0.872	0.659	0.872
	350	0.795	0.732	0.795
ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	1	0.940	0.750	0.944
	2	0.920	0.526	0.876
	3	0.876	0.488	0.871
ความสูงเบด (cm)	5	0.777	0.768	0.777
	10	0.920	0.751	0.920
	15	0.960	0.789	0.944

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

โคโตซานแบบเชื่อมขวางที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ สังเคราะห์จากเกล็ดโคโตซาน โดยมีโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมขวาง วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.5 mm และมีความสามารถในการใช้เป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียในคอลัมน์แบบเบดนิ่งและสามารถแยกออกจากกระบบได้ง่ายหลังจากการใช้งาน

การทดสอบการดูดซับโครเมียมโดยใช้โคโตซานแบบเชื่อมขวางในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง พบว่าทุกภาวะที่ทำการทดลอง อัตราการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงแรกของการดูดซับจากนั้นอัตราการดูดซับจะช้าลงซึ่งเป็นบริเวณที่มีการดูดซับในคอลัมน์ (Adsorption zone) จนถึงระยะเวลาหนึ่งที่มีความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกเท่ากับ ความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางเข้าซึ่งจะทำให้ไม่มีการดูดซับเกิดขึ้นอีกต่อไป [13] จากการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับพบว่า เมื่ออัตราการไหลของสารละลายโครเมียมเพิ่มขึ้นทำให้เวลา Breakthrough ลดลง เนื่องจากเวลาที่สารละลายโครเมียมสัมผัสกับวัสดุดูดซับมีค่าน้อยและการเพิ่มอัตราการไหลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นจึงทำให้เวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงจุดอิ่มตัวมีค่าน้อยกว่าที่อัตราการไหลต่ำ เช่นเดียวกับการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมจะทำให้เวลา Breakthrough ลดลง โดยอัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการดูดซับโดยเฉพาะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมมีค่ามาก (3 ppm) เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของโครเมียมที่ถูกดูดซับกับโครเมียมในสารละลาย [14] โดยในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับพื้นผิวของวัสดุดูดซับไม่มีโครเมียมยึดติดผิวอยู่ ในขณะที่สารละลายมีความเข้มข้นของโครเมียมสูง จึงทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของโครเมียมส่งผลทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาผ่านไปพื้นผิวของวัสดุดูดซับจะถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของโครเมียมทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นที่ผิววัสดุดูดซับกับในสารละลายมีค่าลดลงการดูดซับจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงจุดอิ่มตัว ในขณะที่การเพิ่มความสูงของเบดนิ่งส่งผลทำให้การดูดซับเกิดได้ดีและใช้เวลาการดูดซับนานขึ้นเนื่องจากตัวดูดซับมีปริมาณและพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาแบบจำลองการดูดซับพบว่าแบบจำลองของ Thomas สามารถนำมาใช้ทำนายพฤติกรรม การดูดซับโครเมียมบนโคโตซานแบบเชื่อมขวางในคอลัมน์แบบเบตนิ่งได้ โดยมีค่า $R^2 = 0.89$ โดยเส้นโค้งการดูดซับ ที่ได้จากแบบจำลองของ Thomas สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เส้นโค้งการดูดซับจากแบบจำลองของโทมัส

(a) อัตราการไหล (b) ความเข้มข้นเริ่มต้น (c) ความสูงเบต

รายการสัญลักษณ์

- C_0 ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)
 C_t ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (mg/L)
 K_{Th} ค่าคงที่ของโทมัส (mL/mg.min)
 k_{YN} ค่าคงที่ของ Yoon-Nelson (min^{-1})
 k_{AB} ค่าคงที่ของ Adams-Bohart (L/mg.min)
 q_m ความจุสูงสุด (mg/g)
 U_0 ความเร็วในการไหลผ่านเบต (cm/min)
 τ เวลาที่ใช้ในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ 50% (min)
 t เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)
 N_0 ความเข้มข้นที่อิ่มตัว (mg/L)
 Z ความสูงเบต (cm)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jutarat_DPM. (2012). ภัยร้ายจากโลหะหนักไม่รู้ได้แล้ว. สืบค้น 1 ตุลาคม 2563, จาก <http://dpm.nida.ac.th>
- [2] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน. (2560, 7 มิถุนายน). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 134
- [3] Fenglian Fu & Qi Wang. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92 (3), 407-418. doi:10.1016/j.jenvman.2010.11.011
- [4] Jaime, L., Dalia, I.S., Reyna, G.S. & Ma, A.C. (2018). Study of a fixed-bed column in the adsorption of an azo dye from an aqueous medium using a chitosan - gluteraldehyde biosorbent. *Adsorption Science & Technology*, 36 (1-2), 215-232. doi:10.1177/0263617416688021
- [5] Jayakumar, R., Prabakaran, M., Reis, R.L. & Mano, J.F. (2005). Graft copolymerized chitosan-present status and applications. *Carbohydrate Polymer*, 62 (2), 142-158. doi:10.1016/j.carbpol.2005.07.017
- [6] Devika, R.B. & Varsha, B.P. (2006). Studies on Effect of pH on cross-linking of chitosan with sodium tripolyphosphate: A technical note. *AAPS PharmSciTech*, 7 (2), doi:10.1208/pt070250
- [7] Kadirvelu, K., Senthikumar, P., Thamaraiselvi, K. & Subburam, V. (2002). Activated carbon prepared from biomass as adsorbent: elimination of Ni(II) from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 81 (1), 87-90. doi:10.1016/s0960-8524(01)00093-1
- [8] Ahmaruzzaman, M. & Vinod, F.G. (2011). Rice husk and its ash as low-cost adsorbents in water and wastewater treatment. *Industrial & Engineering Chemistry research*, 50, 13589- 13613. doi:10.1021/ie201477c
- [9] Suhong, C, Qinyan, Y, Baoyu, G., Qian, L., Xing, X. & Kifang, F. (2012). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by modified corn stalk: A fixed-bed column study. *Bioresource Technology*, 113, 114-120. doi:10.1016/j.biortech.2011.11.110
- [10] Ahmad, A.L., Sumathi, S. & Hameed, B.H. (2005). Adsorption of Residue oil from palm oil mill effluent using powder and flake chitosan: Equilibrium and kinetic studies. *Water Research*, 39, 2483-2494. doi:10.1016/j.watres.2005.03.035
- [11] Wan Ngah, W.S., Endud, C.S. & Mayanar, R. (2002). Removal of copper(II) ions from aqueous solution onto chitosan and cross-linked chitosan beads. *Reactive and Functional Polymers*, 50 (2), 181-190. doi:10.1016/S1381-5148(01)00113-4
- [12] Sebastian, S., Simone, C. S.R, Ye, X., Qingye, L. & Josephine, M.H. (2019). Phosphonium-enhanced chitosan for Cr(VI) adsorption in wastewater treatment. *Carbohydrate Polymers*, 211, 249-256. doi:10.1016/j.carbpol.2019.02.003

- [13] Renu, B. , Madhu, A., Kailash, S. , Ragini, G. & Dohare, R.K. (2020). Continuous fixed-bed adsorption of heavy metals using biodegradable adsorbent: Modeling and experimental study. *Journal of Environmental Engineering*, 146(2). doi:10.1016/(ASCE)EE.1943-7870.0001636
- [14] Ghinwa, N. & Bohumil, V. (2006). Behavior of the mass transfer zone in a biosorption column. *Environmental Science & Technology*, 40, 3996-4003. doi:10.1021/es051542p