

ประสิทธิภาพการกำจัดซัลไฟด์ในสารละลายด้วยวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ สังเคราะห์จากเปลือกกุ้งขาว(*Litopenaeus vannamei*) Sulfide Removal Efficiency in Aqueous Solution with Synthetic Ion Exchanger from *Litopenaeus vannamei* Shrimp Shell

สตรีรัตน์ พิทักษ์ฉนวน (Satiriat Phithakchanuan)* คณิศา ตั้งคณาภิรักษ์ (Kanita Tungkananuruk)^{1**}

วัชรพงษ์ วาระรัมย์ (Watcharapong Wararam)^{***}

(Received: December 15, 2021; Revised: May 6, 2022; Accepted: May 6, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนจากเปลือกกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) เพื่อใช้สำหรับกำจัดไอออนซัลไฟด์ในสารละลาย การทดลองแบบแบตช์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือที่ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 3.0 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน 60 นาที ที่ pH 4 ประสิทธิภาพกำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 86.08±0.29 และค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.0016 มิลลิกรัมต่อกรัม การทดลองแบบคอลัมน์ ที่ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 5.0 กรัม ระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์ที่ 60 นาที อัตราการไหล 1.25 มิลลิตรต่อวินาที ประสิทธิภาพกำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 97.71±0.09 และค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.0292 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้มีการศึกษาการฟื้นฟูสภาพด้วย NaOH 0.5 และ 1.0 โมลาร์ ผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 83.67±0.33 และ 61.99±0.76 ตามลำดับ (p<0.05) จาก FTIR spectra ยืนยันได้ว่าการแลกเปลี่ยนซัลไฟด์ไอออนเกิดขึ้น เนื่องจากค่าความเข้มในการดูดกลืนของหมู่แอมิโนลดลงหลังเกิดการแลกเปลี่ยนซัลไฟด์ไอออนในสารละลาย ดังนั้นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถใช้ในการกำจัดซัลไฟด์ในสารละลายได้ อีกทั้งเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์และเป็นการเพิ่มมูลค่า

ABSTRACT

The research objective is to synthesis ion exchanger from *Litopenaeus vannamei* shrimp shells for remove sulfide ion in aqueous solutions. The batch experiment revealed that the optimum conditions of synthetic ion exchanger 3.0 g, initial concentration of sulfide solution 0.5 mg/L and an ion exchange time 60 minutes at pH 4, the sulfide removal efficiency was 86.08±0.29% and an exchange capacity was 0.0016 mg/g. The column experiment which synthetic ion exchanger 3.0 g was packed, retention time 60, flow rate of 1.25 ml/min revealed that the sulfide removal efficiency was 97.71±0.09% and an exchange capacity was 0.0292 mg/g. In addition, the generation of used synthetic ion exchanger was investigated by 0.5 M and 1.0 M NaOH solution. The results found that the removal efficiency were 83.67±0.33% and 61.99±0.76%, respectively (p<0.05). The FTIR spectra confirmed that sulfide ion exchange process occurred because the absorption intensity of the amino group decreases after exchange sulfide ion in aqueous solution. Therefore, biosynthetic ion exchanger can be utilized to remove sulfide from aqueous solutions and can also add value to waste materials that must be disposed of further.

คำสำคัญ: วัสดุแลกเปลี่ยนไอออน ซัลไฟด์ ความจุการแลกเปลี่ยนไอออน

Keywords: Ion Exchanger, Sulfide, Ion Exchange Capacity

¹Corresponding author: kkanita.kt@gmail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

ปัญหาน้ำเสียส่งกลิ่นเหม็นคล้ายกลิ่นไข่เน่าเป็นอีกหนึ่งปัญหามลพิษทางน้ำที่สำคัญ ซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์หรือสารประกอบซัลเฟอร์ในปริมาณสูง ส่งผลให้ระดับออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) ลดลงสามารถวัดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำได้ด้วย ค่าบีโอดี (biochemical oxygen demand) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เมื่อออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลงหรือหมดไปส่งผลให้เกิดการย่อยสลายในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนเกิดขึ้น โดยแบคทีเรียชนิด Sulfate Reducing Bacteria (SRB) เป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนทำหน้าที่เปลี่ยนซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ [1] และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำลดลง ซัลไฟด์จะกลายไปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากขึ้นส่งผลทำให้น้ำเกิดกลิ่นเหม็นเน่า น้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของซัลไฟด์เจือปนสูงจะส่งผลกระทบต่อในหลายด้าน อาทิ 1. ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำในระดับรุนแรง โดยเฉพาะในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นสาเหตุให้สัตว์น้ำเสียชีวิตจำนวนมาก ซึ่งขัดจำกัดความเข้มข้นของซัลไฟด์ในน้ำสำหรับปลาน้ำจืดและปลาน้ำเค็มไม่เกิน 0.5 ppm [2] 2. ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนในระบบท่อคอนกรีตและท่อโลหะ [3] 3. มีความเป็นอันตรายต่อมนุษย์ หากได้รับการสูดดมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปริมาณความเข้มข้น 10 ppm จะทำให้ระคายเคืองตาและคลื่นไส้ และปริมาณที่มากกว่า 1,000 ppm จะทำให้หมดสติทันทีและเสียชีวิตในเวลาอันรวดเร็ว เป็นต้น [4-5] ปัจจุบันจึงมีวิธีการกำจัดซัลไฟด์ที่เจือปนในน้ำเสียหลายวิธี เช่น การตกตะกอนเคมี (chemical precipitation) แต่มีข้อจำกัดในเรื่องราคาของสารเคมีที่สูงและความเป็นพิษจากสารเคมี วิธีการบำบัดทางชีวภาพ (biological treatment) เป็นกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์จึงต้องใช้เวลานานในการบำบัด และวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) [6] เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนของตัวกลางที่เป็นของแข็งกับไอออนจากสารละลายที่ต้องการกำจัด โดยทั่วไปนิยมใช้เรซิน (Resin) เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งเรซินเป็นสารพอลิเมอร์ที่ได้มาจากการสังเคราะห์มีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างและโครงสร้างภายในโมเลกุลจะต้องมีช่องว่างเพื่อให้ไอออนต่าง ๆ เคลื่อนผ่านได้สะดวก จึงทำให้โครงสร้างของเรซินไม่เปลี่ยนแปลงสามารถฟื้นฟูสภาพเรซินแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำได้ [7] แต่ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ ราคาของเรซินที่ค่อนข้างสูงและต้องมีการในการกำจัดเรซินที่เสื่อมสภาพอย่างเหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเตรียมวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchanger) ที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) ซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือจากกระบวนการผลิตและการส่งออกกุ้งแช่แข็งของประเทศไทย เมื่อพิจารณาในปี พ.ศ. 2564 ปริมาณการส่งออกกุ้งขาวแช่แข็ง 241,695 ตัน คิดเป็นปริมาณ 94.85% ของการส่งออกกุ้งทะเลทั้งหมด [8] อีกทั้งเปลือกกุ้งขาวเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์และสามารถเตรียมเป็นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนช่วยลดหรือทดแทนการใช้เรซินที่สังเคราะห์ขึ้นจากสารเคมี โดยในเปลือกกุ้งมีไคตินเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่สิ่งมีชีวิตสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นเกราะป้องกันอันตราย เมื่อทำการกำจัดหมู่อะมิโนออกจากไคตินจะได้ไคโตซานซึ่งอนุพันธ์ของไคตินที่มีหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ในโครงสร้าง [9] ที่สภาวะเป็นกรดส่งผลให้หมู่อะมิโนที่พื้นผิวของไคโตซานมีสภาพเป็นบวก (NH_3^+) สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับไอออนลบของซัลไฟด์ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ [10] และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซัลไฟด์ในสารละลายซัลไฟด์ โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้งขาวเพื่อให้นำวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดซัลไฟด์ที่เจือปนในน้ำเสีย อีกทั้งยังเป็นการนำวัสดุเศษเหลือมาใช้ประโยชน์และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเศษเหลือที่ต้องได้รับการกำจัดต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนจากเปลือกกุ้งขาว
2. เพื่อให้ได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนซัลไฟด์ในสารละลายซัลไฟด์
3. เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซัลไฟด์ด้วยวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน

ซังผงโคโตซาน 3.0 g ที่เตรียมจากเปลือกกุ้งขาวลงในบีกเกอร์ เติมสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1% (v/v) ปริมาตร 100 mL กวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันจะได้สารละลายโคโตซานความเข้มข้น 3% (w/v) [11] มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด นำสารละลายโคโตซานที่เตรียมได้ หยดลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 M โดยใช้ไซริงค์ขนาด 3 mL และเข็มเบอร์ 20 กวนผสมอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 30 min เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำมารองเอาวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมได้ปรับ pH เป็นกลางด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมได้วิเคราะห์ความคงรูปด้วยสารละลายกรดอะซิติก 1% สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M และน้ำปราศจากไอออนที่ค่า pH ในช่วง pH 1-14 และนำวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมได้นำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Bruker Optics รุ่น ALPHA ที่ความถี่ 1,000 - 4,000 cm^{-1}

2. การเตรียมกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานซัลไฟด์ (sulfide standards) ความเข้มข้น 1,000 mg/L จาก Sodium Sulfide Nonahydrate ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) และเจือจางความเข้มข้นด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อเตรียมกราฟมาตรฐาน ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 7.0 mg/L ตามลำดับ จากนั้นนำไปตรวจวัดปริมาณซัลไฟด์ด้วยเทคนิคเมทิลีนบลู (methylene blue) ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 nm [12-13]

3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออน โดยการทดลองแบบแบตช์

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดซัลไฟด์ไอออนจากสารละลาย โดยนำวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมได้จากข้อที่ 1. ทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

3.1 ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน

ซังน้ำหนักวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 0.5, 1.0, 2.0 และ 3.0 g ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 mL เติมสารละลายซัลไฟด์ความเข้มข้น 1.0 mg/L ปริมาตร 10 mL ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน 60 min เมื่อครบเวลา ทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณซัลไฟด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายซัลไฟด์ ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ นำผลการทดลองที่ได้คำนวณร้อยละการกำจัดซัลไฟด์ไอออน ดังสมการที่ (1) และค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน ดังสมการที่ (2) [14] จากนั้นเลือกปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่มีร้อยละการกำจัดซัลไฟด์ไอออนสูงสุดเพื่อนำไปทดลองปัจจัยอื่น ๆ

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

$$\text{ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน (mg/g)} = (C_0 - C_e) \times V / (W) \quad (2)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายซัลไฟด์ (mg/L)

C_e คือ ความเข้มข้นคงเหลือของสารละลายซัลไฟด์ (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารละลายซัลไฟด์ (L)

W คือ น้ำหนักของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน (g)

3.2 ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนแต่ละความเข้มข้นในสารละลายซัลไฟด์

ซึ่งวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนในปริมาณที่เหมาะสม จากการทดลองในข้อที่ 3.1 และทำการทดลองเช่นเดียวกัน โดยศึกษาความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ที่ 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 mg/L ตามลำดับ

3.3 ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน

นำวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนทำการทดลองเช่นเดียวกับในข้อที่ 3.2 ที่ความเข้มข้นในการแลกเปลี่ยนไอออนที่เหมาะสม โดยศึกษาระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ 60, 120, 180 และ 240 min ตามลำดับ

3.4 ค่า pH

นำวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนทำการทดลองเช่นเดียวกับในข้อที่ 3.3 ที่ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนที่เหมาะสม โดย pH ที่ศึกษาคือ 4, 8 และ 12 (ใช้ HCl 1.0 M และ NaOH 1.0 M ในการปรับค่า pH)

3.5 การศึกษาไอออนที่รบกวนประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน

ไอออนที่ทำการศึกษา ได้แก่ ฟอสเฟตไอออน ศึกษาโดยเตรียมสารละลายผสมของสารละลายซัลไฟด์และฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.5 mg/L ปริมาตร 10 mL และทำการทดลองเช่นเดียวกับในข้อที่ 3.4

4. การทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน โดยวิธีการแบบคอลัมน์

4.1 อัตราการไหลของสารละลายซัลไฟด์ผ่านคอลัมน์

ซึ่งวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 5.0 g บรรจุลงในคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.20 cm สูง 30 cm เติมสารละลายซัลไฟด์ความเข้มข้น 3 mg/L ปริมาตร 50 mL ปรับค่า pH ที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อที่ 3.3 ปล่อยให้ไหลผ่านคอลัมน์จนแห้ง ที่อัตราการไหล 1.25 mL/min และ 1.00 mL/min นำสารละลายที่ไหลออกจากคอลัมน์วิเคราะห์ค่าปริมาณซัลไฟด์ที่เหลืออยู่และทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ นำผลการทดลองที่ได้คำนวณดังสมการที่ (1)

4.2 ระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์

ศึกษาระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์ที่ 15, 45, 60, 90 และ 120 min ตามลำดับ โดยทำการทดลองและอัตราการไหลของสารละลายที่เหมาะสมเช่นเดียวกับการทดลองในข้อที่ 4.1 นำผลการทดลองที่ได้คำนวณดังสมการที่ (1) และ (2)

5. การศึกษาการฟื้นฟูสภาพของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน

5.1 นำวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านการใช้งาน 60 g มาผ่านกระบวนการฟื้นฟูสภาพ โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 M และ 1.0 M ปริมาตร 150 mL ปั่นด้วยความเร็ว 200 rpm เป็นเวลา 60 min เมื่อครบเวลาปรับให้เป็นกลาง (pH = 7) ด้วยน้ำปราศจากไอออน

5.2 นำวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ฟื้นฟูสภาพแล้ว ทดสอบประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์อีกครั้ง โดยทำการทดลองแบบแบตช์ ที่สภาวะเหมาะสมเช่นเดียวกับการทดลองในข้อที่ 3.4

5.3 จากนั้นทำซ้ำตามข้อที่ 5.1 และ 5.2 เป็นจำนวน 5 ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ด้วยวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ฟื้นฟูสภาพแต่ละครั้ง โดยนำผลการทดลองที่ได้คำนวณดังสมการที่ (1)

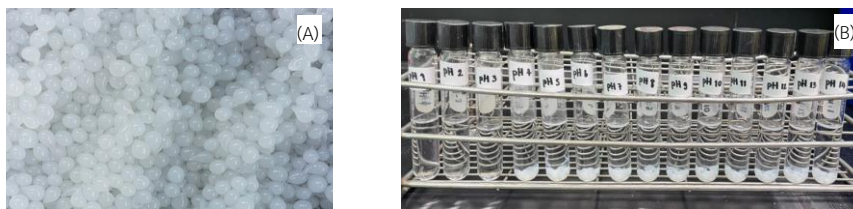
6. การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนก่อนและหลังการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ ด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Bruker Optics รุ่น ALPHA ที่ความถี่ 1,000 – 4,000 cm^{-1}

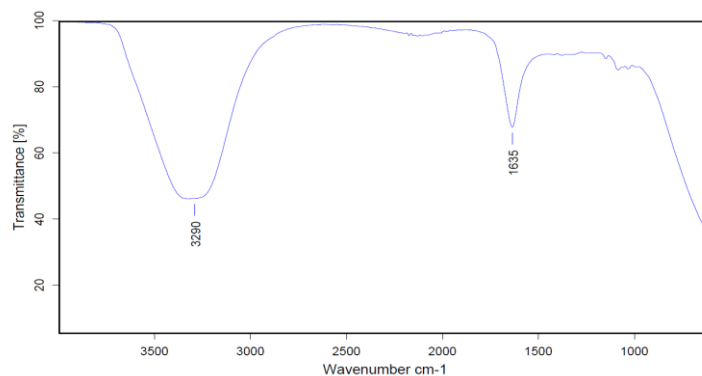
ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุแลกเปลี่ยนไอออน

วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมได้จากเปลือกกุ้งขาว มีลักษณะทางกายภาพเป็นเม็ดกลมสีขาวขุ่น ดังภาพที่ 1A และเมื่อทดสอบความคงรูป ด้วยสารละลายกรดอะซิติก 1% สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M และน้ำปราศจากไอออน จากการสังเกตพบว่าวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนมีความคงรูปในสารละลายที่มีค่า pH 4 - 14 และเกิดการละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดที่ pH 3 [14] ดังภาพที่ 1B ทั้งนี้เนื่องจากในสารละลายที่มีความเป็นกรดมี H^+ ทำให้ หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนถูกโปรโตเนต (Protonated) อยู่ในรูป cationic amino ($-NH_3^+$) จำนวนมาก จึงเกิดการละลายได้ในสารละลายที่มีสภาวะกรดสูง ซึ่งต่างจากสารละลายที่มีความเป็นกรดที่อ่อน ($pH \geq 4$) กลางและเบส ที่มีปริมาณ H^+ ที่จะโปรโตเนตหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ได้น้อยกว่าจึงไม่เกิดการละลายในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน ($pH \geq 4$) กลางและเบส [9, 13] จากผลศึกษาด้วย FTIR พบว่า FTIR spectra ของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมได้จากเปลือกกุ้งขาว ดังภาพที่ 2 มีพิกปรากฏที่เลขนคลื่น $\sim 3,290\text{ cm}^{-1}$ คือหมู่ฟังก์ชัน $-OH$ และ $-NH_2$ และพิกที่ $\sim 1,635\text{ cm}^{-1}$ คือหมู่ $C=O$ ของเอไมด์ ที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของไคโตซาน [14-15]



ภาพที่ 1 (A) ลักษณะทางกายภาพของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน และ (B) ความคงรูปทางเคมีของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายที่ ช่วง pH 1- 14



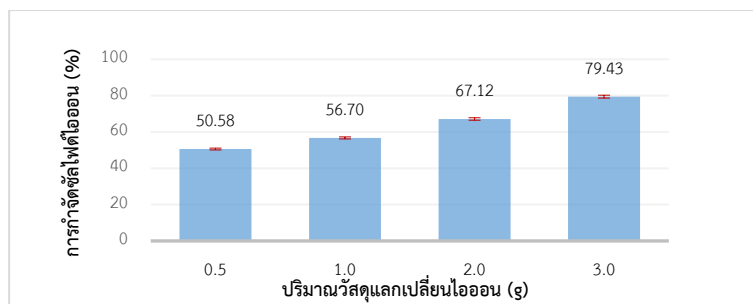
ภาพที่ 2 FTIR spectra ของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้งขาว

2. ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ โดยการทดลองแบบแบตช์

2.1 ผลการศึกษาปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน

ผลการศึกษาปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน โดยการทดลองแบบแบตช์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ 1.0 mg/L ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน 60 min พบว่า ที่ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 0.5, 1.0, 2.0 g และ 3.0 g สามารถกำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 50.58 ± 0.04 , 56.70 ± 0.37 , 67.12 ± 0.25 และ 79.43 ± 0.03 ตามลำดับ มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดซัลไฟด์แปรผันโดยตรงกับปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน [10] โดยเมื่อปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้มีจำนวนหมู่ฟังก์ชันในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตาม และส่งผลให้การกำจัดซัลไฟด์ไอออนสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่

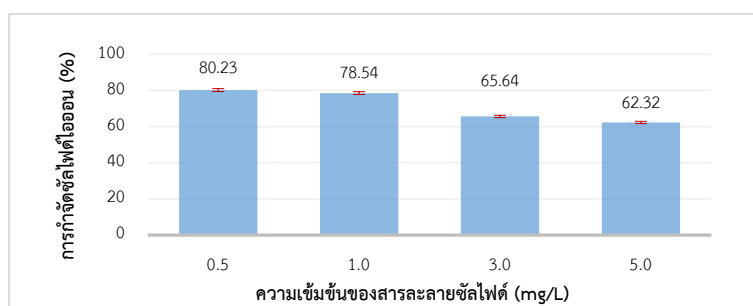
เหมาะสมในงานวิจัยนี้ คือ 3.0 g ซึ่งมีร้อยละการกำจัดซัลไฟด์สูงสุดและค่าความจุของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.0028 mg/g



ภาพที่ 3 ร้อยละการกำจัดซัลไฟด์ไอออนที่ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 0.5, 1.0, 2.0 และ 3.0 กรัม

2.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนแต่ละความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์

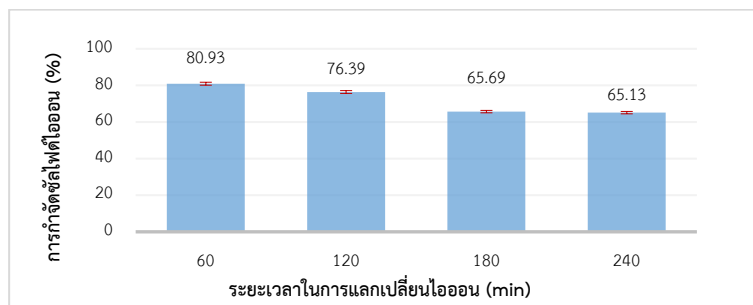
ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ ที่ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 3.0 g ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน 60 min พบว่าความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์เริ่มต้นที่ 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 mg/L กำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 80.23±0.16, 78.54±0.02, 65.64±0.28 และ 62.32±0.15 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4 มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ที่เหมาะสมคือ 0.5 mg/L มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.0015 mg/g และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์เพิ่มขึ้นร้อยละการกำจัดซัลไฟด์ไอออนในสารละลายมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน (NH_3^+) ที่สามารถเกิดแรงดึงดูดหรือแรงยึดเหนี่ยวกับส่วนที่เป็นไอออนลบของซัลไฟด์มีจำนวนไม่เพียงพอต่อการแลกเปลี่ยนไอออนซัลไฟด์ จึงทำให้เมื่อความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์เพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดซัลไฟด์ไอออนจึงลดลง



ภาพที่ 4 ร้อยละการกำจัดซัลไฟด์ไอออนที่ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 ผลการศึกษาระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน

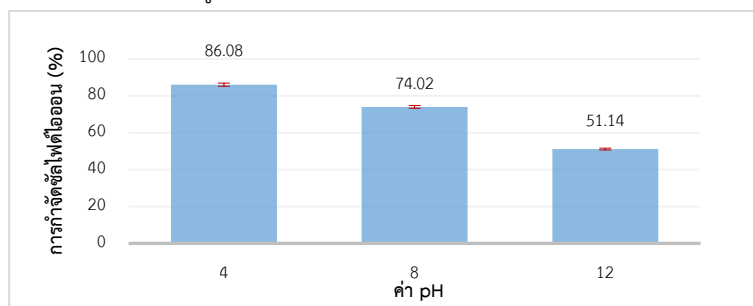
จากการศึกษาระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน ที่ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 3.0 g ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ 0.5 mg/L พบว่าระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน 60, 120, 180 และ 240 min กำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 80.93±0.28, 76.39±0.33, 65.69±0.53 และ 65.13±0.35 ตามลำดับ ดังภาพที่ 5 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นระยะเวลาการแลกเปลี่ยนไอออนที่เหมาะสมคือ 60 min มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.0015 mg/g ทั้งนี้ความสามารถในการกำจัดซัลไฟด์ไอออนมีประสิทธิภาพลดลงหลังจากระยะเวลาการแลกเปลี่ยนไอออนที่ 60 min เนื่องจากวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนถึงจุดอิ่มตัว ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนที่เพิ่มขึ้นจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนน้อยลงจึงส่งผลทำให้ร้อยละการกำจัดซัลไฟด์ไอออนในสารละลายลดลง



ภาพที่ 5 ร้อยละการกำจัดฟอสเฟตไอออนที่ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ 60, 120, 180 และ 240 นาที

2.4 ผลการศึกษาค่า pH

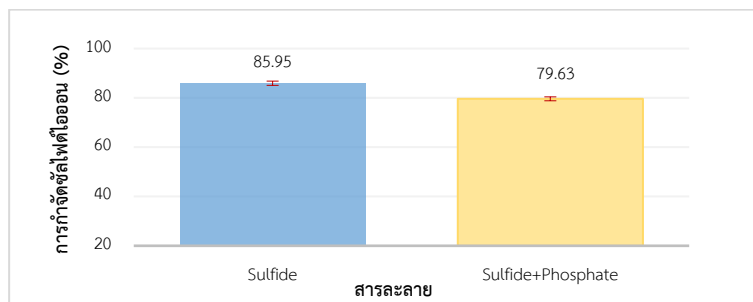
ผลการศึกษาค่า pH 4, 8 และ 12 ที่ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 3.0 g สารละลายฟอสเฟตความเข้มข้น 0.5 mg/L ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน 60 min ผลการศึกษพบว่าที่ pH 4, 8 และ 12 กำจัดฟอสเฟตไอออนได้ร้อยละ 86.08 ± 0.29 , 74.02 ± 0.39 และ 51.14 ± 0.78 ตามลำดับ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังภาพที่ 6 ซึ่งที่ pH 4 กำจัดฟอสเฟตไอออนได้สูงสุดและค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.0016 mg/g ทั้งนี้ความเป็นกรดของสารละลายทำให้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนมีสภาพประจุเป็นบวก ($-\text{NH}_3^+$) เพิ่มขึ้น จึงสามารถเกิดแรงดึงดูดหรือแรงยึดเหนี่ยวไอออนลบของฟอสเฟตในสารละลายได้มากขึ้น ส่งผลทำให้การกำจัดฟอสเฟตไอออนในสารละลายที่มีความเป็นกรดจึงมีร้อยละการกำจัดฟอสเฟตไอออนที่สูงกว่าในสารละลายที่มีความเป็นเบส [16]



ภาพที่ 6 ร้อยละการกำจัดฟอสเฟตไอออนที่ค่า pH 4, 8 และ 12

2.5 ผลการศึกษาไอออนที่รบกวนประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน

จากผลการศึกษาไอออนที่รบกวนประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตไอออนในสารละลายผสมที่มีฟอสเฟตความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตไอออนต่ำกว่าในสารละลายฟอสเฟตอย่างเดียว โดยในสารละลายผสมที่มีฟอสเฟตกำจัดฟอสเฟตไอออนได้ร้อยละ 79.63 ± 0.24 และในสารละลายฟอสเฟตกำจัดฟอสเฟตไอออนได้ร้อยละ 85.95 ± 0.18 ดังภาพที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายผสมประกอบด้วยฟอสเฟตไอออนและฟอสเฟตไอออนผสมอยู่ จึงทำให้เกิดการแข่งขันการแลกเปลี่ยนไอออน ส่งผลทำให้การกำจัดฟอสเฟตไอออนในสารละลายผสมที่มีฟอสเฟตจึงมีร้อยละการกำจัดฟอสเฟตไอออนที่ต่ำกว่าในสารละลายฟอสเฟต



ภาพที่ 7 ร้อยละการกำจัดฟอสเฟตในสารละลายฟอสเฟตและสารละลายผสมที่มีฟอสเฟต

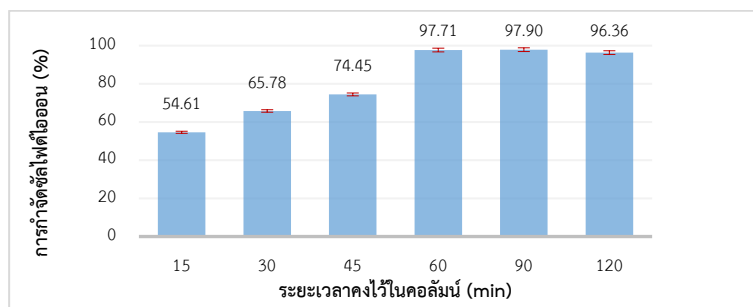
3. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน โดยวิธีการแบบคอลัมน์

การศึกษาดังกล่าวของสารละลายผ่านคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟต 3 mg/L ปริมาตร 50 mL ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 5.0 g ผลการศึกษาพบว่าอัตราการไหล 1.25 mL/min กำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 54.47 ± 0.34 และที่อัตราการไหล 1.00 mL/min การกำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 50.43 ± 0.29 มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) และจากผลการศึกษาระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์ที่ 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 min ที่อัตราการไหล 1.25 mL/min พบว่าระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์ที่ 60, 90 และ 120 min กำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 97.71 ± 0.09 , 97.90 ± 0.02 และ 96.36 ± 0.02 ตามลำดับ มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบระยะสัมผัสในคอลัมน์ที่ 60 และ 90 min พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังนั้นระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์ที่เหมาะสม คือที่ 60 min เนื่องจากใช้ระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์ที่น้อยกว่าและเมื่อคำนวณค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนได้เท่ากับ 0.0292 mg/g ทั้งนี้ระยะเวลาการสัมผัสในคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ฟอสเฟตในสารละลายสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนได้เพิ่มขึ้น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้เนื่องจากวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกกุ้งหุ้มมีหมู่แอมิโน ($-\text{NH}_2$) ในโครงสร้าง (functional groups) เมื่อทำปฏิกิริยาในสารละลายกรดไฮดรอกลิกจะทำให้หมู่แอมิโน ($-\text{NH}_2$) ได้รับโปรตอน (H^+) จึงมีสภาพประจุเป็นบวก ($-\text{NH}_3^+$) และมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) เป็นไอออนหลัก (counter ion) ที่เกิดจากแรงดึงดูดหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออน เมื่อสารละลายฟอสเฟตไหลผ่านวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดอันตรกิริยากับวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์จึงทำให้เกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างคลอไรด์ไอออนกับฟอสเฟตไอออน ในสารละลายขึ้น เนื่องจากฟอสเฟตไอออนมีค่าความแรงไอออนที่สูงกว่าคลอไรด์ไอออน ดังสมการที่ (3) [16] แต่เมื่อระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวจะส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนฟอสเฟตไอออนในสารละลายลดลง เนื่องจาก ($-\text{NH}_3^+$) ของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่สามารถเกิดแรงดึงดูดหรือแรงยึดเหนี่ยวกับส่วนที่เป็นไอออนลบของฟอสเฟตมีจำนวนลดลงหรือมีจำนวนคงที่ จึงทำให้ร้อยละการกำจัดฟอสเฟตไอออนในสารละลายลดลง



เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ 60 min โดยการทดลองแบบแบตช์ พบว่าความสามารถในการกำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 86.08 ± 0.29 และระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์ที่ 60 min กำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 97.71 ± 0.09 มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) จากผลการทดลองเห็นได้ว่าการทดลองแบบคอลัมน์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้สูงกว่าการทดลองแบบแบตช์ที่ระยะเวลา 60 min เนื่องจากการทดลองแบบคอลัมน์ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้สมบูรณ์เพราะเมื่อสารละลายฟอสเฟตเข้าสู่คอลัมน์จะเกิดสมดุลของการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้น คลอไรด์ไอออนที่ถูกแลกเปลี่ยนภายในคอลัมน์จะเคลื่อนออกจากคอลัมน์ทำให้ไม่มีคลอไรด์ไอออน สำหรับเกิดปฏิกิริยา

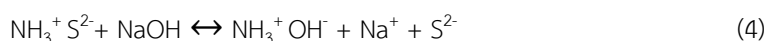
ย้อนกลับได้ จึงทำให้ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) ที่อยู่ในสารละลายเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้อย่างสมบูรณ์



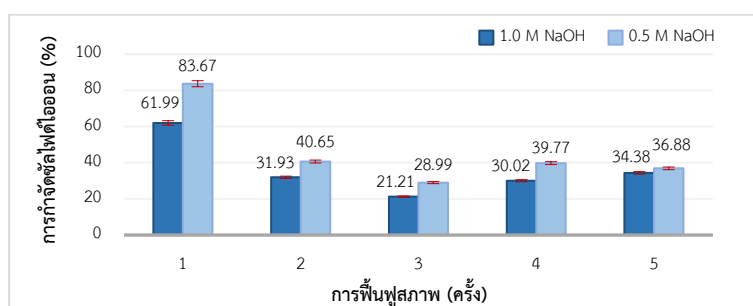
ภาพที่ 8 ร้อยละการกำจัดซัลไฟด์ไอออนที่ระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์ 15, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที

4. ผลการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน

จากการศึกษาการฟื้นฟูสภาพวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นต่างกันคือ 0.5 M และ 1.0 M จากนั้นนำวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนทดสอบประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ พบว่าวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 M กำจัดซัลไฟด์ไอออนได้สูงกว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 M ซึ่งกำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 83.67 ± 0.33 และ 61.99 ± 0.76 ตามลำดับ มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) การฟื้นฟูสภาพของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านการใช้งานแล้วเพื่อที่จะให้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนกลับมาใช้งานได้อีก แต่ประสิทธิภาพของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนหลังการฟื้นฟูสภาพนั้นมีประสิทธิภาพกำจัดซัลไฟด์ไอออนลดลงจากครั้งแรกและมีแนวโน้มลดลงตามจำนวนครั้งของการใช้งาน ดังภาพที่ 9



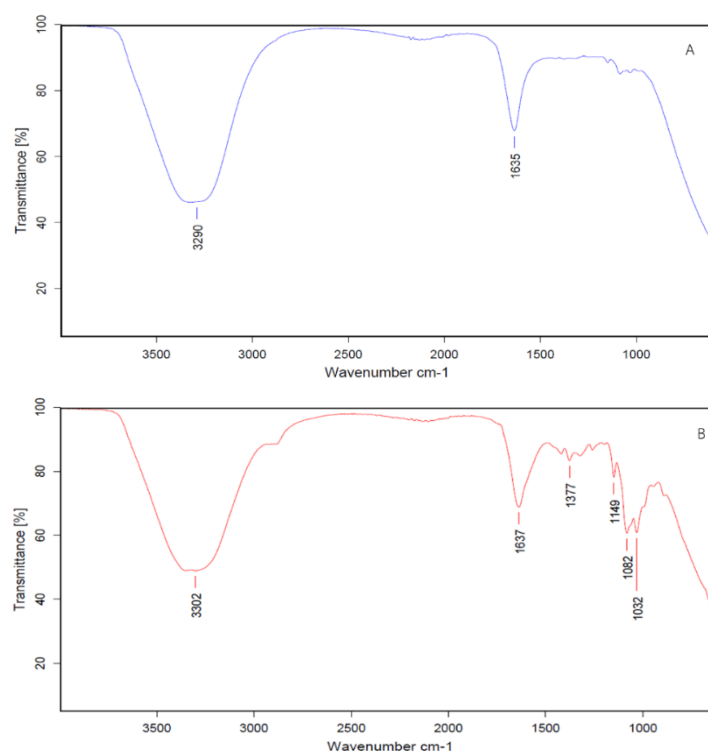
ทั้งนี้การฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นการเติมไอออนอิสระให้แก่วัสดุแลกเปลี่ยนไอออน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพื่อเข้าแทนที่ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) ที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายกับวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน ดังสมการที่ (4) ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีทำให้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนได้อีก [15]



ภาพที่ 9 การฟื้นฟูสภาพของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M และ 1.0 M และจำนวนครั้งของการใช้งาน

5. ผลการศึกษาการเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน

เมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนก่อนและหลังการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ พบว่า FTIR spectra ของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกกุ้งขาวประกอบด้วยองค์ประกอบของหมู่อะมิโน ในช่วงเลขคลื่น $3,100 - 3,400\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพีก N-H stretching ของ amide ที่มีความเข้มในการดูดกลืนสูง (absorption intensity) และมีลักษณะพีกกว้าง (broad band) [13] และที่เลขคลื่น $\sim 1,637\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพีก C=O stretching ของ amide I ซึ่งเป็นลักษณะที่พบในโครงสร้างของโคโตซาน [14-15] เมื่อเปรียบเทียบ FTIR spectra ของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนก่อนการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ (ภาพที่ 10A) และวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนหลังการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ (ภาพที่ 10B) พบว่าวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนหลังการแลกเปลี่ยนไอออน ที่ช่วงเลขคลื่น $3,100 - 3,400\text{ cm}^{-1}$ และเลขคลื่น $\sim 1,637\text{ cm}^{-1}$ มีค่าความเข้มในการดูดกลืน (absorption intensity) ต่ำกว่าวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนก่อนการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ ซึ่งแสดงถึงการมีจำนวนหมู่อะมิโนที่น้อยลงอันเป็นผลจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนกับซัลไฟด์ไอออนในสารละลาย นอกจากนี้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนหลังการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ ปรากฏพีกที่แตกต่างจากวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนก่อนแลกเปลี่ยนไอออนที่เลขคลื่น $\sim 1,377\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพีก C-H bending ที่เลขคลื่น $\sim 1,149\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพีก C-O-C stretching ที่ช่วงเลขคลื่น $1,082 - 1,032\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพีก C-O stretching [17-18] ซึ่งเป็นผลจากการเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนทางเคมีขึ้นระหว่างวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนกับซัลไฟด์ไอออนในสารละลาย



ภาพที่ 10 FTIR spectra ของ (A) วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนก่อนการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ (B) วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนหลังการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์

สรุปผลการวิจัย

วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้งขาวมีลักษณะเป็นทรงกลม สีขาวขุ่น มีความคงรูปในสารละลายที่ค่า pH ช่วง 4-14 เกิดการละลายที่ pH 3 และจากผลการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ โดยการทดลองแบบแบดช์ที่สภาวะเหมาะสม คือ ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 3.0 g ความเข้มข้นของสารละลายซัลไฟด์ 0.5 mg/L ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน 60 min ที่ pH 4 กำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 86.08 ± 0.29 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.0016 mg/g และผลการทดลองแบบคอลัมน์ ที่สภาวะเหมาะสม คือ ปริมาณวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน 5.0 g อัตราการไหล 1.25 mL/min ระยะเวลาคงไว้ในคอลัมน์ที่ 60 min กำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 97.71 ± 0.09 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.0292 mg/g เมื่อเปรียบเทียบการทดลองแบบแบดช์และแบบคอลัมน์ ที่ระยะเวลา 60 min พบว่าการทดลองแบบคอลัมน์มีความสามารถในการกำจัดซัลไฟด์ไอออนได้สูงกว่าการทดลองแบบแบดช์ เนื่องจากการทดลองแบบคอลัมน์ทำให้สมดุลการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดได้สมบูรณ์ สำหรับการฟื้นฟูสภาพของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M และ 0.1 M กำจัดซัลไฟด์ไอออนได้ร้อยละ 83.67 ± 0.33 และ 61.99 ± 0.76 ซึ่งมีค่าลดลงตามจำนวนครั้งของการใช้งาน และจาก FTIR spectra ของวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าในช่วงเลขคลื่น $3,100 - 3,400 \text{ cm}^{-1}$ และ $\sim 1,637 \text{ cm}^{-1}$ หลังการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์มีความเข้มข้นในการดูดกลืนต่ำกว่าก่อนการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายซัลไฟด์ แสดงถึงการมีจำนวนหมู่เอมีโนลดลง ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดแรงดึงดูดหรือแรงยึดเหนี่ยวกับส่วนที่เป็นประจุลบของซัลไฟด์ในสารละลายได้ ดังนั้นวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้งขาว ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถใช้ในการกำจัดซัลไฟด์ในสารละลายได้และนำไปปรับใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานหรือแนวทางในการประยุกต์ใช้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่สังเคราะห์จากเปลือกกุ้งขาวในการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลไฟด์เจือปนที่เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและทำให้น้ำมีกลิ่นที่เหม็น คล้ายกลิ่นไข่เน่าได้ อีกทั้งเป็นเพิ่มประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเศษเหลือที่รอการกำจัดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Nielsen AH, Vollertsen J, Jensen HS, Wium-Andersen T, Hvitved-Jacobsen T. Influence of pipe material and surfaces on sulfide related odor and corrosion in sewers. *Water Research*. 2008; 42(15): 4206-4214.
2. Altaş L, Büyükgüngör H. Sulfide removal in petroleum refinery wastewater by chemical precipitation. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 153(1): 462-469.
3. El Brahmi A, Abderafi S. Hydrogen sulfide removal from wastewater using hydrogen peroxide in-situ treatment: Case study of Moroccan urban sewers. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 45: 7424-7427.
4. Promnuan K, O-Thong S. Biological hydrogen sulfide and sulfate removal from rubber smoked sheet wastewater for enhanced biogas production. *Energy Procedia*. 2017; 138: 569-574.
5. Juthong H, Chantutanon S, Pomnuy S, Buachoei J, Salaeh F. Investigation of cases death from fermented biogas at skim crepe rubber factory, Phangla subdistrict, Sadoa district, Songkhla on August 13-16, 2019. *Journal of Disease Prevention and Control : DPC.2 Phitsanulok*. 2020; 7(2): 1-13. Thai.
6. Inthong W. Sulfate removal from latex rubber industry wastewater by using Phuket incinerator fly ash [MSc thesis]. Songkhla: Prince of Songkla University; 2008. Thai.

7. Phawanna P, Bangbang W, Laemchieb P. Synthesis of cation exchange resins from water hyacinth chemically modified with citric acid. Science and technology nakhon sawan rajabhat university journal. 2017; 9(10): 17-30. Thai
8. Lankapon P. Situation of marine shrimp products in the first month of the year 2022 [Internet]. 2022 [updated 2022 Apr 30; cited 2022 Dec 22]. Available from : <https://www.fisheries.go.th/strategy/fisheconomic/Monthly%20report/Shrimp/1.กุ้งทะเล%203%20เดือน%2065.pdf>
9. Tamariz E, Rios-Ramírez A. Biodegradation of medical purpose polymeric materials and their impact on biocompatibility. [internet]. 2013. [updated 2013 Jun 14; cited 2022. Jul 11]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/45099>
10. Pankhoingam P. Efficacy of chitosan beads from marine animal shells for the adsorption of ammonia and formaldehyde gas. [MSc thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2009. Thai.
11. Thongmak K. Adsorption efficiency of Lead (II) Cadmium (II) and Copper(II) Ions in aqueous solution and chemistry laboratory wastewater by chitosan beads and derivative. [MSc thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2017. Thai.
12. Tanthulwet M. Water quality analysis handbook. 3rd ed. Bangkok: Chulalongkorn university Publishing; 2000.
13. Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 4500-S²⁻ sulfide In: Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington DC: APHA Press; 2018.
14. Chatterjee S, Tran HN, Godfred O-B, Woo SH. Supersorption capacity of anionic dye by newer chitosan hydrogel capsules via green surfactant exchange method. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2018; 6(3): 3604-3614.
15. Aroonrote N. Effects of cross-linked chitosan beads with epichlorohydrin and *N*-carboxymethyl on adsorption of Lead(II) and Zinc(II) ions from aqueous solutions and electroplating wastewater. [MSc thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2014. Thai.
16. Boontha S. Chitosan and trimethyl chitosan and their applications in pharmaceuticals. Center for Continuing Pharmaceutical Education; 2017 Dec: 1-9. Thai.
17. Watcharin R. Organic Spectroscopy. 8th ed. Songkla: Prince of Songkla University; 2013.
18. Wang X, Tang R, Zhang Y, Yu Z, Qi C. Preparation of a novel chitosan based biopolymer dye and application in wood dyeing. Polymers (Basel). 2016; 8(338): 1-13.