

การประยุกต์ใช้เยื่อกรองแบบนาโนสำหรับกำจัดแคลเซียมซัลเฟต และสารอินทรีย์ธรรมชาติ

Application of Nanofiltration Membrane for Calcium sulfate and Natural Organic Matter Removal

อภิญา อ่อนสาร, สุพัฒน์พงษ์ มัตราจ*, วิภาดา เดชะปัญญา, กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา, เทียมมะณีรัตน์วีระพันธ์, และ
สมภพ สนองราษฎร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมืองศรีโค

วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190

Apinya Onsarn, Supatpong Mattaraj*, Wipada Dechapanya, Karnika Ratanapongleka, Tiammanee Rattanaweerapan,
and Sompop Sanongraj

Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Mueang Si Khai, Warin
Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

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

Received: Dec 08, 2021; Revised: Apr 01, 2022; Accepted: Apr 22, 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งแผ่นเยื่อกรองที่ใช้ผลิตจาก GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040HM การทดสอบหาจากการกรองแบบการไหลปิดตามแนวตั้ง ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ความแรงประจุของแคลเซียมซัลเฟต ค่าพีเอช และผลรวมของแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มความแรงประจุแคลเซียมซัลเฟตส่งผลให้ค่าการลดลงของฟลักซ์สูงขึ้น อาจเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นแคลเซียมซัลเฟต ส่งผลให้อัตราการไหลผ่านเยื่อกรองลดลง สารละลายที่มีความแรงประจุ 0.015 M ให้ค่าการกำจัดซัลเฟตสูงสุดประมาณร้อยละ 97 จากการสะสมของแคลเซียมซัลเฟตบนผิวของเยื่อกรอง ผลของค่าพีเอชทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมและซัลเฟตอยู่ในช่วงร้อยละ 71 ถึง 93 สำหรับผลรวมของแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าค่าฟลักซ์สารละลายและประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมและซัลเฟตต่ำกว่ากรณีที่ไม่รวมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ

คำสำคัญ: เยื่อกรองแบบนาโน, ความแรงประจุ, แคลเซียมซัลเฟต, สารอินทรีย์ธรรมชาติ, การลดลงของฟลักซ์

Abstract

The objective of this research was to study the removal efficiency of calcium sulfate and natural organic matter (NOM) using nanofiltration membrane. The membrane sheets used were obtained from GE Water & Process Technologies (model HL4040HM). The filtration experiments were determined by a dead-end filtration membrane. Factors studied were ionic strengths of calcium sulfate, pH and combined effects between calcium sulfate and NOM. The experimental results revealed that increased ionic strengths of calcium sulfate provided higher flux decline, possibly increased concentrations

of calcium sulfate, thus decreased permeate flow. Solutions having high ionic concentration of 0.015 M resulted in the highest sulfate removal about 97%, thus enhancing accumulation of calcium sulfate on the membrane surface. The pH effects caused calcium and sulfate removal ranging from 71% to 93 %. For combined effects between calcium sulfate and NOM, it was found that fluxes and rejection efficiencies (both calcium and sulfate rejections) showed lower values than those without NOM.

Keywords : Nanofiltration membrane, Ionic strengths, Calcium sulfate, Natural Organic Matter (NOM), Flux decline

1. บทนำ

สารอินทรีย์ธรรมชาติ(Natural Organic Matter: NOM) เป็นสารจำพวกที่ทำให้เกิดสีหรือสีน้ำตาลอ่อนในน้ำ สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำผิวดินส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ซึ่งเกิดจากซากผลิตภัณฑ์ของเสียในธรรมชาติที่มีองค์ประกอบด้วย คาร์บอน ออกซิเจนและ ไฮโดรเจน เป็นหลัก อีกทั้งสารอินทรีย์ธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ 1. สารอินทรีย์กลุ่มไฮโดรโฟบิก(Hydrophobic) ได้แก่ สารประกอบฮิวมิก (Humic Substance) และกรดฟูลวิก (Fulvic acid) โดยมีคุณสมบัติของคอลลอยด์เป็นประจุลบ 2. สารอินทรีย์กลุ่มไฮโดรฟิลิก(Hydrophilic) จะขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำซึ่งจะมี MWCO ในช่วง 300 ถึง 30,000 Da นอกจากนี้ยังพบว่าในแหล่งน้ำผิวดินมากกว่า 50% เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon: DOC) [1] ส่วนใหญ่พบสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 10 mg/L ซึ่งการวัดหาปริมาณของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC) ว่าละลายในน้ำมากหรือน้อยในน้ำซึ่งจะมีหน่วย mg/L แต่อย่างไรก็ตามสีของสารอินทรีย์ธรรมชาติดังส่งผลกระทบต่อผู้ใช้น้ำในชีวิตประจำวัน ได้แก่ ระบบสุขภัณฑ์มีคราบเปื้อนเกิดคราบบนผิวท่อในระบบนำส่งท่อประปา และที่สำคัญหากมีการปนเปื้อนในน้ำที่มีการเติมสารเคมี เช่น คลอรีน เพื่อฆ่าเชื้อโรค อาจเกิดผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products: DBPs) เช่น เกิดเป็นสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes: THMs) ซึ่งพบว่าสารดังกล่าวอาจมีส่วนทำให้เกิดโรคมะเร็ง [2] ตามเอกสารแนะนำคุณภาพน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO's Guidelines

for Drinking Water Quality) ปี ค.ศ. 2011 ได้กำหนดค่าแนะนำสำหรับไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 รูปแบบที่พบบ่อย คือ 1. คลอโรฟอร์ม (Chloroform) มีค่าไม่เกิน 0.3 mg/L 2. โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethanes: BDCM) มีค่าไม่เกิน 0.06 mg/L 3. ไดโบรโมคลอโรมีเทน (Dibromochloromethanes: DBCM) มีค่าไม่เกิน 0.1 mg/L และ 4. โบรโมฟอร์ม (Bromoform) มีค่าไม่เกิน 0.1 mg/L [3]

ปัจจุบันกระบวนการผ่านเยื่อกรอง (Membrane Process) เป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำขึ้นสูงเพื่อปรับปรุงน้ำธรรมชาติ ที่ผ่านการบำบัดแล้วให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เยื่อกรองแบบนาโน (Nanofiltration membrane) เป็นวิธีการกรองเพื่อใช้สำหรับผลิตน้ำสะอาดซึ่งสามารถกักกันสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่มีขนาดเล็กแบคทีเรีย จุลินทรีย์ รวมถึงเกลืออนินทรีย์บางชนิดได้ [4] ดังนั้นน้ำที่ได้จึงเป็นน้ำที่มีคุณภาพดี สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตน้ำสำหรับอุปโภค บริโภค ระดับอุตสาหกรรมและการเกษตร รวมถึงการใช้เยื่อกรองนาโนยังช่วยลดการใช้พลังงานและลดการใช้สารเคมีอินทรีย์ได้อีกด้วย [5] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าระบบเยื่อกรองแบบนาโน สามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ได้สูงถึงร้อยละ 90 ถึง 95 กำจัดไอออนประจุเดียวได้ประมาณร้อยละ 70 กำจัดสารไตรฮาโลมีเทนร้อยละ 91 ถึง 98 กำจัดความกระด้างของน้ำที่มีแคลเซียมกับแมกนีเซียมร้อยละ 85 ถึง 95 [6–8] สำหรับปัญหาหลักที่พบจากการใช้เยื่อกรองแบบนาโน คือการอุดตันบนพื้นผิวเยื่อกรอง ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง ทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมากขึ้น และต้องทำความสะอาดอยู่บ่อยครั้ง จึงทำให้อายุการใช้งานของเยื่อกรองมีระยะเวลาที่สั้นลง [9] โดยการอุด

ตันของเยื่อกรอง (Membrane Fouling) สามารถเกิดได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การเกิดปรากฏการณ์คอนเซนตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization) การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation) การเกิดชั้นเจล (Gel Layer) เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังมีสาเหตุอีกหลายประการนอกเหนือจากสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโน เช่น คุณสมบัติเยื่อกรอง วิธีดำเนินระบบ และคุณลักษณะของน้ำดิบ เป็นต้น ทั้งนี้ นอกจากสารอินทรีย์ธรรมชาติที่อาจพบได้ในแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติแล้ว ยังสามารถพบเกลืออนินทรีย์ (Inorganic Salts) เช่น เกลือคลอไรด์ (Cl^-) เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) เกลือฟอสเฟต (PO_4^{3-}) และเกลือคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) เป็นต้น

งานวิจัยนี้ นอกจากศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโนแล้ว ยังสนใจศึกษาแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งถูกใช้ในกระบวนการผลิตจากภาคอุตสาหกรรม โดยใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร สำหรับทางการแพทย์จะใช้แคลเซียมซัลเฟตเป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปปูนพลาสเตอร์สำหรับเข้าเฝือก การเกษตรจะใช้แคลเซียมซัลเฟตสำหรับปรับปรุงดิน [10–11] โดยภายหลังกระบวนการผลิตสารเคมีดังกล่าวจะถูกชะล้างและปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลให้น้ำเกิดความกระด้าง ทำให้คุณสมบัติของน้ำเป็นค่า ส่งผลต่อการนำไปใช้ได้ไม่ดีเท่าที่ควรและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง เช่น ทางเกษตร ไม่เหมาะสำหรับพืชหลายชนิด รวมไปถึงการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น [12] อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของแคลเซียมซัลเฟต ยังคงมีผลกระทบในเรื่องของประจุที่ส่งผลต่อการรวมตัวกับสารอินทรีย์ธรรมชาติและประจุบนพื้นผิวของเยื่อกรองแบบนาโน นอกจากนี้แคลเซียมซัลเฟตยังจัดเป็นสารประกอบหลักที่ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวหน้าเยื่อกรองเนื่องจากการเกิดผลึกตะกอน ซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายได้น้อย และสามารถเกิดเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดได้ในระหว่างกระบวนการกรอง โดยสารละลายที่เข้มข้นขึ้นจากการที่น้ำ

ได้ซึมแพร่ผ่านเยื่อกรอง เยื่อกรองได้กักกันสารละลายเกลือไว้จนทำให้สารละลายมีความเข้มข้นถึงจุดอิ่มตัว และตกผลึกอยู่บนผิวหน้าเยื่อกรองทำให้เกิดการอุดตันได้ [13] จากงานวิจัยที่ผ่านมา [14] ศึกษาผลของเกลือคาร์บอเนตแต่ละชนิดที่มีไอออนโลหะประจุ +1 และ +2 พบว่าสามารถรวมตัวกับประจุบวกที่มีอยู่ในน้ำทำให้เกิดเป็นตะกอน (Inorganic Scalant) และเมื่อมีการรวมตัวกันกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในแหล่งน้ำผิวดิน ทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโนได้ง่าย และส่งผลต่อการลดลงของอัตราการกรองของเยื่อกรองอีกด้วย ซึ่งในการดำเนินระบบเยื่อกรองนาโน ต้องควบคุมความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตไม่ให้มีความเข้มข้นเกินความสามารถในการละลายของสารเหล่านั้นและต้องไม่เกินค่าตัวบ่งชี้ การตกผลึก (Solubility Index) ซึ่งอาจระบุเป็นค่าความสามารถในการละลายในรูปผลคูณของไอออนของประจุบวกและลบ (Solubility Products: K_{sp})

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติจากการทำงานของเยื่อกรองแบบนาโน โดยสภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ 1. ความแรงประจุของแคลเซียมซัลเฟต 2. ค่าพีเอชของสารละลาย 3. ความเข้มข้นของสารผสมระหว่างแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยศึกษาประสิทธิภาพการกรองจากค่าการกำจัดของสารและการลดลงของฟลักซ์เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำไปสู่การประยุกต์ใช้เยื่อกรองแบบนาโนให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อไป นอกจากนี้ยังเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำหรือบำบัดน้ำให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้นในปัจจุบัน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้เช่น แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) มีความบริสุทธิ์เท่ากับ 98% (Analytical reagent, KemAus Ltd., Australia) กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 36% (Analytical reagent, Ajax Finechem Pty Ltd., Australia) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความบริสุทธิ์เท่ากับ 99% (Analytical univar reagent, Ajax Finechem Pty

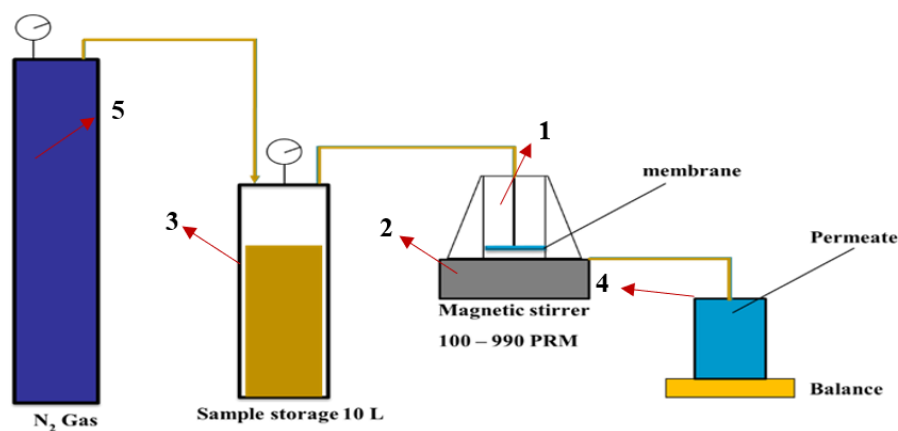
Ltd., Australia) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) มีความบริสุทธิ์เท่ากับ 98% (Analytical univar reagent, APS Fisher Chemical, England) กรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{H}_2\text{O}$) มีความบริสุทธิ์เท่ากับ 99.5% (Analytical reagent, Loba Ltd., India)

สารอินทรีย์ธรรมชาติ(NOM) ได้จากแหล่งน้ำผิวดินบริเวณภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งใช้เป็นแหล่งน้ำดิบในการผลิตน้ำประปาเพื่อการอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัยฯ โดยจากการเก็บน้ำตัวอย่าง พบว่ามีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4.45 mg/L มีค่าคลอกรีนแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 254 nm ที่ 0.185 cm^{-1} ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ $31.9 \mu\text{S}/\text{cm}$ และมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.04 จากนั้นเตรียมโดยนำน้ำดิบดังกล่าวปริมาตร 1,500 ลิตร มาผ่านเข้าสู่กระบวนการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่และกำจัดไอออนแคลเซียม และแมกนีเซียมที่ส่งผลต่อการเกิดตะกอนบนผิวเยื่อกรอง จากนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้วจะนำไปผ่านกระบวนการกรองแบบออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis Membrane) เพื่อใช้เป็นการแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยกระบวนการนี้สามารถแยกน้ำออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. น้ำที่ผ่านเยื่อกรองหรือเรียกว่า เพอเมต ซึ่งน้ำส่วนนี้จะเป็นน้ำที่มีความสะอาดสูง และ 2. น้ำที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง เรียกว่า คอนเซนเตรต ซึ่งประกอบด้วยความเข้มข้นของของสารอินทรีย์ธรรมชาติสูงจากการแยกสารอินทรีย์ของเยื่อกรองออสโม

ซิสผันกลับ โดยจะแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นให้ได้ปริมาตร 30 ลิตร จากนั้นนำสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าว ใส่ในภาชนะที่ปิดสนิท และแช่ภายใต้อุณหภูมิ 4°C เพื่อเก็บรักษาภาพสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานและปรับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติสำหรับการทดสอบกับเยื่อกรองแบบนาโนในขั้นต่อไป

2.2.เยื่อกรองแบบนาโน

เยื่อกรองแบบนาโน(Nanofiltration Membrane) จากบริษัท GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040FM มีคุณสมบัติดังนี้คือเป็นเยื่อกรองแบบ Thin Film Membrane ผลิตจาก Polyamide มีขนาดรูพรุนในช่วง 150–300 Da การกำจัดเกลือ MgSO_4 อยู่ที่ระดับร้อยละ 98 ที่ 100 psig (pound per square inch gauge) มีช่วงค่าพีเอชในการดำเนินระบบที่ 3–9 และช่วงพีเอชของการทำความสะอาดอยู่ที่ 2–10.5 มีความทนทานต่อคลอรีนค่อนข้างต่ำ $<0.1 \text{ ppm}$ ความดันของการดำเนินการอยู่ที่ 70–300 psig และความดันสูงสุดที่ทนได้คือ 600 psig สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร จะเก็บรักษาโดยการนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 1% ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่จะทำลายผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรอง



รูปที่ 1 ชุดการทดสอบเยื่อกรองแบบการไหลปิดตายตามแนวตั้ง

สำหรับชุดการทดสอบที่ศึกษา เป็นชุดแบบไหลปิดตายตามแนวตั้ง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 ชุดการทดสอบเยื่อกรองแบบนาโนเป็นชุดแบบการไหลปิดตายตามแนวตั้งที่ได้มีการศึกษามาก่อน [15] โดยที่ชุดการทดสอบนี้ประกอบด้วย 1. Stirred Cell มีลักษณะการไหลแบบปิดตายตามแนวตั้ง (Dead-End Operation) ขนาดบรรจุ 400 mL ซึ่งภายในบรรจุด้วยไบพัตควอน (Spacer) 2. แท่นกวนแบบแม่เหล็กขับเคลื่อนแรงเหวี่ยง (Magnetic stirrer) สามารถปรับความเร็วรอบ 100–990 rpm 3. ถังอัดแรงดันทำจากสแตนเลสสตีล สามารถทนแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 100 psig มีขนาดบรรจุ 10 ลิตร มีระบบเกจวัดความดันและยังสามารถปรับค่าของความดันได้ตั้งแต่ 5–100 psig 4. เครื่องชั่งความละเอียดสองตำแหน่งของ Mettler Toledo, Switzerland รุ่น PB3002-S อ่านค่าความละเอียดได้ 0.01 g และ 5. ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 99.9

การทำงานของชุดทดสอบเยื่อกรองแบบนาโน จะอาศัยการอัดแรงดันจากถังแก๊สไนโตรเจน เป็นแรงขับเคลื่อนสารตัวอย่างที่ถูกบรรจุไว้ในถังอัดแรงดัน จากนั้นสารตัวอย่างจะเคลื่อนไปยังท่อนำส่ง แล้วผ่านเข้ามายังชุดทดสอบแบบการไหลตายตัวตามแนวตั้ง และขณะที่ดำเนินระบบแรงดันจะดันสารตัวอย่างผ่านแผ่นเยื่อกรอง และเกิดการซึมผ่านเยื่อกรองไปยังภาชนะเก็บตัวอย่าง โดยจะเรียกน้ำในส่วนนี้ว่า เพอเมต (Permeate)

2.3. ขั้นตอนการทดสอบ

แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนถูกล้างด้วยน้ำกลั่นและทำการติดตั้งเยื่อกรองแบบนาโนกับชุดทดสอบ จากนั้นทำการล้างเยื่อกรองผ่านระบบชุดทดสอบเยื่อกรอง โดยใช้สารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นล้างต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.001 M เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างออกอีกครั้งด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชเท่ากับค่าพีเอชของน้ำกลั่น หลังจากที่ได้ล้างทำความสะอาดเยื่อกรองตามกระบวนการข้างต้นเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้เดินระบบด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 30 นาที เพื่อเตรียมความพร้อมก่อนการทดลอง โดยในระหว่างนี้จะหาค่าอัตราการไหลเทียบกับความดันในระบบที่ความดันระดับต่างๆ เพื่อหาค่า

การซึมผ่านของเยื่อกรอง และนำข้อมูลข้างต้นไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ก่อนและหลังล้างเยื่อกรอง ภายหลังเสร็จสิ้นผลการทดลองต่างๆ

การทดสอบด้วยน้ำตัวอย่างเป็นการนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองและเริ่มต้นการทดลองโดยอาศัยแรงดันจากถังแก๊สความดันเป็นตัวขับเคลื่อนน้ำตัวอย่างจากถังเก็บน้ำตัวอย่างผ่านท่อนำส่ง ไปยังชุดทดสอบที่มีขนาด 400 mL โดยภายในจะมีแผ่นเยื่อกรองนาโนถูกติดตั้งไว้ และแรงดันจะดันสารตัวอย่างผ่านเยื่อกรองและเกิดการซึมผ่านจากชุดทดสอบไปยังภาชนะเก็บตัวอย่างเพื่อชั่งหาน้ำหนักของปริมาตรน้ำ จากการเก็บน้ำตัวอย่างในส่วนดังกล่าว (เพอเมต) เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย 1. การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์สารละลาย โดยจะเก็บตัวอย่างตั้งแต่เวลาที่ 0 ถึง 240 นาที โดยเก็บน้ำตัวอย่างทุก 5 นาที จนครบ 60 นาที จากนั้นเก็บทุก 10 นาที จนครบ 180 นาที หลังจาก 180 นาทีเป็นต้นไป จะเก็บทุก 20 นาที จนถึง 240 นาที และ 2. การวิเคราะห์ค่าการกำจัดแคลเซียมและซัลเฟต โดยวัดค่า Atomic Absorption Spectrometer (AAAnalyst200) และค่าการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตโดยวิธีการนำไฟฟ้า ด้วยเครื่องวัด Conductivity ซึ่งน้ำตัวอย่างจะถูกฟีดสู่ระบบและเริ่มต้นการทดลอง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างในส่วนพารามิเตอร์สารละลายเพื่อทดสอบความสามารถของเยื่อกรองแบบนาโนสำหรับกักสารละลายตัวอย่าง ทุกๆ 10 นาที จนครบ 60 นาที และทุกๆ 30 นาที จนครบ 240 นาที

2.4. การตรวจวิเคราะห์ผล

สารอินทรีย์ธรรมชาติจะใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง โดย ใช้ เครื่อง UV spectrophotometer (SHIMADZU UV1204, Japan) ที่ความยาวคลื่น 254 nm ส่วนความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟต วิเคราะห์ได้จากเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer: AAS (PerkinElmer AAAnalyst200, Waltham, MA, USA) [16] การเตรียมค่าพีเอชได้จากเครื่องวัด pH meter (Eutech pH 700 Meter, Singapore) ส่วนการหาอัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัดแผ่นกรอง หรือ ฟลักซ์สารละลาย (Solution Flux: J_v) แสดงในหน่วย $L/(m^2 \cdot h)$ หรือ LMH ซึ่งถูกแสดงดังสมการที่ (1) และค่าการกักกัน (Rejection: R) แสดงดังสมการที่ (2) [17]

ฟลักซ์สารละลาย (Solution Flux: J_v)

$$J_v = \frac{Q_p}{A_m} \quad (1)$$

เมื่อ Q_p คืออัตราการไหลในส่วนของเพอมีเอท (L/h) และ A_m คือพื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน (m^2)

ค่าการกำจัด (Rejection; R) แสดงดังสมการที่ (2)

$$\% R = \left(1 - \frac{C_p}{C_r}\right) \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ C_p และ C_r คือความเข้มข้นของน้ำในส่วนเพอมีเอท (mg/L) และความเข้มข้นในส่วนของน้ำรีเทนเนต (mg/L) ตามลำดับ

2.5. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยเยื่อกรองแบบนาโน โดยที่ค่าดังกล่าวได้ทำการศึกษาและนำข้อมูลของผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารดังกล่าวมาปรับใช้กับการศึกษาในครั้งนี้ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการศึกษาโดยข้อมูลดังกล่าวสรุปไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดแคลเซียมซัลเฟตและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

ปัจจัยที่ศึกษา	ค่าที่ศึกษาของสารแคลเซียมซัลเฟต	ปัจจัยที่ควบคุม
ค่าความแรงประจุ	$CaSO_4 = 0.005, 0.01$ และ 0.015 M	NOM = 10 mg/L, pH 7
ผลของค่าพีเอช	pH = 5, 7 และ 9	NOM = 10 mg/L, I.S. = 0.01 M
ผลรวมแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ	$CaSO_4$ และ $CaSO_4 +$ NOM	NOM = 10 mg/L, I.S. = 0.01 M, pH 7

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. ผลการศึกษาการลดลงของฟลักซ์สารละลาย

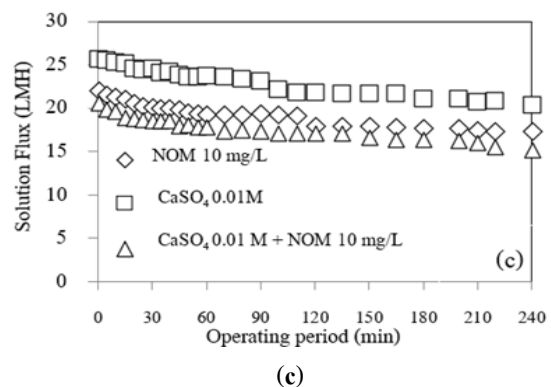
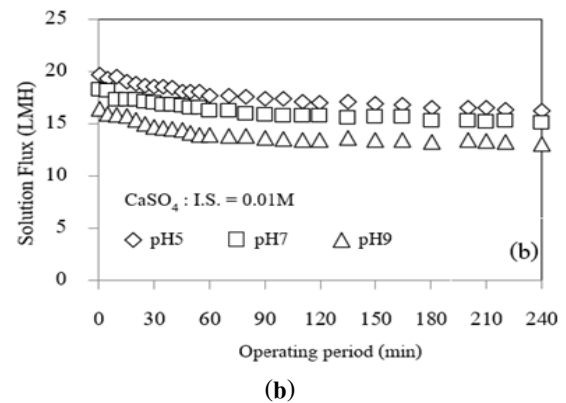
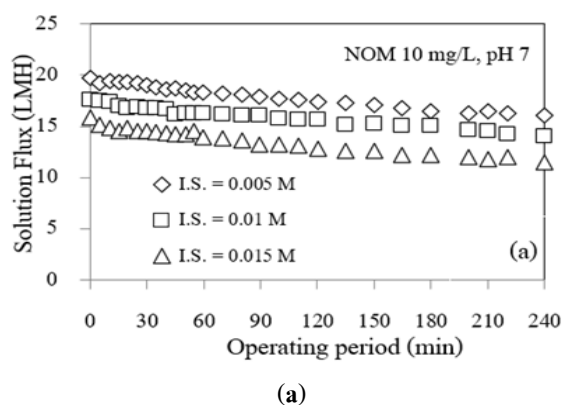
จากรูปที่ 2(a) ผลของความแรงประจุ $CaSO_4$ ต่อการลดลงของฟลักซ์โดยใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างเท่ากับ 400 mL ความแรงประจุ $CaSO_4$ เท่ากับ 0.005, 0.01 และ 0.015 M ทำการควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบภายใต้ห้องปฏิบัติการ $28 \pm 3^\circ C$ และระยะเวลาดำเนินระบบ 240 นาที พบว่าทุกค่าของความแรงประจุมีการลดลงของฟลักซ์ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนกระทั่งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และพบค่าฟลักซ์ที่ความแรงประจุ 0.015 M มีค่าลดลงมากที่สุด รองลงมาคือ 0.01 และ 0.005 M ตามลำดับ ซึ่งค่าความแรงประจุที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ฟลักซ์สารละลายต่ำลง กล่าวคือการเพิ่มความแรงของประจุนั้นเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของ $CaSO_4$ ให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้เพิ่มความเข้มข้นของ $CaSO_4$ บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง

แบบนาโน และเกิดชั้นลักษณะคล้ายชั้นเจล จึงเป็นผลทำให้แรงดันแบบออสโมติกสูงขึ้น แต่เนื่องจากว่าในระบบมีการควบคุมความดันให้คงที่ตลอดการทดลอง จึงทำให้ค่าของแรงดันจากระบบที่จะสามารถเอาชนะแรงดันออสโมติกที่เกิดจากการสะสมตัวของ $CaSO_4$ ในระหว่างการทดลองมีค่าที่ต่ำลง จึงทำให้ฟลักซ์สารละลายที่ได้มีค่าลดลง [18]

จากรูปที่ 2(b) ผลของค่าพีเอชที่มีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์สารละลาย โดยศึกษาค่าพีเอช 5, 7 และ 9 ปัจจัยควบคุมใช้ $CaSO_4$ ที่ความแรงประจุ 0.01 M ใช้และควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันที่ 60 psig ตลอดการทดลอง และระยะเวลาดำเนินระบบ 240 นาที จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลของพีเอชมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์สารละลายโดยที่พีเอช 9 มีการลดลงของฟลักซ์สารละลายมากที่สุดตามด้วย พีเอช 7 และพีเอช 5 ตามลำดับ โดยการลดลง

ของฟลักซ์สารละลายอาจเนื่องมาจากที่พีเอช 5 มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในน้ำที่มีค่าสูงกว่าที่พีเอช 7 และ 9 ซึ่ง H^+ มีผลทำให้ความหนาของชั้น Double layer ของผิวหน้าเยื่อกรองลดลง ทำให้แคลเซียมซัลเฟตที่สะสมอยู่บนผิวหน้าของเยื่อกรองสามารถเลื่อนเข้าใกล้เยื่อกรองได้มากขึ้น จึงเกิดการซึมผ่านออกมาได้ง่ายกว่า แคลเซียมที่อยู่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองทำให้มีความเข้มข้นสะสมที่ผิวหน้าเยื่อกรองน้อยกว่าที่พีเอช 7 และพีเอช 9 ส่งผลให้ค่าความดันออสโมติกเหนือผิวหน้าของเยื่อกรองที่พีเอช 5 จึงมีค่าต่ำกว่าที่พีเอช 7 และพีเอช 9 ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำสูงกว่า [19]

จากรูปที่ 2(c) ผลการศึกษาผลร่วมระหว่าง $CaSO_4$ กับ NOM ต่อการลดลงของค่าฟลักซ์สารละลาย โดยที่ใช้ปัจจัยควบคุม $CaSO_4$ ความแรงประจุ 0.01 M ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 mg/L ควบคุมค่าพีเอชที่ 7 และความดัน 60 psig ตลอดการทดลอง และระยะเวลาดำเนินระบบ 240 นาทีพบว่าในกรณีที่มีเติมสารละลายร่วมระหว่าง NOM + $CaSO_4$ มีการลดลงของฟลักซ์สารละลายมากกว่าในกรณีที่มีเฉพาะ $CaSO_4$ เพียงอย่างเดียว เพราะนอกจากชนิดของสารละลาย $CaSO_4$ จะมีส่วนทำให้ค่าความดันออสโมติกของระบบสูงขึ้นระหว่างการกรอง หรืออาจจะปิดรูพรุนของเยื่อกรองจากสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติที่รวมอยู่ด้วย เมื่อเกิดการสะสมตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนผิวหน้าเยื่อกรองน้ำจึงไหลผ่านได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงด้วย



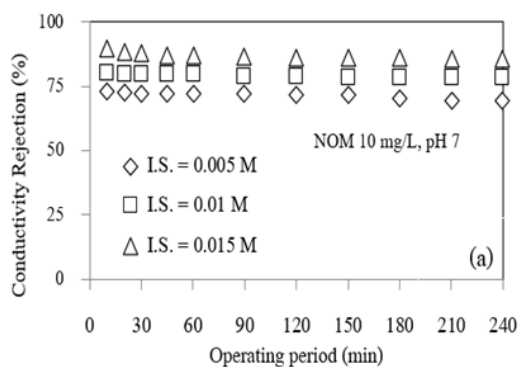
รูปที่ 2 ผลการศึกษาการลดลงของฟลักซ์สารละลายที่ปัจจัยต่างๆ (a) ความแรงประจุ (b) พีเอช (c) ผลร่วมระหว่าง $CaSO_4$ กับ NOM

3.2.ผลการศึกษาการกำจัด $CaSO_4$ ร่วมกับ NOM

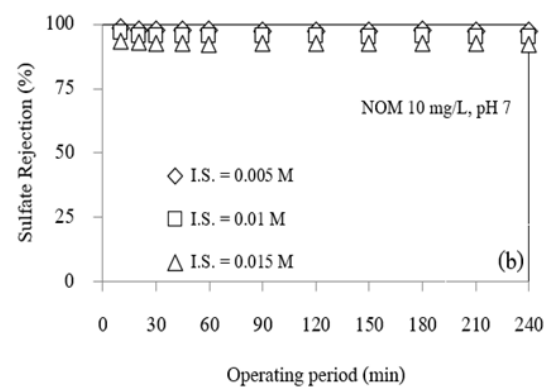
จากรูปที่ 3(a) แสดงผลของความแรงประจุ $CaSO_4$ ต่อการกำจัด โดยพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า ความแรงประจุ 0.005, 0.01 และ 0.015 M ทำการควบคุมค่า NOM ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig และระยะเวลาดำเนินระบบ 240 นาที การทดลองพบว่าการเพิ่มความแรงประจุทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 69.32, 78.63 และ 85.63 ตามลำดับ ค่าการกำจัดเกลือที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย $CaSO_4$ ที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้สารละลายแคลเซียมซัลเฟตสะสมบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกลไกการกำจัดค่าการนำไฟฟ้าเกิดจากแรงผลักทางไฟฟ้า (Electrostatic repulsion) ของประจุลบจากซัลเฟต (SO_4^{2-}) และประจุลบที่ผิวหน้าเยื่อกรอง ส่งผลทำให้สามารถกำจัดประจุบวกของแคลเซียมได้มาก

ขึ้นเช่นกัน เนื่องจากรักษาสภาพสมดุลของประจุระหว่างประจุบวกกับประจุบนผิวหน้าของเยื่อกรอง กล่าวคือเนื่องจากประจุลบของไอออนลบถูกกำจัดได้ด้วยมีแรงดึงดูดกับประจุบวกของไอออนบวก ทำให้สามารถกำจัดไอออนลบได้ [20] นอกจากนี้อาจเกิดการสะสมของชั้นเจลระหว่างประจุบวกของแคลเซียมและประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติได้มากขึ้นสอดคล้องกับผลของค่าฟลักซ์สารละลายที่ลดลง

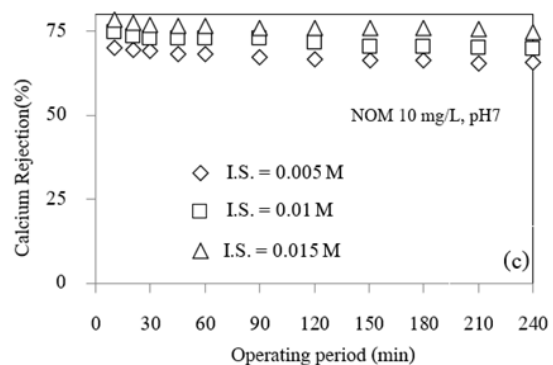
จากรูปที่ 3(b)–(c) ผลการศึกษาความแรงประจุของ CaSO_4 ต่อการกำจัดซัลเฟตและแคลเซียม ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มความแรงประจุทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดประจุซัลเฟตสูงอยู่ที่ร้อยละ 97.33, 95.21 และ 92.29 ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าร้อยละ 90 อาจเกิดจากแรงผลักของประจุลบของแผ่นเยื่อกรอง ขณะที่ผลของการกำจัดแคลเซียมเพิ่มขึ้นตามความแรงประจุอยู่ที่ร้อยละ 65.61, 69.59 และ 74.56 ตามลำดับ โดยการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าแรงผลักระหว่างประจุลบของเยื่อกรองแบบนาโนกับสารละลาย CaSO_4 มีสูงมาก กล่าวคือเกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกละลายและเยื่อกรอง เมื่อการทดลองใช้เยื่อกรองที่มีประจุเป็นลบ ทำให้การแพร่ผ่านเยื่อกรองของสารละลาย CaSO_4 ซึ่งผลทำให้ทราบถึงความเกี่ยวข้องระหว่างประจุลบทั้งของเยื่อกรองและประจุลบของซัลเฟต ซึ่งมีไอออนประจุสองลบ (Divalent anions) จะถูกผลักโดยเยื่อกรองที่มีประจุลบ ที่มีความเสถียรมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไอออนที่มีประจุหนึ่งลบ (Monovalent anions) [14]



(a)



(b)



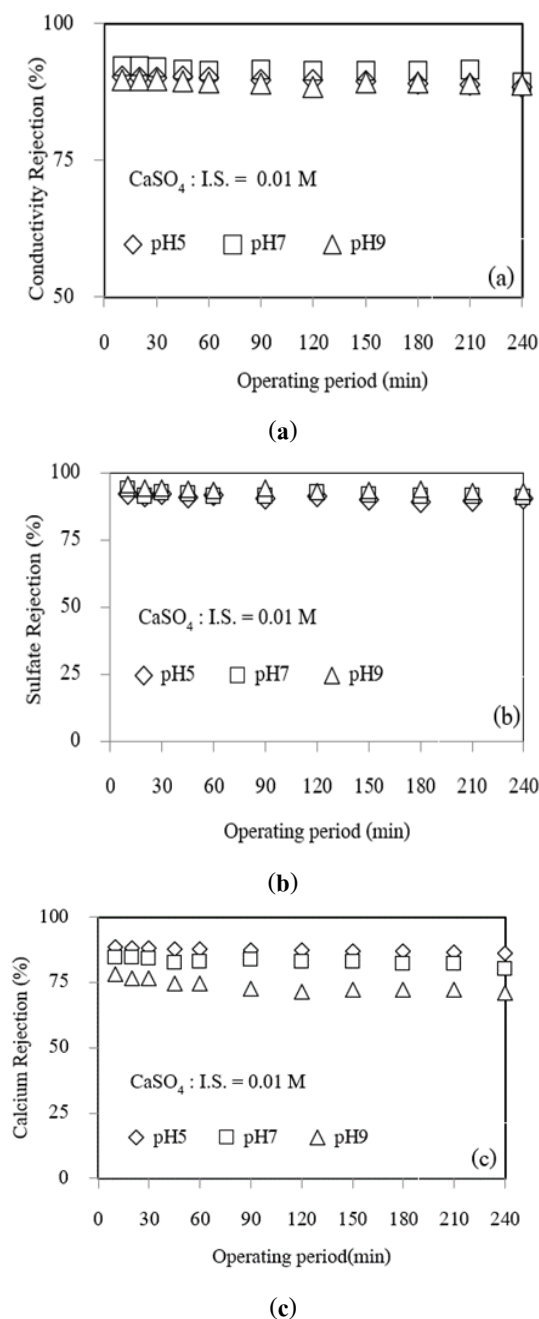
(c)

รูปที่ 3 ผลของความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัด เมื่อ (a) พิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า (b) ความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัดซัลเฟต (c) ความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัดแคลเซียม

จากรูปที่ 4(a) ผลของพีเอชต่อการกำจัด CaSO_4 ที่ 5, 7 และ 9 โดยพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า บัญญัติที่ควบคุมคือความแรงประจุ CaSO_4 เท่ากับ 0.01 M และไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig เมื่อเดินระบบครบ 240 นาที พบว่ามีค่าการกำจัดที่ใกล้เคียงอยู่ในช่วงร้อยละ 88.43, 89.37 และ 88.88 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4(b)–(c) ผลของพีเอชต่อการกำจัดซัลเฟตและแคลเซียม ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มค่าพีเอชจาก 5 ถึง 9 ทำให้เยื่อกรองแบบนาโนมีความสามารถในการกำจัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่ากับร้อยละ 90.65, 90.76 และ 92.89 ตามลำดับ ส่วนค่าการกำจัดแคลเซียมมีค่าลดลงอยู่ที่ร้อยละ 86.10, 80.27 และ 71.13 ตามลำดับ ซึ่งผลจากการทดลองที่ได้พบว่าในทุกกระดับค่าพีเอชให้ค่าการกำจัดซัลเฟตอยู่ในระดับ

ที่เพิ่มเล็กน้อยจากการเพิ่มค่าพีเอชส่งผลให้ประจุลบของแผ่นเยื่อกรองสามารถผลักประจุลบของซัลเฟตได้มากขึ้น ทำให้มีการกำจัดสูงกว่าร้อยละ 90 ในส่วนของค่าการกำจัดแคลเซียมมีแนวโน้มในการกำจัดที่ลดลง เมื่อค่าพีเอชที่สูงขึ้นเพื่อรักษาสภาพสมดุลของประจุ

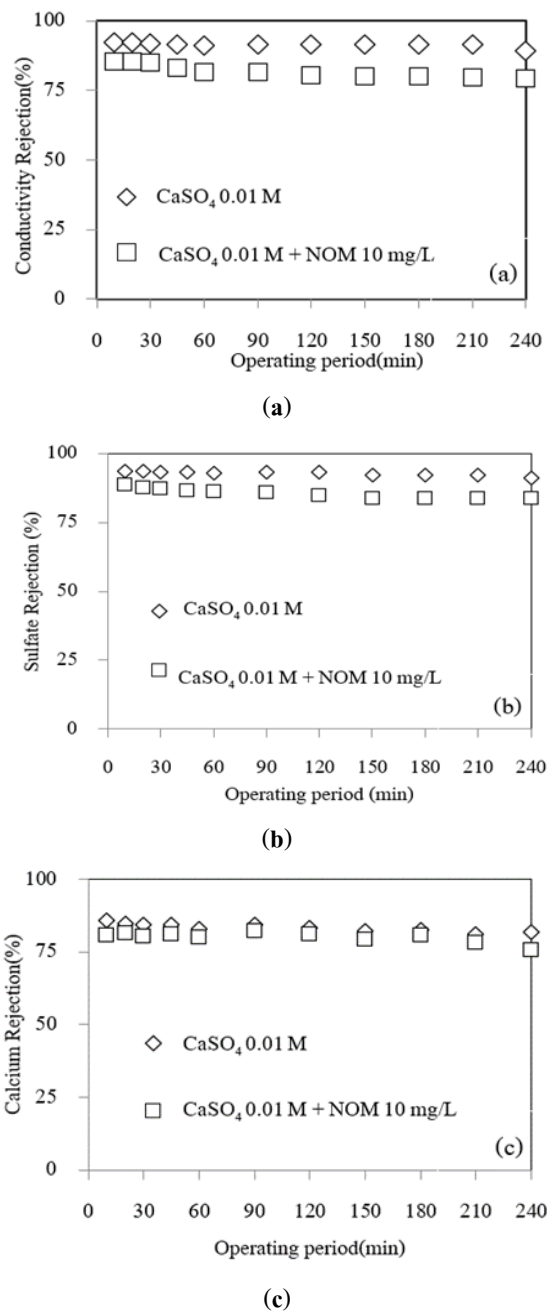


รูปที่ 4 ผลของผลของพีเอชต่อการกำจัด CaSO_4 โดย (a)พิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า (b) ความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัดซัลเฟต (c) ความแรงประจุ CaSO_4 ต่อการกำจัดแคลเซียม

จากรูปที่ 5(a) ผลรวมระหว่าง CaSO_4 กับ NOM ที่มีผลต่อการกำจัดซัลเฟต โดยพิจารณาจากการนำไฟฟ้า ปัจจัยที่ควบคุมคือ ความแรงประจุ CaSO_4 เท่ากับ 0.01 M ทำการควบคุมค่าสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig การดำเนินระบบครบ 240 นาที พบว่าสารละลาย CaSO_4 เพียงอย่างเดียวมีค่าการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 89.37 และผลรวมระหว่าง CaSO_4 + NOM มีค่าการกำจัดจากค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 79.58

จากรูปที่ 5(b)–(c) ผลรวมของ CaSO_4 กับ NOM ต่อการกำจัดซัลเฟตและแคลเซียม ปัจจัยที่ควบคุมคือ ความแรงประจุ CaSO_4 เท่ากับ 0.01 M ทำการควบคุมค่าสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ความดันในระบบเท่ากับ 60 psig การดำเนินระบบครบ 240 นาที พบว่าในกรณีที่ใช้เฉพาะ CaSO_4 เพียงอย่างเดียว มีค่าการกำจัดซัลเฟตอยู่ที่ร้อยละ 91.19 และในกรณีที่ใช้สารละลาย CaSO_4 + NOM มีค่าการกำจัดซัลเฟตอยู่ที่ร้อยละ 83.81 สำหรับการกำจัดแคลเซียม พบว่าในกรณีที่ใช้เฉพาะ CaSO_4 พบค่าการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 81.80 ส่วนในกรณีที่ใช้สาร CaSO_4 + NOM พบค่าการกำจัดแคลเซียมอยู่ที่ร้อยละ 75.80 และจากข้อมูลเบื้องต้นทราบว่า การกำจัดบนเยื่อกรองแบบนาโนเกิดจากกลไกการผลักกันของประจุ อย่างไรก็ตามมีการศึกษาพบว่าการกำจัด NOM ด้วยเยื่อกรองแบบนาโนจะอาศัยหลักการกีดขนาด (Size Exclusion) มากกว่ากลไกการผลักกันของประจุ (Charge Repulsion) [20] อย่างไรก็ตามผลการทดลองสามารถอธิบายการจับยึดของสารอินทรีย์ธรรมชาติกับไอออนประจุสองบวก ด้วยกลไกการเกิดสะพานเชื่อมระหว่างประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติและประจุลบบนพื้นผิวของเยื่อกรองแบบนาโน อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำจัดประจุบวกของแคลเซียม อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้ไม่สามารถแสดงถึงกลไกสะพานเชื่อมได้ชัดเจนนัก เนื่องจากกลไกการกำจัดสารอินทรีย์

ธรรมชาติ ส่วนใหญ่เกิดจากการคัดแยกด้วยขนาดรูพรุนของเยื่อกรอง



รูปที่ 5 ผลรวม CaSO_4 กับ NOM ที่ส่งผลต่อการกำจัด โดย (a) พิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า (b) ผลรวม CaSO_4 กับ NOM และ (c) ผลรวมระหว่าง CaSO_4 กับ NOM

4. สรุป

1. ผลของความแรงประจุแคลเซียมซัลเฟต มีประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 92-97

ขณะที่การกำจัดแคลเซียมให้ค่าต่ำลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 65-75 เมื่อเพิ่มความแรงประจุทำให้ค่าการกำจัดจากการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและค่าการกำจัดอยู่ระหว่างค่าการกำจัดของแคลเซียมและซัลเฟตประมาณร้อยละ 69-86

2. ผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช มีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตไม่ต่ำกว่า 90% (ร้อยละ 90 - 93) ส่วนการกำจัดแคลเซียมมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่าเล็กน้อย สอดคล้องกับผลของความแรงประจุ ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 71-86

3. ผลรวมของแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าในกรณีที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติร่วมและไม่รวม ให้ค่าการกำจัดซัลเฟตอยู่ที่ร้อยละ 91.19 และ 83.81 ตามลำดับ ส่วนค่าการกำจัดแคลเซียมอยู่ที่ร้อยละ 75.80 และ 81.80 ตามลำดับ โดยผลรวมของสารอินทรีย์ธรรมชาติทำให้ค่าการกำจัดของซัลเฟตและแคลเซียมลดลง

4. การเพิ่มความแรงประจุ มีผลทำให้ฟลักซ์สารละลายต่ำลงซึ่งการเพิ่มความแรงของประจุนั้นเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย CaSO_4 ให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้เกิดการสะสมตัวของสารบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองแบบนาโน และผลรวมระหว่างแคลเซียมซัลเฟตกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ส่งผลให้อัตราการกรองลดลง

5. การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมซัลเฟต ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เพื่อทดสอบผลของเยื่อกรองแบบนาโน เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ และสารอินทรีย์ชนิดอื่น รวมถึงศึกษารูปแบบของการอุดตันที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละสภาวะ และมีการศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการทดลองแบบตามขวาง (Cross flow) เพื่อในอนาคตจะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน และปรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Pelekani, G. Newcombe, V. L. Snoeyink, C. Hepplewhite, S. Assemi and R. Beckett, "Characterization of natural organic matter using high performance size exclusion chromatography," *Environmental Science & Technology*, vol. 33, no. 16, pp. 2807–2813, 1999, doi: 10.1021/es9901314.
- [2] S. Crittenden, R. Reifemberger, J. Hillebrecht, R. Birge, D. Inerowicz and F. Regnier, "Soft lithography based micron-scale electrophoretic patterning of purple membrane," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 8, pp. 1494–1497, 2005, doi: 10.1088/0960-1317/15/8/016.
- [3] World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinking-water Quality. 4th Edition. Geneva: WHO Press, pp. 427–430, 2012
- [4] T. K. Nissinen, I. T. Miettinen, P. J. Martikainen and T. Vartiainen, "Molecular size distribution of natural organic matter in raw and drinking waters," *Chemosphere*, vol. 45, no. 6, pp. 865–873, 2001, doi: 10.1016/S0045-6535(01)00103-5.
- [5] A. Contreras, A. Kim and Q. Li, "Combined fouling of nanofiltration membranes: Mechanisms and effect of organic matter," *Journal of Membrane Science*, vol. 327, pp. 87–95, 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2008.11.030.
- [6] B. M. Watson and C. D. Hornburg, "Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies," *Desalination*, vol. 72, no. 1–2, pp. 11–22, 1989, doi: 10.1016/0011-9164(89)80024-4.
- [7] I. C. Escobar and A. A. Randall, "Influence of NF on distribution system biostability," *Journal AWWA*, vol. 91, no. 6, pp. 76–89, 1999, doi: 10.1002/j.1551-8833.1999.tb08650.x.
- [8] S. J. Duranceau, J. S. Taylor and L. A. Mulford, "SOC Removal in a Membrane Softening Process," *Journal AWWA*, vol. 84, no. 1, pp. 68–78, 1992, doi: 10.1002/j.1551-8833.1992.tb07287.x.
- [9] J. S. Vrouwenvelder, J. W. N. M. Kappelhof, S. G. J. Heijman, J. C. Schippers and D. van der Kooij, "Tools for fouling diagnosis of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water," *Desalination*, vol. 157, no. 1, pp. 361–365, 2003, doi: 10.1016/S0011-9164(03)00417-X.
- [10] G. V. Haute, E. Caberlon, E. de Mesquita, F. C. Pedrazza, L. Martha and B. A. de Oliveira, "Gallic acid reduces the effect of LPS on apoptosis and inhibits the formation of neutrophil extracellular traps," *Toxicology in Vitro*, vol. 30, no. 1, pp. 309–317, 2015, doi: 10.1016/j.tiv.2015.10.005
- [11] K. Tyrpien, C. Dobosz, A. Chosciewicz, A. Ciolecka, M. Wielkoszynski, T. Janoszka and D. Bodzek, "Investigation of nicotine transformation products by densitometric TLC and GC-MS," *Acta Chromatographica*, vol. 13, pp. 154–160, 2003.
- [12] N. M. Al-Bastaki, "Performance of advanced methods for treatment of wastewater: UV/TiO₂, RO and UF," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 43, no. 7, pp. 935–940, 2004, doi: 10.1016/j.cep.2003.08.003.
- [13] M. Bystrianský, O. Nir, M. Sir, Z. Hongsajkova, R. Vurm, P. Hrychova and B. Van der Bruggen, "The presence of ferric iron promotes calcium sulphate scaling in reverse osmosis processes," *Desalination*, vol. 393, pp. 115–119, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.03.003.
- [14] C. Charoensuk, S. Mattaraj, K. Ratanapongleka and C. Jarusutthirak, "Effects of Natural Organic Matter and Carbonate Salts on the Operation of

- Nanofiltration Membrane,” *Journal of Industrial Technology of Thailand*, vol. 5, no. 2, pp. 26–37, 2015.
- [15] P. Wu and M. Imai, “Novel biopolymer composite membrane involved with selective mass transfer and excellent water permeability,” in *Advancing Desalination*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2012, ch. 3, pp. 57–82.
- [16] J. Decarolis, S. Hong and J. Taylor, “Fouling behavior of a pilot scale inside-out hollow fiber UF membrane during dead-end filtration of tertiary wastewater,” *Journal of membrane science*, vol. 191, no. 1–2, pp. 165–178, 2001, doi: 10.1016/S0376-7388(01)00455-0.
- [17] J. E. Kilduff, S. Mattaraj and G. Belfort, “Flux decline during nanofiltration of naturally-occurring dissolved organic matter: effects of osmotic pressure, membrane permeability, and cake formation,” *Journal of membrane science*, vol. 239, no. 1, pp. 39–53, 2004, doi: 10.1016/j.memsci.2003.12.030.
- [18] N. Park, S. Lee, S. R. Yoon, Y. H. Kim and J. Cho, “Foulants analyses for NF membranes with different feed waters: coagulation/sedimentation and sand filtration treated waters,” *Desalination*, vol. 202, no. 1–3, pp. 231–238, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2005.12.060.
- [19] W. Saikaew, S. Mattaraj and R. Jiratananon, “Nanofiltration performance of lead solutions: effects of solution pH and ionic strength,” *Water Supply*, vol. 10, no. 2, pp. 193–200, 2010, doi: 10.2166/ws.2010.062.
- [20] A. Lhassani, M. Rumeau, D. Benjelloun and M. Pontie, “Selective demineralization of water by nanofiltration application to the defluorination of brackish water,” *Water research*, vol. 35, no. 13, pp. 3260–3264, 2001, doi: 10.1016/S0043-1354(01)00020-3.