



การกำจัดของเกลือแคดเมียมและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโดยใช้เยื่อกรองนาโน Removal of Cadmium salts and Effluent Organic Matter by Nanofiltration Membrane

สุพัตพงษ์ มัตราจ^{1*} ปริญญาพร บุญสนอง² และ นันทพร จอมคำสิงห์²
Supatpong Mattaraj^{1*}, Priyaporn Bunsanong² and Nanthaporn Chomkamsing²

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี

² สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

^{1*} Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

² Environmental Engineering Program, Department of Chemical Engineering, Ubon Ratchathani University

*E-mail : supatpong.m@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดเกลือแคดเมียมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโดยใช้เยื่อกรองนาโน การทดสอบโดยใช้ชุดทดลองการไหลตามแนวตั้งโดยที่มีแผ่นเยื่อกรองถูกใส่ในระบบ การกรองเป็นการศึกษาภายใต้ความดันคงที่ในการดำเนินระบบเท่ากับ 60 psig และค่าความเป็นกรดต่างสารละลายเท่ากับ 7 ที่มีปัจจัยที่แตกต่างกัน ได้แก่ (1) ชนิดของเกลือแคดเมียมที่แตกต่างกัน (ได้แก่ แคดเมียมคลอไรด์ แคดเมียมซัลเฟต และแคดเมียมไนเตรต) (2) ความแรงประจุที่ 0.005, 0.01 และ 0.015 M (3) ชนิดของเกลือแคดเมียมที่แตกต่างกัน (ได้แก่ แคดเมียมคลอไรด์ แคดเมียมซัลเฟต และแคดเมียมไนเตรต) ร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้น 10 mg/L จากการศึกษาพบว่าแคดเมียมซัลเฟต (ร้อยละ 99.15-99.87) ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมสูงกว่าแคดเมียมคลอไรด์ (ร้อยละ 95.31-97.56) และแคดเมียมไนเตรต (ร้อยละ 91.22-95.78) สำหรับผลของเกลือแคดเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง พบว่าแคดเมียมซัลเฟต (ร้อยละ 85.86-91.34) ให้ค่าการกำจัดสูงกว่าแคดเมียมไนเตรต (ร้อยละ 76.98-85.17) และแคดเมียมคลอไรด์ (ร้อยละ 71.22-77.82) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าให้ค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าการกำจัดแคดเมียมที่ไม่มีสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง การเพิ่มความแรงประจุจาก 0.005 M ถึง 0.015 M ส่งผลให้ลดค่าการกำจัดของแคดเมียมลง ขณะที่การกำจัดของแคดเมียมซัลเฟตให้ค่าการกำจัดสูงสุดสอดคล้องกับผลการกำจัดแคดเมียมที่ไม่มีสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

คำสำคัญ : เยื่อกรองนาโน สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง แคดเมียม การกำจัด

Abstract

The objective of this research was to study the removal of Cadmium Salts and effluent organic matter (EfOM) by nanofiltration (NF) membrane. This was studied using a dead-end test cell in which the membrane sheet was inserted. The filtration experiments were determined under constant operating pressure of 60 psig and solution pH of 7 with different factors such as (1) different types of cadmium salts (i.e. cadmium chloride, cadmium sulfate and cadmium nitrate) (2) the ionic strengths of 0.005, 0.01 and 0.015 M (3) the different types of cadmium salts (i.e. cadmium chloride, cadmium sulfate and cadmium nitrate) combined with EfOM at a concentration of 10 mg/L. Experimental results revealed that cadmium sulfate (99.15-99.87%) exhibited greater



cadmium removal than cadmium chloride (95.31-97.56%) and cadmium nitrate (91.22-95.78%). For the effects of cadmium salts and EfOM, cadmium sulfate (85.86-91.34%) showed greater removal efficiencies than cadmium nitrate (76.98-85.17%) and cadmium chloride (71.22-77.82%), indicating relatively lower values than those without EfOM. Increased ionic strength from 0.005 M to 0.015 M resulted in decreased cadmium rejection, while the removals of cadmium sulfate presented the highest values, corresponding to those without EfOM.

Keywords : Nanofiltration Membrane, Effluent Organic Matter, Cadmium, Removal

บทนำ

การเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยี การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการแก้ไข หนึ่งในผลกระทบนั้นคือการรั่วไหลของโลหะหนักปนเปื้อนในแหล่งน้ำ หากกำจัดไม่ถูกวิธีจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ทั้งนี้โลหะหนักเป็นสารคงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้เองตามธรรมชาติ ก่อให้เกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ทำให้มนุษย์ได้รับผลกระทบหากมีการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายทั้งทางตรงและทางอ้อม แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่ถูกใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานทำสี และ โรงงานทำพลาสติก เมื่อถูกปล่อยหรือปนเปื้อนในแม่น้ำสร้างความเสียหายต่อระบบนิเวศวิทยาโดยรอบ ทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ สภาพดินบริเวณที่มีการปนเปื้อนก็ไม่สามารถปลูกพืชได้เช่นกัน (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13 (ชลบุรี), 2549) นอกจากนี้สารแคดเมียมยังมีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ด้วย กล่าวคือ ถ้าได้รับปริมาณมากในทันที อาจทำให้เกิดโรค อีไต อีไต (“Itai-itai” disease) มีผลให้กระดูกเปราะ และปวดอย่างรุนแรง ถ้าได้รับสารในปริมาณน้อยแต่เป็นเวลานาน จะก่อให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง ไตทำงานผิดปกติ ภาวะกระดูกพรุน ความจำเสื่อม บางครั้งซึมเศร้า บางครั้งร่าเริง (Manic Depressive Behaviour) ถ้ามีอาการอ่อนเพลียอาจหมดสติและตายได้ (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13 (ชลบุรี), 2549) กระบวนการกำจัดแคดเมียมมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic Process) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Process) ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม แต่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีลักษณะเฉพาะ ต้องการพื้นที่กำจัด และมีการใช้พลังงานสูง รวมทั้งค่าใช้จ่ายที่สูงตามไปด้วย กระบวนการกรองแบบนาโนถือเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจและกำลังได้รับความนิยม และใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เช่น การบำบัดน้ำเสีย กระบวนการทำน้ำดื่มและน้ำประปา เป็นต้น เยื่อกรองนาโนสามารถแยกสารอินทรีย์ทางธรรมชาติออกจากน้ำได้ (Mattaraj and Kilduff, 2003) และสามารถที่จะกรองสารอินทรีย์ที่มีไอออนบวกแบบประจุได้ โดยมีความต้องการพื้นที่น้อยและค่าบำรุงรักษาต่ำ (Yildiz et al., 2003) ดังนั้นเยื่อกรองนาโนจึงสามารถแยกสารละลายออกจากน้ำสามารถกรองสารอินทรีย์ซึ่งก่อให้เกิดความกระด้าง และสารอินทรีย์ก่อให้เกิดปัญหาต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติรวมทั้งกระบวนการผลิตน้ำได้ โดยสารอินทรีย์ในน้ำสามารถจำแนกได้ 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter) เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดสีในแหล่งน้ำ ในกระบวนการผลิตน้ำประปาสารอินทรีย์ถูกกำจัดไม่หมดจะทำปฏิกิริยากับคลอรีนซึ่งทำให้เกิดสารก่อมะเร็งได้ สารประกอบอินทรีย์สังเคราะห์ (Synthetic Organic Compounds) และสารชีวภัณฑ์ละลายน้ำ (Soluble Microbial Products) ซึ่งสารอินทรีย์ในน้ำทั้งนี้จึงประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิด ตั้งแต่สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำไปจนถึงสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น โปรีติน โพลีแซคคาไรด์ กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิก กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก กรดอินทรีย์และส่วนประกอบของเซลล์ เป็นต้น (Barker et al., 2000) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสารอินทรีย์ในน้ำทั้งก่อให้เกิดปัญหาต่อแหล่งน้ำและการผลิตน้ำสะอาด โดยทำให้เกิดสีและกลิ่นในแหล่งน้ำ การกัดกร่อน และการ



เจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบจ่ายน้ำ รวมทั้งสามารถก่อให้เกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-Products: DBPs) (Marhaba et al., 2003) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำ ระบบนิเวศ และการนำมาใช้ประโยชน์ อีกทั้งทำให้ขาดแคลนน้ำสะอาดสำหรับอุปโภคและบริโภค จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการบำบัดน้ำให้มีความสะอาดเพียงพอ ก่อนที่จะนำไปใช้ได้ ทั้งนี้ปัญหาของกระบวนการเยื่อกรอง คือ การลดลงของอัตราการไหล โดยมีสาเหตุมาจากการเกิด Concentration Polarization (CP) ทำให้เกิดการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุนของเยื่อกรอง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ สารละลายมีค่าลดลงต้องทำความสะอาดบ่อยครั้งขึ้น และทำให้อายุการใช้งานของเยื่อกรองสั้นลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการกำจัดของเกลือแคลเซียมร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเยื่อกรองนาโน ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้ เพื่อให้เกิดการประยุกต์หรือปรับใช้เยื่อกรองนาโนให้เกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วิธีการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Sodium hydroxide (NaOH), Citric acid ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$), Cadmium chloride ($CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$), Cadmium sulfate ($3CdSO_4 \cdot 8H_2O$), และ Cadmium nitrate ($Cd(NO_3)_2$)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ ได้แก่ เครื่อง UV spectrophotometer (SHIMADZU UV1204, Japan), เครื่อง pH meter (Eutech pH 700 Meter, Singapore), เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า (HANNA รุ่น HI98303, USA) และเครื่อง AAS (PerkinElmer AAnalyst 200, U.S.A)

สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง

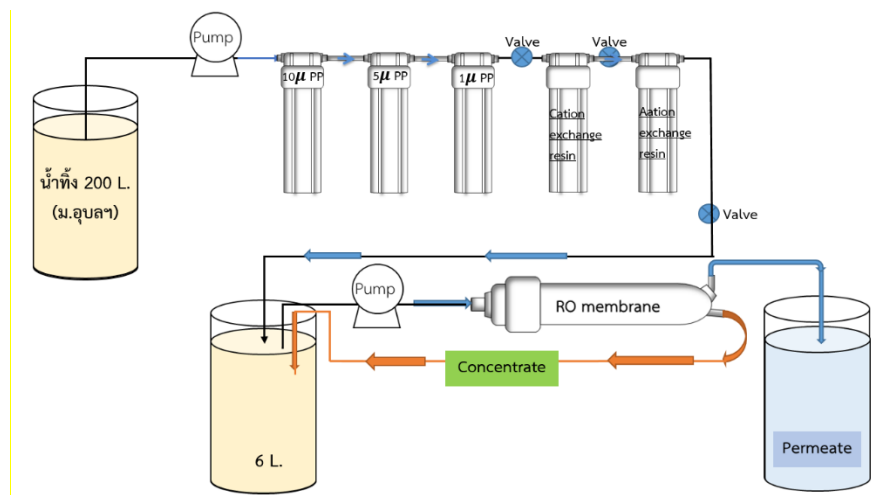
สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากบ่อเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อเดิมอากาศแล้วภายในมหาวิทยาลัย อุบลราชธานีคุณสมบัติของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งมีดังนี้ สารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด 16.19 mg/L ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 nm เท่ากับ 0.05 cm^{-1} ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ $382.49 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ค่าพีเอชอยู่ที่ 8.15 การเตรียมสารอินทรีย์เข้มข้น โดยการนำน้ำเก็บมาจากจุดที่น้ำไหลออกจากบ่อตกตะกอนมาจำนวน 200 L ผ่านกระบวนการบำบัดดังแสดงในภาพที่ 1 โดยน้ำจากบ่อตกตะกอนจะนำมาผ่านการกรองแบบไมโครขนาด 10, 5 และ $1 \mu\text{m}$ ตามลำดับ เพื่อบำบัดน้ำเบื้องต้น จากนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจะเข้าสู่การกรองแบบออสโมซิสผกกลับ เพื่อแยกสารอินทรีย์เข้มข้นให้เหลือปริมาตรสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งเข้มข้นประมาณ 6 ลิตร และสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งเข้มข้นจะถูกบรรจุในภาชนะที่ปิดสนิทและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการรักษาสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งให้อยู่ในสภาวะที่พร้อมสำหรับการกรองของเยื่อกรองนาโนในขั้นตอนต่อไป

การเตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายจากชนิดของเกลือแคลเซียมที่แตกต่างกัน ได้แก่ $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$, $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$ และ $Cd(NO_3)_2$ ด้วยการปรับความแรงประจุ (ionic strength) 3 ค่า คือ 0.005, 0.01 และ 0.015 M ความดันที่พีเอช 7 EFOM ความเข้มข้น 10 mg/L เติมน้ำในระบบความดันที่ 60 psig ตลอดการทดลอง และเวลาในการเดินระบบ 240 mins ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเตรียมสารละลาย

| ปัจจัยที่ศึกษา | ค่าที่ศึกษา | ปัจจัยควบคุม |
|---|--|--|
| ผลของเกลือแคดเมียม | - $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ - $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ | I.S. = 0.01 M, pH = 7 |
| ผลร่วมระหว่างเกลือแคดเมียมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง | - $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ + EfOM - $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ + EfOM - $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ + EfOM | EfOM = 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, I.S. = 0.01 M, pH = 7 |
| ความแรงประจุ | I.S. = 0.005, 0.01, 0.015 M | EfOM = 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH = 7 |



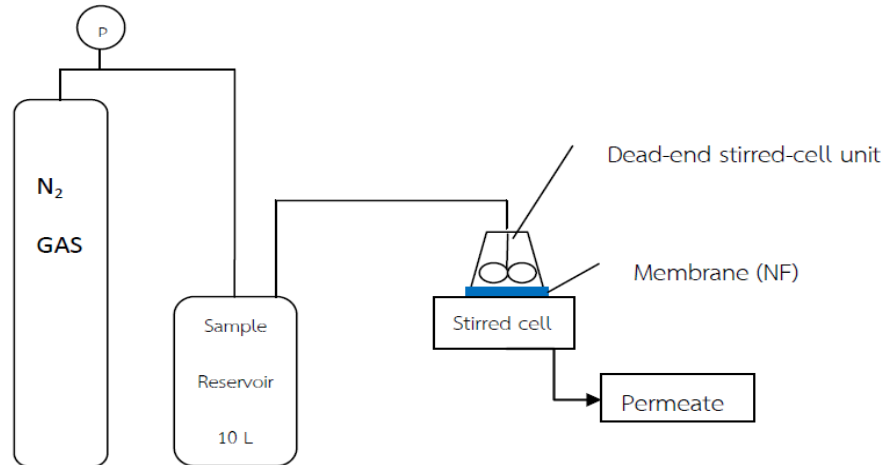
ภาพที่ 1 การแยกสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งเข้มข้นด้วยเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ

เยื่อกรองนาโน

เยื่อกรองนาโนผลิตจากโพลีเอไมด์ รุ่น HL4040FM ของบริษัท GE Water & Process Technologies มีความสามารถในการกำจัดสารที่มีขนาดโมเลกุล 150-300 Dalton ค่าพีเอชที่ใช้ในการดำเนินระบบอยู่ระหว่าง 3-9 และมีความสามารถในการทนต่อคลอรีนที่ระดับความเข้มข้นที่ต่ำน้อยกว่า 0.1 ppm อุณหภูมิที่สามารถทนได้สูงสุดที่ 50 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบอยู่ที่ 70-300 psi นำมาตัดให้เป็นแผ่นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm จะนำไปทดสอบร่วมกับชุดทดสอบเยื่อกรองการไหลตามแนวตั้ง (Dead-End filtration)

ชุดทดลองการไหลตามแนวตั้ง

ภาพที่ 2 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรอง ระบบนี้ใช้เป็นชุดทดสอบการไหลตามแนวตั้ง โดยจะอาศัยแรงดันจากก๊าซไนโตรเจนป้อนสารละลายเข้าในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นเยื่อกรอง น้ำตัวอย่างจะถูกส่งผ่านมายังชุด Stirred cell ซึ่งภายในจะบรรจุแผ่นเยื่อกรองนาโน ขนาดพื้นที่ใส่แผ่นเยื่อกรองขนาด 0.0045 m^2 โดยคำนวณตามพื้นที่ของชุดทดสอบ การทดลองผ่านความดันในระบบทำให้น้ำไหลผ่านแผ่นกรองออกมาทาง pipe จะเรียกว่า เพอร์มิเอท (Permeate) เยื่อกรองนาโนจะดำเนินระบบด้วยความดันให้คงที่ตลอดการทดลองที่ 60 psig และใช้เวลาในการทดลอง 240 min วัดอัตราการไหลของเพอร์มิเอทและเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลาเพื่อนำไปตรวจวัดความเข้มข้นของสารแคดเมียมและคำนวณค่าการกำจัดต่อไป



ภาพที่ 2 การทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน

การตรวจวิเคราะห์ผล

นำน้ำเพอร์มิเอทที่เก็บแต่ละช่วงเวลา มาทำการวัดหาปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำที่จะใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (model: UV mini-1240, Shimadzu Corporation, Japan) ที่ความยาวคลื่น 254 nm และการวัดหาปริมาณของแคดเมียมโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Perkin Elmer, USA)

สมการที่ใช้ในการศึกษา

จากการศึกษาของ Mattaraj and Kilduff (2003) เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ โดยวัดความเข้มข้นในส่วนที่ผ่านเยื่อกรองและส่วนที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_r}\right) \times 100 \quad (1)$$

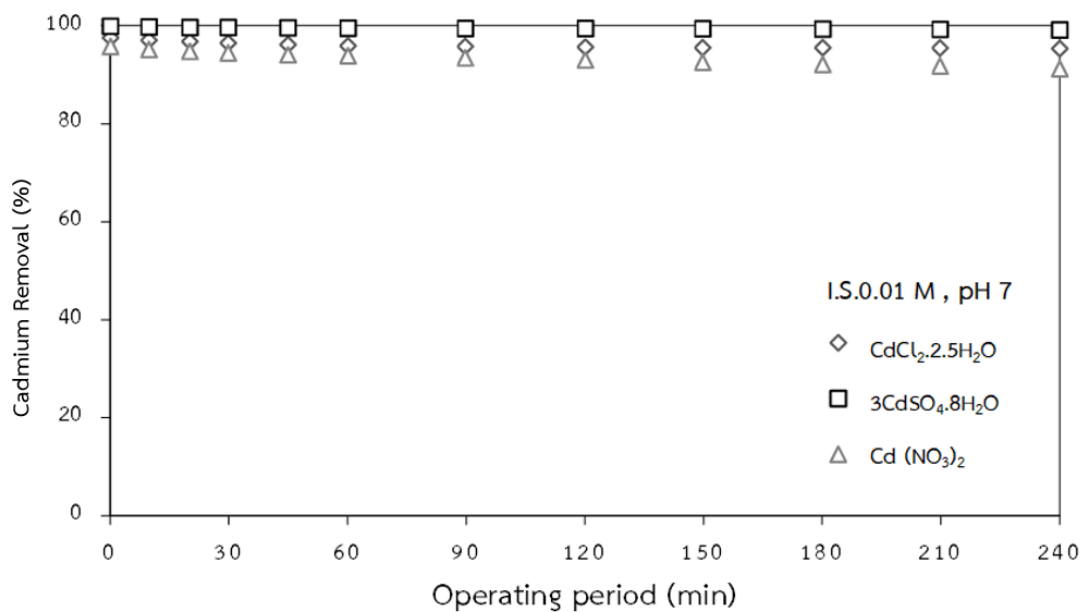
โดย R คือ ร้อยละการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ, C_p คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการกรอง ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), C_r คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ไม่ผ่านการกรอง ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

ผลการวิจัย

ผลของชนิดเกลือแคดเมียมต่อค่าการกำจัดแคดเมียม

ผลของเกลือแคดเมียมต่อประสิทธิภาพการกำจัด โดยเกลือแคดเมียมที่ใช้ได้แก่ แคดเมียมคลอไรด์ ($\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$) แคดเมียมซัลเฟต ($3\text{CdSO}_4\cdot 8\text{H}_2\text{O}$) และแคดเมียมไนเตรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) ควบคุมที่ความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M พีเอช 7 ไม่มีการเติมสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง และเดินระบบความดันที่ 60 psig ตลอดการทดลอง ภาพที่ 3 แสดงผลของเกลือแคดเมียมต่อประสิทธิภาพการกำจัด ผลการทดลองพบว่า ค่าการกำจัดสารแคดเมียมของเกลือแคดเมียมซัลเฟต (อ้างอิงจากสมการที่ (1)) ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดอยู่ในช่วงร้อยละ 99.15-99.87 รองลงมาคือเกลือแคดเมียมคลอไรด์ และเกลือแคดเมียมไนเตรต ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 95.31-97.56 และ 91.22-95.78 ตามลำดับ อาจเนื่องจากผลของประจุ (Charge effect) ระหว่างประจุลบจากไอออนจากสารและประจุลบของแผ่นกรองนาโน โดยประจุลบของซัลเฟตทำให้เกิดแรงผลักจากแผ่นกรองนาโนได้ดีกว่าประจุหนึ่งของคลอไรด์และไนเตรต จึงทำให้การกำจัดสารแคดเมียมให้ค่าสูงสุดจากประจุ

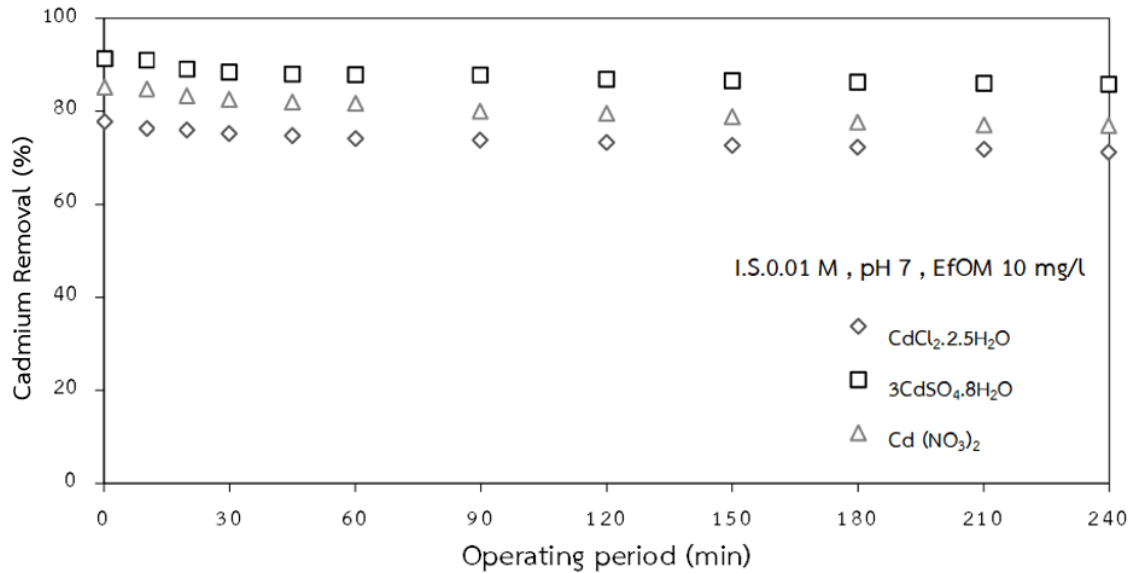
สองลบของซัลเฟตเนื่องจากการรักษาสภาพสมดุลของประจุ โดยหลักประจุสมดุลประจุลบจะถูกกลไกการผลักทางไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองผลักประจุสองลบของซัลเฟตได้มากกว่าประจุหนึ่งลบ ทำให้ค่าการกำจัดของเกลือ $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ให้ค่าสูงสุด นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของประจุสองลบของซัลเฟต $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (MW 769.52 g/mol) มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าสารละลาย $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (MW 228.35 g/mol) และสารละลาย $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ (MW 236.41 g/mol) ตามลำดับ จึงส่งผลให้เยื่อกรองนาโนมีความสามารถในการกักกันสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้เกิดการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง จากการศึกษาที่ผ่านมา (Lhassani et al., 2001) ระบุการกำจัดเยื่อกรองนาโนเกิดจากการผลักกันของประจุลบของไอออนจากเยื่อกรองนาโน โดยประจุที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกกักกันได้มากกว่า (จากคุณลักษณะทางฟิสิกส์) และการละลายการแพร่กระจาย (Solution-diffusion) มีส่วนต่อค่าการกำจัด โดยประจุที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีการกักกันที่น้อยลง (จากคุณลักษณะทางเคมี)



ภาพที่ 3 ผลของชนิดเกลือแคดเมียมต่อประสิทธิภาพการกำจัด

ผลร่วมระหว่างเกลือแคดเมียมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งต่อการกำจัดของแคดเมียม

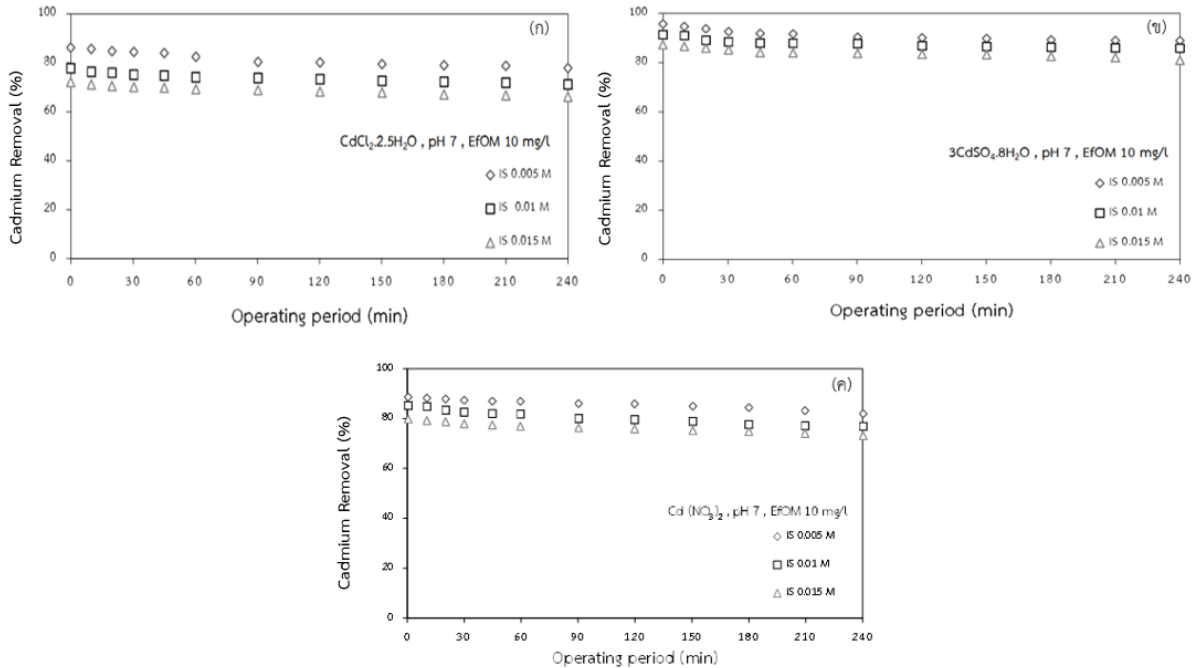
จากภาพที่ 4 แสดงผลของเกลือแคดเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งต่อประสิทธิภาพการกำจัด โดยเกลือแคดเมียมที่ใช้ได้แก่ $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ควบคุมที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง (EfOM) 10 mg/L ความแรงประจุเท่ากับ 0.01 M ค่าพีเอช 7 และเดินระบบความดันที่ 60 psig ตลอดการทดลอง จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแคดเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งปรากฏว่าแคดเมียมซัลเฟตให้ค่าการกำจัดมากที่สุด รองลงมาคือสารละลายแคดเมียมไนเตรตและเกลือแคดเมียมคลอไรด์ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 85.86-91.34, 76.98-85.17 และ 71.22 – 77.82 ตามลำดับ เนื่องจากสารละลาย $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าสารละลาย $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ และสารละลาย $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ตามลำดับ เมื่อรวมกันกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจึงส่งผลให้เกิดการกักกันที่ผิวของเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแคดเมียมของสารละลายแคดเมียมซัลเฟตเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การเติมสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งทำให้เกิดการจับตัวกันของประจุบวกแคดเมียมกับประจุลบของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งทำให้เกิดการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองซึ่งทำให้แคดเมียมสามารถผ่านเยื่อกรองนาโนส่งผลต่อการลดลงของค่าการกำจัดของแคดเมียม



ภาพที่ 4 ผลร่วมระหว่างเกลือแคดเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งต่อประสิทธิภาพการกำจัด

ผลของความแรงประจุต่อการกำจัดของแคดเมียม

ผลของความแรงประจุต่อประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม โดยเกลือแคดเมียมที่ใช้ได้แก่ $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$, $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$ และ $Cd(NO_3)_2$ โดยปรับความแรงประจุเท่ากับ 0.005, 0.01 และ 0.015 M ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง เท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอช 7 และเดินระบบความดันที่ 60 psig ตลอดการทดลอง จากการทดลองพบว่า ที่ความแรงประจุต่ำสุดเท่ากับ 0.005 M ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารแคดเมียมมากที่สุดเปรียบเทียบกับทั้ง 3 ชนิด ($CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$, $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$ และ $Cd(NO_3)_2$) โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดสารแคดเมียมอยู่ในช่วงร้อยละ 69.05-81.96, 84.11-91.51, 76.58-86.02 ขณะที่การกำจัดของ $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$ (ที่มีประจุสองลบของซัลเฟต) ให้ค่าการกำจัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับประจุหนึ่งลบของคลอไรด์และไนเตรต เมื่อเพิ่มความแรงประจุเป็น 0.01 และ 0.015 M ค่าการกำจัดสารแคดเมียมมีค่าลดลง และในขณะเดียวกันค่ากำจัดสารแคดเมียมของเกลือทั้งสามชนิดก็มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการกรอง อาจเป็นผลมาจากเมื่อเพิ่มความแรงประจุสูงขึ้นความสามารถในการกำจัดเกลือแคดเมียมมีค่าลดลง เนื่องจากที่ระดับความแรงประจุสูงจะมีปริมาณเกลือแคดเมียม (ประจุสองลบของแคดเมียม) ที่เพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้ประจุลบบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองมีค่าที่ลดลงทำให้เกิดชั้นการบีบอัด (Double layer) บนผิวของเยื่อกรอง และการลดลงของประจุลบผิวหน้าเยื่อกรองเป็นผลทำให้แรงผลักที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าเยื่อกรองและประจุลบจากเกลือมีค่าที่ลดลงด้วย ส่งผลต่อการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองทำให้ความเข้มข้นของแคดเมียมผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้น (C_p สูงขึ้น) และส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมที่ลดลง ดังแสดงไว้ในสมการที่ (1)



ภาพที่ 5 ผลของความแรงของประจุต่อค่าประสิทธิภาพการกำจัด (น) $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (ข) $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ และ (ค) $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$

สรุปผลการวิจัย

ผลของชนิดเกลือแคดเมียมต่อประสิทธิภาพการกำจัด พบว่า ค่าการกำจัดแคดเมียมของสารละลาย $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด อยู่ในช่วงร้อยละ 99.15-99.87 รองลงมาคือสารละลาย $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ และสารละลาย $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัด อยู่ในช่วงร้อยละ 95.31-97.56 และ 91.22-95.78 ตามลำดับ ผลของเกลือแคดเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งต่อค่าการกำจัด พบว่า การกำจัดเกลือแคดเมียมซัลเฟตให้ค่าการกำจัดมากที่สุด รองลงมาคือสารละลายแคดเมียมไนเตรท และเกลือแคดเมียมคลอไรด์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 85.86-91.34, 76.98-85.17 และ 71.22-77.82 ตามลำดับ ผลของความแรงประจุต่อการกำจัดของแคดเมียม ผลการทดลองพบว่า ที่ความแรงประจุต่ำสุดเท่ากับ 0.005 M ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารแคดเมียมมากที่สุดเปรียบเทียบทั้ง 3 ชนิด ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดสารแคดเมียมอยู่ในช่วงร้อยละ 69.05-81.96, 84.11-91.51, 76.58-86.02 นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งและความแรงประจุทำให้ผลการกำจัดแคดเมียมลดลง อย่างไรก็ตามการกำจัดสารแคดเมียมของกลุ่มสารประจุสองลบของซัลเฟตยังให้ค่าการกำจัดที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับประจุหนึ่งลบของคลอไรด์และไนเตรต ตามลำดับ และมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลของเกลือแคดเมียมร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งและการเพิ่มความแรงประจุ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือในการทดลอง สถานที่วิจัย ตลอดจนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยในครั้งนี้



เอกสารอ้างอิง

- สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13 (ชลบุรี). (2549, 12 ตุลาคม). *สิ่งแวดล้อมที่น่ารู้: โลหะหนักตัวการปัญหาสิ่งแวดล้อม*. Mnre. <http://www.mnre.go.th/reo13/th/news/detail/9211>
- Barker, D. J., Salvi, S. M. L., Langenhoff, A. A. M. and Stuckey, D. (2000). Soluble microbial products in ABR treating low-strength wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 126(3), 239-249.
- Lhassani, A., Rumeau, M., Benjelloun, D. and Pontie, M. (2001). Selective demineralization of water by nanofiltration application to the defluorination of brackish water. *Water Research*, 35(13), 3260-3264.
- Marhaba, T. F., Pu, Y. and Bengraïne, K. (2003). Modified dissolved organic matter fraction technique for natural water. *Journal Hazardous Materials*, 101(1), 43-53.
- Mattaraj S. and Kilduff J. E. (2003). Effect of natural organic matter properties on nanofiltration fouling. RSID 4th. *Proceeding of the forth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering*.
- Yildiz, E., Nuhoglu, A., Keskinler, B., Akay, G. and Farizoglu, B. (2003). Water softening in a crossflow membrane reactor. *Desalination*, 159(2), 139-152.