

ผลของพีเอชโดยเกลือแมงกานีสและสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการอุดตันของเยื่อกรอง แบบนาโน

Effect of pH by Manganese Salts and Natural Organic Matter on Nanofiltration Membrane Fouling

อภิญญา อ่อนสาร^{1,*}, สุพัฒน์พงษ์ มัตราจ¹, วิภาดา เดชปัญญา¹, กรรณิกา รัตนพงษ์เสลา¹, สมภพ สนองราษฎร์,
และ เทียมมะณี รัตนวีระพันธ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมืองศรีโค วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190
Apinya Onsarn^{1,*}, Supatpong Mattaraj¹, Wipada Dechpanya¹, Karnika Ratanapongleka¹, Sompop Sanongraj¹
and Tiammanee Rattanaweerapan¹

¹Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Mueang Si Khai,
Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

*Corresponding Author E-mail: Apinya.on.58@ubu.ac.th

Received: Aug 15, 2023; Revised: Nov 06, 2023; Accepted: Nov 16, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสที่มีผลจากพีเอชของผลรวมเกลือแมงกานีสกับสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้เยื่อกรองแบบนาโน ทางการค้าที่การทดลองเป็นการกรองภายใต้ชุดทดสอบการไหลตายตัว ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ชนิดของเกลือแมงกานีส (ได้แก่ แมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2$), แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) และแมงกานีสไนเตรด ($Mn(NO_3)_2$) ค่าพีเอชสารละลายเท่ากับ 3, 5 และ 7 และความแรงประจุเท่ากับ 0.01 mol/L น้ำตัวอย่างถูกเตรียมด้วยความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 mg/L ขณะที่ความดันคงที่ในการดำเนินระบบเท่ากับ 60 psig จากการศึกษาพบว่า เกลือแมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) ให้ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสสูงสุดเท่ากับร้อยละ 95 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดของแมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2$) และแมงกานีสไนเตรด ($Mn(NO_3)_2$) เท่ากับร้อยละ 84.86 และ 70.7 ตามลำดับ ค่าฟลักซ์สารละลายไม่ได้แตกต่างกันมาก สำหรับความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติเท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอชจาก 3 ถึง 7 พบว่าในทุกสภาวะที่ระดับพีเอชให้ร้อยละการกำจัดแมงกานีสสูงสุด การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าสูงไม่ต่ำกว่าร้อยละ 97 ส่วนรูปแบบการจำลองการอุดตันทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับแบบ CFM เนื่องจากการสะสมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนเยื่อกรองแบบนาโน

คำสำคัญ: เยื่อกรองแบบนาโน, เกลือแมงกานีส, สารอินทรีย์ธรรมชาติ, ฟลักซ์สารละลาย, การอุดตัน

Abstract

This research aimed to determine the removal performance of manganese affected from solution pH of combined manganese salts with natural organic matter (NOM) using commercial nanofiltration (NF) membrane. The filtration experiments were tested under a dead-end filtration test cell. Variational factors used in this study were the types of manganese salts (i.e. manganese chloride ($MnCl_2$), manganese sulfate ($MnSO_4$), and manganese nitrate ($Mn(NO_3)_2$)) with

the solution pH of 3, 5, and 7, and ionic strength of 0.01 mol/L. Water samples were prepared with NOM concentration of 10 mg/L, while the operating pressure was operated constant at 60 psig. Experimental results found that the $MnSO_4$ salt provided the highest manganese removal efficiency of 95%, while the removal efficiencies of $MnCl_2$ and $Mn(NO_3)_2$ were about 84.86% and 70.7%, respectively. Solution fluxes were not significantly different. In the presence of NOM concentration of 10 mg/L, solution pH of 3–7, it was found that low solution pHs for all conditions provided the highest manganese removal. The removals of NOM were relatively high more than 97%. The mathematical fouling model was done with cake filtration model (CFM) due to NOM accumulation on NF membrane surface.

Keywords: Nanofiltration, Manganese Salts, Natural Organic Matter, Solution Flux, Fouling

1. บทนำ

ทรัพยากรน้ำเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำรงชีพสำหรับสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยเฉพาะมนุษย์ มีการใช้น้ำในกิจกรรมประจำวัน ทั้งจากแหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งมนุษย์นำน้ำจากแหล่งน้ำดังกล่าวมาใช้สำหรับการอุปโภคและบริโภค ยกตัวอย่างเช่น น้ำที่นำมาใช้ในด้านเกษตรและอุตสาหกรรม ตลอดจนบ้านเรือนและชุมชน เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินมาผลิตเป็นน้ำดื่ม โดยเฉพาะแหล่งน้ำใต้ดิน เนื่องจากชั้นใต้ดินจะมีชั้นของหินและทราย ซึ่งสามารถกรองน้ำให้สะอาดได้ในระดับหนึ่ง ตัวอย่างในต่างประเทศที่นำน้ำใต้ดินมาผลิตเป็นน้ำดื่ม เช่น ประเทศเยอรมนี แคนาดาและสหรัฐอเมริกา ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 ของน้ำดื่มมาจากน้ำใต้ดิน [1] สำหรับประเทศไทย มีการใช้น้ำจากน้ำฝน น้ำบาดาล น้ำผิวดินและน้ำประปา เพื่อผลิตเป็นน้ำดื่ม อย่างไรก็ตามแหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยทั่วไปมักจะปนเปื้อนได้ง่าย ซึ่งเกิดจากระบบสิ่งแวดล้อมและการกระทำของมนุษย์

แมงกานีส (Manganese; Mn) เป็นธาตุโลหะกลุ่มทรานซิชัน พบมากในเปลือกโลก สารแมงกานีสมีหลายชนิดด้วยกัน ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของออกไซด์ นอกจากนี้ ยังเกิดในรูปของซัลไฟด์ คาร์บอเนตและซิลิเกต แมงกานีสในน้ำใต้ดินจะอยู่ในรูปของแมงกานีสไบคาร์บอเนต ($Mn(HCO_3)_2$) ซึ่งละลายน้ำและอยู่ในรูปของ Mn^{2+} และ Mn^{3+} และเมื่อสัมผัสกับอากาศจะเปลี่ยนเป็น Mn^{4+} ซึ่งไม่ละลายน้ำ และตกตะกอนเป็นสีดำ จากรายงานพบว่าแมงกานีสเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับที่ 12 ในลักษณะเป็นสารประกอบร่วมกับสารอื่น ๆ โดยเฉพาะเหล็ก (Fe) โดย

ที่ปริมาณของเหล็กและแมงกานีสที่มากเกินไปส่งผลให้น้ำมีรสชาติเหมือนโลหะ น้ำมีสีแดงเล็กน้อย และคราบสีน้ำตาลสนิมของผลิตภัณฑ์ เช่น กระจก ผ้า และพลาสติก [2] องค์การอนามัยโลก (WHO) แนะนำว่าแมงกานีสเข้มข้นในการดื่มน้ำควรน้อยกว่า 0.1 มก./ลิตร [3] สำหรับผลกระทบของแมงกานีสส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ โดยการสูดดมและการกิน โดยพิษของแมงกานีสทำให้เกิดกลุ่มอาการที่มีชื่อว่า แมงกานีสซึม โดยผู้ป่วยจะมีอาการคล้ายโรคจิตเวชบวกกับโรคพาร์กินสัน ส่วนผลกระทบของแมงกานีสที่มีต่อคุณภาพน้ำ ได้แก่ การอุดตันของระบบท่อกระจายน้ำ เกิดสีในน้ำประปา เกิดคราบสกปรกบนเสื้อผ้า/สุขภัณฑ์มีกลิ่นสนิมคล้ายเหล็กและกลิ่นคาว เป็นต้น

สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter; NOM) จากระบบสิ่งแวดล้อมเกิดจากการเน่าเปื่อยของซากพืช ซากสัตว์ ที่ประกอบด้วย คาร์บอน ออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นหลัก ซึ่งประเภทของ NOM จะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารประกอบฮิวมิก (Humic) และสารประกอบฟุลวิก (Fulvic) ที่มีสีเหลืองหรือสีน้ำตาลอ่อน ส่วนใหญ่พบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าไม่เกิน 10 มก./ลิตร [4] โดยผลกระทบหลักที่เกิดจากสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีการเติมคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อในการผลิตน้ำประปา ซึ่งคลอรีนจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติ และเกิดสารพลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes; THMs) และกรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acids; HAAs) จากข้อมูลนี้

จึงทำให้ทาง US.EPA. สรุปไว้ว่าสารดังกล่าวเป็นปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ [5]

ปัจจุบันมีหลายวิธีในการกำจัดโลหะหนัก (แมงกานีส) รวมถึงสารอินทรีย์ออกจากน้ำ เช่น การแลกเปลี่ยนประจุของน้ำ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การดูดซับทางชีวภาพ การเติมอากาศและการกรอง เป็นต้น [6–8] โดยล่าสุดมีการนำเทคโนโลยีเมมเบรน ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อกรองในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลว ซึ่งมีอยู่หลายระบบ ได้แก่ การกรองออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis; RO) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration; UF) การกรองไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration; MF) และการกรองนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration; NF) โดยที่การกรองโดยนาโนฟิลเตรชัน ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำและผลิตน้ำดื่มมากขึ้น [9],[10] ซึ่งข้อดีของการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนคือ การควบคุมระบบง่าย ไม่มีการเติมสารเคมีในระหว่างการทดสอบ ไม่เป็นพิษต่อระบบสิ่งแวดล้อม การใช้พลังงานไม่มาก และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง อย่างไรก็ตามการใช้แผ่นเยื่อกรองมีข้อจำกัดหลักในเรื่องของการอุดตันบนแผ่นกรอง (Membrane fouling) ทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าลดลง เมื่อดำเนินระบบไปตามช่วงเวลาการกรอง ซึ่งการลดลงของฟลักซ์สารละลายนี้ มาจากหลายปัจจัย เช่น สารละลายที่ป้อนเข้าสู่ระบบ สภาพที่ใช้ในการดำเนินระบบ เป็นต้น และสาเหตุข้างต้นเป็นผลมาจากการอุดตันของเยื่อกรอง โดยลักษณะการอุดตันมีทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังต่อไปนี้ 1) Complete blocking model (CMB), 2) Standard blocking model (SBM), 3) Intermediate blocking model (IBM) และ 4) Cake filtration model (CFM) ถึงอย่างไรก็ตาม ระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานคืนได้ โดยการล้างแผ่นกรองด้วยวิธีทางกายภาพและการใช้สารเคมี

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของพีเอช รวมถึงการเพิ่มความแรงประจุของเกลือแมงกานีสร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโน ต่อประสิทธิภาพของฟลักซ์ (Flux performance) และการกำจัด (Removal efficiency) โดยอาศัยรูปแบบการอุดตันที่เกิดจากชุดทดสอบการไหลตายตัว แหล่งน้ำดิบที่ใช้ได้

จากแหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จาก การเปลี่ยนแปลงปัจจัยข้างต้น ทำให้เข้าใจถึงรูปแบบการอุดตันที่เกิดขึ้น และหลีกเลี่ยงสภาวะที่ทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน นอกจากนี้ยังคาดหวังว่าการวิจัยนี้จะช่วยยกระดับการผลิตน้ำไว้สำหรับอุปโภคบริโภค ให้กับชุมชนในมหาวิทยาลัย ตลอดจนเป็นแนวทางในงานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดน้ำและผลิตน้ำภายในประเทศได้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สารเคมีและเยื่อกรอง

สารเคมีทุกชนิดที่ใช้เป็นเกรดสังเคราะห์ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยไม่ต้องนำไปทำให้มีความบริสุทธิ์เพิ่ม เช่น $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$, และ $Mn(SO_4) \cdot H_2O$ (บริษัท Merck จากประเทศ Germany), กรด HCl 36%, เบส NaOH, $Na_2S_2O_5$ (บริษัท Ajax FineChem จากประเทศ Australia) และกรดซัลฟิวริก โมโนไฮเดรต ($C_8H_8O_7 \cdot H_2O$) (บริษัท PubChem จากประเทศ USA)

เยื่อกรองแบบนาโนของบริษัท GE Water & Process Technologies รุ่น HL4040FM ถูกนำมาตัดให้เป็นแผ่นวงกลม ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร เพื่อนำมาใช้ลงในชุดทดสอบการไหลตายตัว สำหรับแผ่นเยื่อกรองที่ได้ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ถ้ายังไม่ได้มีการใช้งานในทันที จะเก็บรักษาโดยแช่ไว้ในสารละลาย Sodium metabisulphite ($Na_2S_2O_5$) ที่ความเข้มข้น 1% เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วนำไปแช่ไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบนผิวของเยื่อกรอง ซึ่งคุณสมบัติเยื่อกรองที่ใช้ในการทดลอง ถูกแสดงดังตารางที่ 1

2.2 การเตรียมน้ำตัวอย่างสารอินทรีย์ธรรมชาติ และความแรงประจุ

การเก็บน้ำตัวอย่างจากแหล่งน้ำผิวดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติเจือปนอยู่ เป็นแหล่งน้ำที่อยู่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งใช้เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับกระบวนการผลิตน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคภายในมหาวิทยาลัย โดยนำตัวอย่างน้ำประมาณ 1,000 ลิตร ถูกเก็บไว้ภายในถังสแตนเลส จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการ

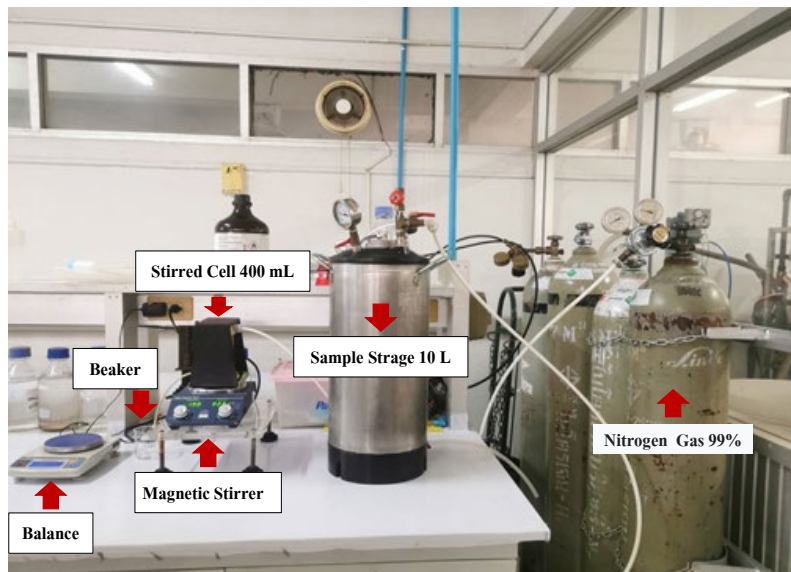
บำบัดเบื้องต้น เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่และกำจัดไอออนที่ส่งผลต่อการเกิดตะกอน น้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้ว จะผ่านเข้าสู่ระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ โดยในขั้นตอนนี้จะทำให้สามารถแยกน้ำออกเป็น 2 ส่วน คือน้ำที่มีผ่านเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับที่มีความสะอาดสูงหรือมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่ำ เรียกส่วนนี้ว่าเพอร์เมต (Permeate) และน้ำที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง เรียกว่าคอนเซนเตรท (Concentrate) ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทางธรรมชาติสูง อันเนื่องมาจากความสามารถในการกักกัน (Retention) ของเยื่อกรอง จากนั้นทำการเวียนน้ำคอนเซนเตรทกลับไปยังถังป้อนผสมกับน้ำดิบ เพื่อป้อนเข้าสู่ระบบเยื่อกรองตลอดเวลาที่เดินระบบ เพื่อแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นออก ส่วนน้ำเพอร์เมตที่ผลิตได้ ถือเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งจะถูเก็บแยกในถังเก็บ เมื่อปริมาณน้ำเพอร์เมตที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 970 ลิตร และน้ำคอนเซนเตรทเข้มข้นด้วยสารอินทรีย์ธรรมชาติภายในถังป้อนลดลงเหลือประมาณ 30 ลิตร ให้หยุดระบบ และจะนำน้ำในส่วนของคอนเซนเตรทเข้มข้นด้วยสารอินทรีย์ธรรมชาติปริมาณ 30 ลิตรนี้ ไปเก็บไว้ในตู้เย็นควบคุมที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลองของเยื่อกรองแบบนาโนต่อไป สำหรับเหตุผลหลักของการปรับค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างและการเพิ่มความแรงประจุ เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าการกำจัดและค่าการอุดตันของเยื่อกรองแบบนาโน โดยการปรับพีเอชจะใช้กรด HCl และ เบส NaOH ในการปรับสภาพน้ำตามช่วงพีเอชต่างกัน และค่าความแรงประจุที่ใช้ทดสอบจะขึ้นอยู่กับปริมาณหรือความเข้มข้นของประจุทั้งหมด ที่ปรากฏอยู่ในสารละลายนั้น ดังสมการ $I.S. \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2$ เมื่อ C_i คือความเข้มข้นของไอออนิก และ Z_i คือประจุของไอออน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความแรงประจุเท่ากับ 0.01 mol/L ในทุกสภาวะการทดสอบ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเยื่อกรองแบบนาโน รุ่น HL4040 FM

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ประเภทของเยื่อกรอง	Thin film membrane
วัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรอง	Polyamide
ขนาดรูพรุน	150–300 Da
การกำจัดเกลือ MgSO ₄	98% ที่ 100 psig (690 kPa)
ช่วงพีเอชของการดำเนินงาน	3–9
ช่วงพีเอชของการทำความสะอาด	2–10.5
ความดันของการดำเนินงาน	70–300 psig (483–2,069 kPa)
ความทนทานต่อคลอรีน	<0.1 ppm
ความดันสูงสุดที่ทนได้	600 psig (4,140 kPa)

2.3 การตั้งค่าชุดการทดลอง

จากรูปที่ 1 ชุดการทดลองแบบการไหลตายตัว (Dead-end Stirred Cell) ที่ใช้มีขนาด 400 mL โดยภายในบรรจุใบกวนติดตั้งอยู่บนแท่น ซึ่งจะอาศัยการกวนแบบแม่เหล็กขับเคลื่อน (Magnetic stirrer) แผ่นเยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร ถูกติดตั้งอยู่ในชุด Stirred Cell ที่สามารถทนแรงดันได้สูงสุด 75 psig สารตัวอย่างจะถูกบรรจุในถังแรงดันที่ทำจากเหล็กสแตนเลส ปริมาตร 10 ลิตร โดยสามารถทนแรงดันได้สูงถึง 100 psig น้ำตัวอย่างจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบ โดยอาศัยแรงดันขับเคลื่อนของแก๊สไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ที่ถูกต่อเข้ากับถังน้ำตัวอย่าง ที่ทำจากเหล็กสแตนเลส ทำให้สามารถขับเคลื่อนสารตัวอย่างให้ผ่านเยื่อกรองได้ และเกิดการไหลของน้ำซึมผ่านเยื่อกรองจากชุดทดสอบไปยังภาชนะ โดยใช้บีกเกอร์ขนาด 500 mL และใช้เครื่องชั่งของ Mettler Toledo ในการวัดค่าน้ำหนัก ซึ่งสามารถอ่านค่าได้ 2 ตำแหน่ง

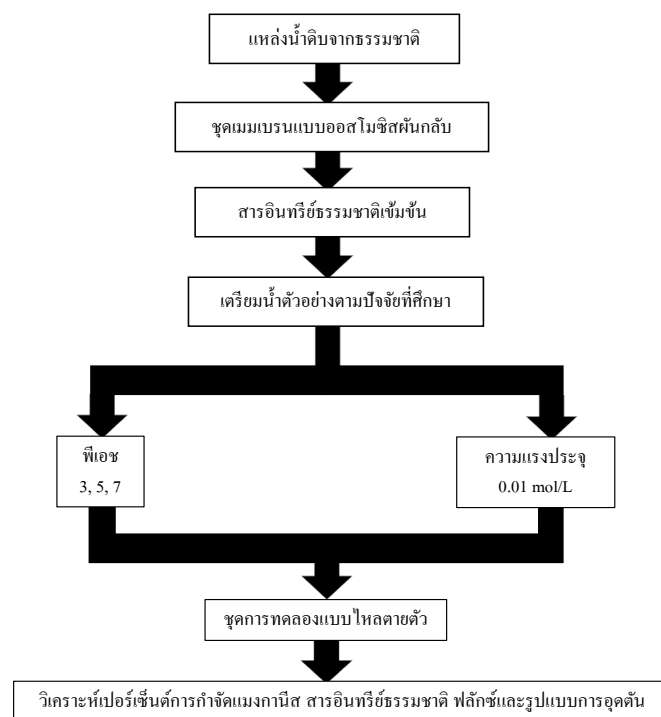


รูปที่ 1 ชุดการทดลองแบบไหลตายตัว

2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์

การวัดปริมาณของโลหะหนัก (แมงกานีส) โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAAnalyst 200) เพื่อวัดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer) (Shimadzu Corporation รุ่น UV mini 1240, ประเทศญี่ปุ่น) ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 254 นาโนเมตร วัดความเป็นกรด-เบสของ

สารละลายที่ใช้ทดสอบ โดยใช้เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, ประเทศเยอรมัน) สำหรับแผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาคือพีเอชและค่าแรงประจุ สำหรับกำจัดเกลือแมงกานีสและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเยื่อกรองแบบนาโน รวมถึงการศึกษารีดอกซ์ของฟลักซ์และรูปแบบการดูดซับที่เกิดจากชุดทดสอบแบบการไหลตายตัว แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเยื่อกรองนาโน

ค่าฟลักซ์สารละลาย (Solution flux; J) และค่าร้อยละการกำจัด (Rejection; R) เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของกระบวนการกรองผ่านเยื่อกรอง ซึ่งอัตราการไหลของน้ำจากการส่งสารละลายที่ป้อนเข้าไปในระบบสามารถคำนวณประสิทธิภาพของระบบได้จากสมการดังนี้ [11]

2.6 ค่าฟลักซ์สารละลาย

$$J = L_p (\Delta p - \sigma \Delta \pi) = Q_p / A_m \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) โดยที่ J เท่ากับค่าฟลักซ์สารละลาย มีหน่วยเป็น LMH, L_p เท่ากับค่าการซึมผ่านของเยื่อกรอง มีหน่วยเป็น LHM.kPa⁻¹, Δp เท่ากับค่าความดันในการดำเนินระบบมีหน่วยเป็น kPa, σ เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์แรงดัน

ออสโมติก, $\Delta \pi$ เท่ากับค่าแรงดันออสโมติก มีหน่วยเป็น kPa, Q_p เท่ากับค่าอัตราการไหลในส่วนของเพอมีอเทท มีหน่วยเป็น L/h, A_m เท่ากับพื้นที่หน้าตัดของเยื่อกรอง มีหน่วยเป็น m²

2.7 ร้อยละการกำจัด

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

จากสมการที่ (2) โดยที่ C_p เท่ากับค่าความเข้มข้นของน้ำในส่วนเพอมีอเทท และ C_f เท่ากับค่าความเข้มข้นในส่วนของน้ำคอนเซนเตรต

กลไกการอุดตันบนเยื่อกรองแบบนาโน โดยชุดการทดลองแบบไหลตายตัว ภายใต้ความดันคงที่ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermans and Bredée [12] ถูกแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แบบจำลองการอุดตันของเยื่อกรองสำหรับการทดลองแบบไหลตายตัว

Model	Linear Fitting Equation	n
Complete blocking model (CBM)	$\ln J = \ln J_0 + K_c t$	2
Standard blocking model (SBM)	$(1/\sqrt{J}) = (1/\sqrt{J_0}) + K_s t$	1.5
Intermediate blocking model (IBM)	$(1/J) = (1/J_0) + K_i t$	1
Cake filtration model (CFM)	$(1/J^2) = (1/J_0^2) + K_{cf} t$	0

สมการความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอุดตัน แสดงได้ดังนี้

$$\frac{dJ}{dt} = -KJ^{2-n}J \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) โดยที่ J เท่ากับฟลักซ์สารละลาย, K เท่ากับค่าคงที่ของแต่ละแบบจำลอง, t เท่ากับระยะเวลาในการกรอง, n เท่ากับค่าดัชนีของค่าบ่งชี้การอุดตัน ซึ่งจะทำให้ความหมายที่แตกต่างกันดังนี้ เมื่อ $n=2$ หมายถึงการอุดตันอย่างสมบูรณ์ โดยอนุภาคที่ตกตะกอนที่ผิวเยื่อกรองและปิดขนาดรูพรุนของเยื่อกรอง เกิดการอุดตันบริเวณทางเข้าของรูพรุนแบบไม่ซ้อนทับกัน ทำให้จำนวนรูพรุนลดลง สำหรับแบบจำลองการอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ ($n=1.5$) โดยขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถเกิดการดูดซับในรูพรุนของ

เยื่อกรอง ทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนเพียงเท่านั้น และส่งผลทำให้ปริมาตรของรูพรุนมีขนาดลดลง ส่วนการอุดตันแบบธรรมดา ($n=1$) โดยที่อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองหรืออนุภาคอาจปิดบางส่วนของผิวหน้าเยื่อกรองและเมื่อกรองเป็นระยะเวลานานขึ้น โดยที่อนุภาคเหล่านั้นสามารถซ้อนทับกันได้บางส่วน สำหรับการแบบจำลองที่สี่คือการก่อตัวของชั้นเค้ก ($n=0$) โดยมีขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองและอนุภาคดังกล่าวไม่สามารถผ่านรูพรุนของเยื่อกรองได้ ทำให้เกิดชั้นเค้กสะสมที่ผิวหน้าของเยื่อกรองได้

สำหรับกลไกการอุดตันในแต่ละแบบจำลอง สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการเชิงเส้น $\ln J$ เทียบกับ t ($n=2$), $(1/\sqrt{J})$ เทียบกับ t ($n=1.5$), $(1/J)$ เทียบกับ t ($n=1$), และ $(1/J^2)$ เทียบกับ t ($n=0$) ซึ่งสามารถหาสมการเส้นตรงได้และทำให้ทราบค่า K^2

โดยหลักการพิจารณาว่าเป็นรูปแบบการดูดซับแบบไหน จะพิจารณาที่ค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดเพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลของเกลือแมงกานีส

จากตารางที่ 3 แสดงร้อยละการกำจัดของแมงกานีส และฟลักซ์สารละลาย โดยแมงกานีสที่ทำการศึกษามี 3 ชนิด คือ $MnCl_2$, $MnSO_4$ และ $Mn(NO_3)_2$ ปัจจัยที่ควบคุมมีดังนี้ ความแรงประจุ 0.01 mol/L พีเอช 7 และความดันคงที่ 60 psig ระยะเวลาในการทดสอบเท่ากับ 240 นาที ผลการศึกษาพบว่า ที่เวลา 240 นาที สารละลาย $MnSO_4$ ให้การกำจัดแมงกานีส สูงสุดเท่ากับร้อยละ 95.0 ในขณะที่ $MnCl_2$ และ $Mn(NO_3)_2$ ให้การกำจัดแมงกานีสเท่ากับร้อยละ 84.86 และ 70.7 ตามลำดับ และสาเหตุที่สารละลาย $MnSO_4$ ให้ร้อยละการกำจัดสูงสุดเมื่อเทียบกับสารละลาย $MnCl_2$ และ $Mn(NO_3)_2$ เนื่องจากสารละลาย $MnSO_4$ มีซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่มีประจุสองลบ (divalent anions) รวมถึงชนิดของเยื่อกรองที่ใช้ในการทดลองเป็นเยื่อกรองแบบนาโน ซึ่งมีพื้นผิวส่วนใหญ่เป็นประจุลบ และอนุภาคของสารละลายจะถูกผลักโดยเยื่อกรองที่มีประจุลบ โดยประจุที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกกักกัน ได้มากกว่า (คุณลักษณะทางฟิสิกส์) และจากการแพร่กระจายของสาร (Solution-diffusion) จากประจุที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีการกักกัน

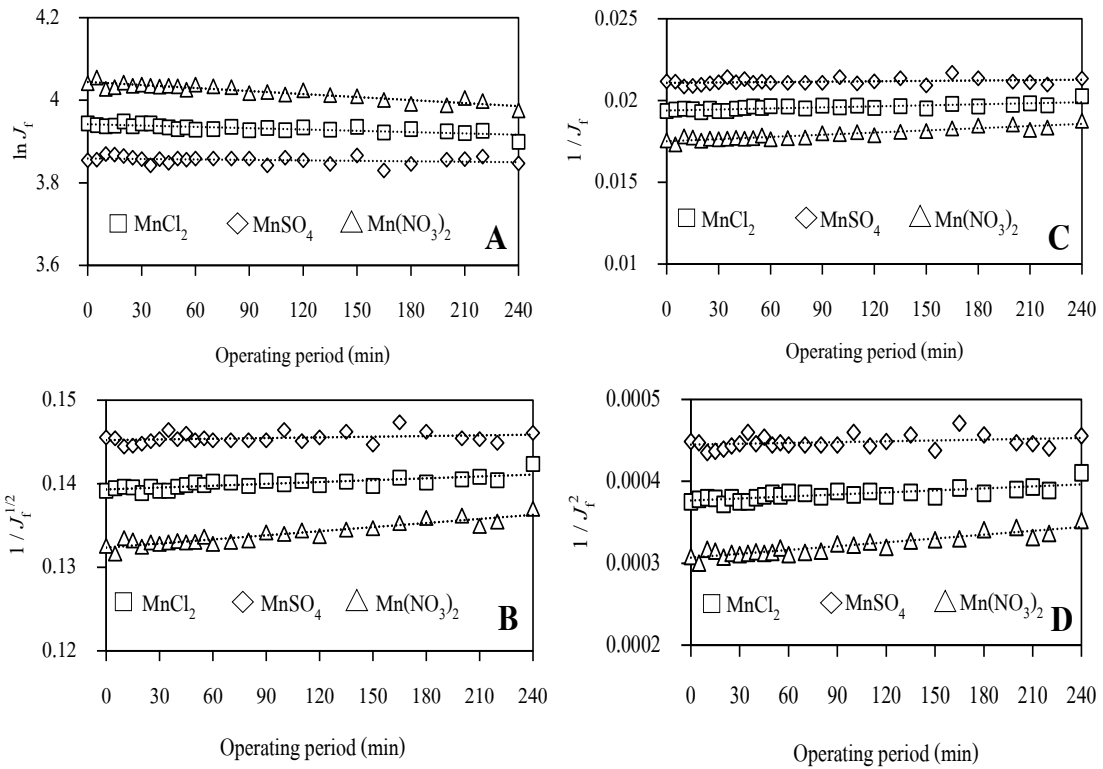
ได้น้อยลง (คุณลักษณะทางเคมี) [13] สำหรับประจุสองลบ แมงกานีสสามารถกำจัดได้สูง เนื่องจากการรักษาประจุสมดุลจากประจุสองลบของซัลเฟตที่แยกออกจากเยื่อกรองแบบนาโน นอกจากนี้ร้อยละการกำจัดยังสอดคล้องกับคุณสมบัติของเยื่อกรองแบบนาโน (แสดงในตารางที่ 1) ที่นำมาทดสอบซึ่งบ่งชี้ว่าความสามารถกำจัด $MgSO_4$ ได้ประมาณร้อยละ 98 (ที่ความดัน 100 psig) และเมื่อพิจารณาการลดลงของค่าฟลักซ์สารละลายแมงกานีสแต่ละชนิดพบว่าค่าฟลักซ์สารละลายลดลงเล็กน้อย ดังนี้ $MnCl_2$ พบ ฟลักซ์สารละลายอยู่ในช่วง 51.64–49.35 LMH ($J/J_0 = 0.956$), $MnSO_4$ อยู่ในช่วง 47.21–46.85 LMH ($J/J_0 = 0.992$) และ $Mn(NO_3)_2$ อยู่ในช่วง 56.92–53.28 LMH ($J/J_0 = 0.936$) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [14] ทำการศึกษาการลดลงของฟลักซ์ บนแผ่นเยื่อกรอง 2 ชนิดที่ต่างกัน คือ MWCNT และ PES-UF ภายใต้สภาวะการเติม BSA = 10 mg/L, Lys = 10 mg/L และการผสมของ BSA-Lys = 20 mg/L ผลการศึกษาพบว่า ในทุกกรณีมีการลดลงของฟลักซ์ และพบการลดลงของฟลักซ์สูงสุดในกรณีของการผสมระหว่าง BSA-Lys ซึ่งสาเหตุที่ทำให้มีการลดลงของฟลักซ์มากที่สุด เกิดจากปริมาณของความเข้มข้นของสารในระบบ อีกทั้งสารละลายที่ใช้ในระบบมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองที่ใช้ จึงทำให้เกิดการประอะเป็นอัน และเกิดการสะสมของสารละลายบริเวณพื้นผิวเยื่อกรอง จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ฟลักซ์ลดลง

ตารางที่ 3 ร้อยละการกำจัดของแมงกานีสและฟลักซ์ของสารละลาย

Type of Substance	Manganese Rejection (% R)	Initial Flux (J_0 , LMH)	Final Flux (J, LMH) (J/J_0)
$MnCl_2$	84.86	51.64	49.35 (0.956)
$MnSO_4$	95.0	47.21	46.85 (0.992)
$Mn(NO_3)_2$	70.7	56.92	53.28 (0.936)

การศึกษาลักษณะการดูดซับของเยื่อกรอง เมื่อดำเนินระบบภายใต้ความดันคงที่ (ใช้ความดันคงที่ในการทดสอบเท่ากับ 60 psig) ทำโดยใช้ผลการทดลองที่ได้จากค่าฟลักซ์สารละลายในแต่ละช่วงเวลาในการกรองผ่านเยื่อกรองแบบนาโน ภายใต้สภาวะที่ใช้สารละลายแมงกานีสที่

ต่างชนิดกัน ความแรงประจุเท่ากับ 0.01 mol/L โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermans and Bredée ทั้ง 4 ชนิด ซึ่งแสดงผลการนำเข้าแบบจำลองตามสมการแสดงดังรูปที่ 3 และผลการเปรียบเทียบค่า R^2 แสดงไว้ตารางที่ 4



รูปที่ 3 การวิเคราะห์การดูดตันของสารละลายต่างชนิดกัน โดยมีรูปการดูดตันเป็นแบบ (A) CBM, (B) SBM, (C) IBM และ (D) CFM

ตารางที่ 4 ค่า R² ในแบบจำลอง Hermia and Bredée โดยสารละลายแมงกานีสที่แตกต่างกัน

สารละลายที่ใช้ทดสอบ	ค่า R ² ที่ได้จากแบบจำลองของ Hermans and Bredée ทั้ง 4 แบบ			
	CBM	SBM	IBM	CFM
MnCl ₂	0.785	0.735	0.745	0.732
MnSO ₄	0.899	0.866	0.856	0.865
Mn(NO ₃) ₂	0.739	0.727	0.725	0.716

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบกับการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ในการอธิบายการลดลงของฟลักซ์สารละลายแมงกานีส ชนิด MnCl₂, MnSO₄ และ Mn(NO₃)₂ ซึ่งพบว่าค่า R² ที่ได้ในแต่ละรูปแบบ มีค่าต่างกันไม่มากนัก โดยเฉพาะในแบบจำลองของ CBM และ SBM สาเหตุอาจเนื่องมาจากขนาดของโมเลกุลในน้ำตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ อาจทำให้รูปแบบการดูดตันสามารถเข้าได้กับแบบจำลองของ CBM และ SBM มากกว่าในแบบจำลองของ IBM และ CFM แต่เมื่อพิจารณาค่า R² ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด พบในแบบจำลองของ CBM โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.785, 0.899 และ

0.739 ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากความเข้มข้นของเกลือแมงกานีสจากค่าความแรงประจุที่ 0.01 mol/L ทำให้ความเข้มข้นของเกลือแมงกานีสเพิ่มขึ้นตามช่วงของระยะเวลาการกรอง นอกจากนี้ยังมีผลของประจุบวกของแมงกานีสที่จับตัวกับประจุลบของเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้ลดชั้น Double layer ลง และกระทบต่อขนาดรูของเยื่อกรอง ทำให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับแบบจำลองของ CBM ประกอบกับยังมีผลของประจุลบจากคลอไรด์ (Cl⁻) ซัลเฟต (SO₄²⁻) และไนเตรต (NO₃⁻) ที่ทำให้เกิดแรงผลักจากประจุลบจากแผ่นเยื่อกรอง และส่วนหนึ่งของประจุสองบวกของแมงกานีส จะถูกรักษาภาพสมดุลของประจุจากการกำจัด

ประจุลบของเหล่านี้ ทำให้เกิดการสะสมความเข้มข้น บริเวณรูพรุนและ/หรือผิวหน้าของเยื่อกรองไม่ซ้อนทับกัน ทำให้เกิดการบีบอัดตัวของรูพรุนแน่นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ฟลักซ์ของน้ำเพอมิเทท ลดลง

3.2 ผลการศึกษาของค่าพีเอช

จากตารางที่ 5 แสดงผลของค่าพีเอชของเกลือแมงกานีสร่วมกับ สารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสและสารอินทรีย์ธรรมชาติ รวมทั้งค่าฟลักซ์สารละลาย โดยสภาวะที่ใช้ในการศึกษาดังนี้ ปรับค่าพีเอชเป็น 3, 5 และ 7 ความแรงประจุ 0.01 mol/L ใช้ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10 mg/L และควบคุมความดันที่ 60 psig ระยะเวลาในการทดสอบเท่ากับ 240 นาที จากผลการศึกษาพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 3 ให้ค่าการกำจัดแมงกานีสของสารละลายทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ $MnCl_2$, $MnSO_4$ และ $Mn(NO_3)_2$ สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 80.04, 95.4 และ 68.36 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่พีเอช 3 ให้ร้อยละการกำจัดสูงกว่าที่พีเอช 5 และ 7 อาจเป็นผลมาจากค่าพีเอชที่ 3 อาจมีค่าต่ำกว่าจุด Isoelectric point หรือ IEP ของเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้ประจุของเยื่อกรองแบบนาโนเป็นประจุบวก ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักรัหว่างประจุบวกของแมงกานีสกับประจุบวกจากเยื่อกรองแบบนาโน ผลการวิเคราะห์ได้ให้ร้อยละการกำจัดแมงกานีสสูงขึ้นทิศทางเดียวกันทั้งสามชนิดของแมงกานีสที่ใช้ทดสอบ ขณะที่ค่าพีเอชที่สูงขึ้น (pH 5 และ pH 7) ทำให้เยื่อกรองมีความเป็นประจุลบมากขึ้นสามารถดึงประจุบวกของแมงกานีสทำให้ไอออนสามารถแพร่ผ่านเยื่อกรองแบบนาโนได้ง่าย ดังนั้นร้อยละการกำจัดแมงกานีสจึงลดลง เมื่อเพิ่มค่าพีเอชสารละลาย สำหรับผลของพีเอชต่อร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าในทุกระดับค่าพีเอช เยื่อกรองแบบนาโนมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติค่อนข้างสูงอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อคำนวณระบบครบที่เวลา 240 นาที มีร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติร่วมกับสารละลาย $MnCl_2$, $MnSO_4$ และ $Mn(NO_3)_2$ มีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 97 เนื่องจากการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติจะใช้กลไกการคัดขนาด (Size Exclusion) ซึ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติมีขนาดใหญ่กว่าขนาด

ของรูพรุนเยื่อกรองแบบนาโน จึงทำให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติให้มีค่าสูง

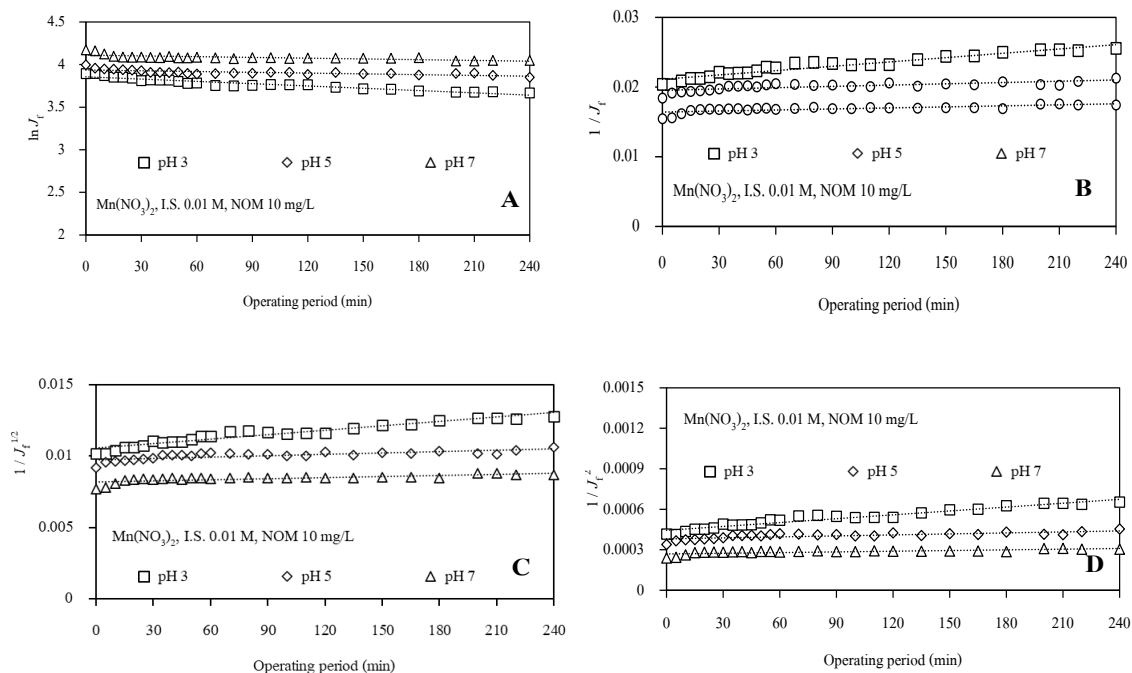
สำหรับค่าฟลักซ์สารละลายของสารทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าฟลักซ์สารละลายในช่วงเริ่มต้นจะมีค่าสูง และค่าฟลักซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาการกรองเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนของ J/J_0 ของสารเกลือแมงกานีสแต่ละชนิดร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าลดลงมาก เมื่อเทียบกับเกลือแมงกานีสอย่างเดียว (เทียบจากตารางที่ 3) เนื่องจากผลร่วมระหว่างเกลือแมงกานีสและสารอินทรีย์ธรรมชาติสะสมบนผิวของเยื่อกรอง ส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงระหว่างการกรอง ทั้งยังเกิดจากการเพิ่มความต้านทานในการไหลมากขึ้น สอดคล้องกับอัตราการไหลผ่านเยื่อกรองที่ลดลง ทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงที่เวลา 240 นาที จากงานวิจัยของ [14] ทำการศึกษาโดยใช้เยื่อกรองชนิด MWCNT และ PES-UF โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและค่าความแรงประจุในการกรองโปรตีนต่างชนิดกัน ผลการศึกษาพบว่าโปรตีนจาก BSA และ Lys ที่พีเอช 7 มีการลดลงของฟลักซ์สูงสุดในขณะที่การผสมระหว่าง BSA-Lys ที่พีเอช 4.7 และ 10.4 ให้การลดลงของฟลักซ์มากที่สุด จากการกรองโดยเยื่อกรองชนิด MWCNT ในขณะที่เยื่อกรองชนิด PES-UF พบว่า การใช้โปรตีนจาก Lys การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการใช้โปรตีนจาก BSA กลับพบว่าที่พีเอช 7 และพีเอช 10.4 ให้การลดลงของฟลักซ์สูงสุด และการผสมระหว่าง BSA-Lys พบว่า ที่พีเอช 4.7 มีการลดลงของฟลักซ์สูงสุด ผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงแผ่นเยื่อกรองมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่าฟลักซ์ และเป็นผลทำให้เกิดการอุดตันในแบบต่าง ๆ ส่วนการเพิ่มความแรงประจุส่งผลต่อการลดลงของฟลักซ์เช่นกัน ซึ่งในบางกรณีเป็นตัวที่ไปส่งเสริมในระบบ คือช่วยลดการอุดตันที่เกิดขึ้น ได้แก่กรณีที่มีการเติมโปรตีนจาก Lys และ BSA ในกระบวนการของ MWCNT และการผสมของ BSA-Lys ในกระบวนการของ PES-UF ในขณะที่การเพิ่มความแรงประจุบางกรณีก็ส่งผลให้ด้านลบ เช่น ในกระบวนการของ MWCNT ที่ใช้โปรตีนผสมระหว่าง BSA-Lys และในกระบวนการของ PES-UF ที่ใช้โปรตีนของ BSA

การศึกษาลักษณะการอุดตันของเยื่อกรอง เมื่อดำเนินระบบภายใต้ความดันคงที่ ทำโดยใช้ผลการทดลองที่ได้จากค่าฟลักซ์สารละลายในแต่ละช่วงเวลาของการกรองที่ผ่านกระบวนการของเยื่อกรองแบบนาโน ภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจาก 3, 5 และ 7 ความแรงประจุเท่ากับ

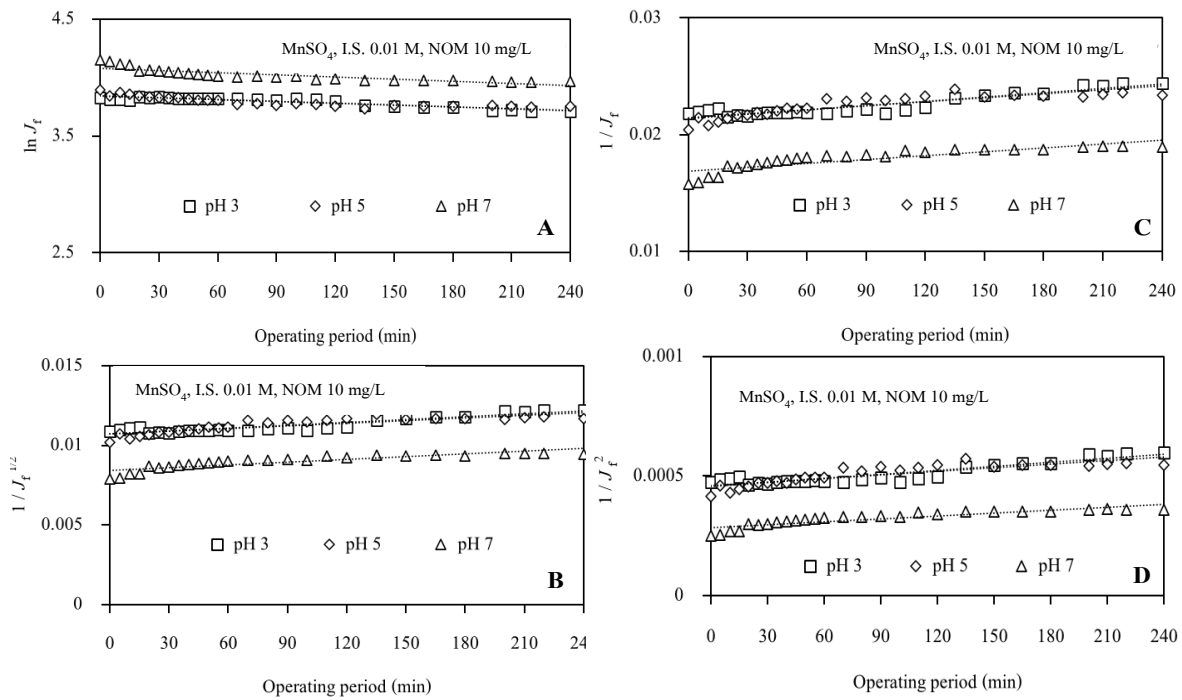
0.01 mol/L สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ความเข้มข้น 10 mg/L โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hermans and Bredée ทั้ง 4 ชนิด ซึ่งแสดงผลการนำเข้ามาแบบจำลองตามสมการแสดงดังรูปที่ 4-6 และผลการเปรียบเทียบค่า R^2 ถูกแสดงไว้ตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลของค่าพีเอชของชนิดเกลือแมงกานีสร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดและค่า ฟลักซ์สารละลาย

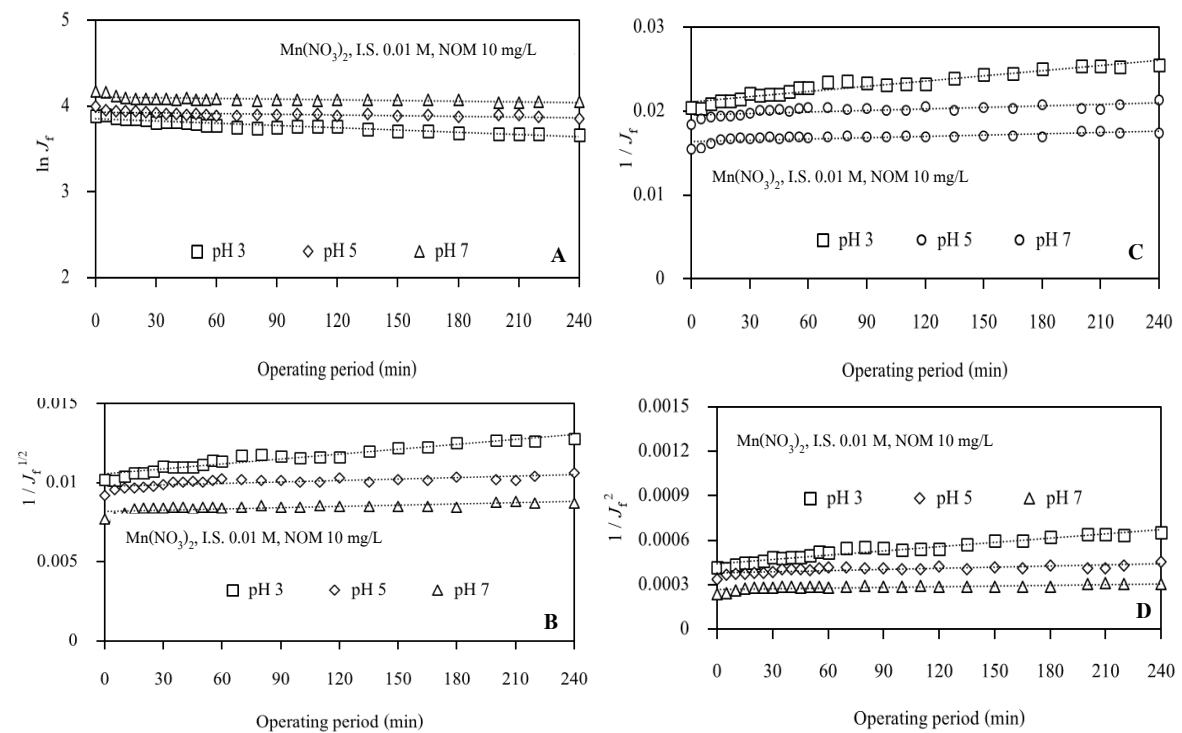
Type of Substance	pH	Manganese Rejection (% R)	NOM Rejection (% R)	Initial Flux (J_o , LMH)	Final Flux (J , LMH) (J/J_o)
MnCl ₂	pH 3	80.04	99.73	45.14	40.21 (0.891)
	pH 5	45.44	99.98	53.28	50.14 (0.941)
	pH 7	43.64	97.48	55.57	53.07 (0.955)
MnSO ₄	pH 3	95.4	99.47	45.85	40.92 (0.892)
	pH 5	82.40	99.07	49	42.71 (0.872)
	pH 7	78.43	99.13	53.71	46.58 (0.867)
Mn(NO ₃) ₂	pH 3	68.36	98.68	45.61	41.03 (0.90)
	pH 5	53.28	99.14	48.35	43.78 (0.905)
	pH 7	48.12	98.53	49.07	39.14 (0.798)



รูปที่ 4 กราฟวิเคราะห์การอุดตันโดย MnCl₂ ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่ค่า pH = 3, 5 และ 7, NOM 10 mg/L โดยที่มีการอุดตันแบบ; (A) CBM, (B) SBM, (C) IBM และ (D) CFM



รูปที่ 5 การวิเคราะห์การอุดตันโดย MnSO₄ ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่ค่า pH=3, 5 และ 7, NOM 10 mg/L โดยที่มีวิธีการอุดตันแบบ; (A) CBM, (B) SBM, (C) IBM และ (D) CFM



รูปที่ 6 การวิเคราะห์การอุดตันโดย Mn(NO₃)₂ ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่ค่า pH=3, 5 และ 7, NOM 10 mg/L โดยที่มีวิธีการอุดตันแบบ; (A) CBM, (B) SBM, (C) IBM และ (D) CFM

ตารางที่ 6 ค่า R^2 ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับชนิดเกลือแมงกานีสร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ และค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

ชนิดสารละลาย	ค่าพีเอช	ค่า R^2 ที่ได้จากแบบจำลองของ Hermans and Bredée ทั้ง 4 แบบ			
		CBM	SBM	IBM	CFM
MnCl ₂	pH 3	0.864	0.865	0.855	0.897
	pH 5	0.864	0.868	0.875	0.899
	pH 7	0.878	0.869	0.863	0.895
MnSO ₄	pH 3	0.893	0.882	0.879	0.916
	pH 5	0.894	0.881	0.897	0.927
	pH 7	0.928	0.907	0.931	0.939
Mn(NO ₃) ₂	pH 3	0.916	0.919	0.924	0.948
	pH 5	0.927	0.867	0.892	0.953
	pH 7	0.940	0.911	0.932	0.945

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลของการทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการอธิบายค่าฟลักซ์สารละลาย ซึ่งพบว่าสารละลายแมงกานีสชนิด MnCl₂, MnSO₄ และ Mn(NO₃)₂ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจาก 3, 5, และ 7 พบว่ามีค่า R^2 ที่มากที่สุด ในแบบจำลอง สอดคล้องกับผลของ CFM ของทุกชุดการทดสอบ โดยคาดว่า การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชอาจจะส่งผลต่อประจุที่อยู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองและส่งผลน้อยกว่าขนาดโมเลกุลของอนุภาคในสารละลายที่ใช้ทดสอบ โดยในน้ำตัวอย่างมีสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ที่ความเข้มข้น 10 mg/L ละลายอยู่ ขณะที่ขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเยื่อกรองแบบนาโนที่ใช้ทดสอบ จึงทำให้ขนาดอนุภาคของสารอินทรีย์ธรรมชาติไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ และถูกกักกันจากเยื่อกรอง ส่งผลทำให้เกิดการสะสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง จึงทำให้มีโอกาสทำให้เกิดการอุดตันในรูปแบบจำลองการเกิดเค้กชนิด CFM ได้ และเมื่อมีการผสมระหว่างเกลือแมงกานีสร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ สามารถสะสมตัวของสารทั้ง 2 ชนิดบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรองแบบนาโน จึงทำให้เกิดการอุดตันแบบชั้นเล็กเกิดขึ้น

ซึ่งการอุดตันชนิดนี้สามารถล้างพื้นฟูเยื่อกรองให้กลับมาใช้งานใหม่ จากการล้างด้วยน้ำสะอาดและสารเคมีปรับสภาพค่าความเป็นกรด-ด่างของการล้าง

4. สรุปผล

สารละลายแมงกานีสที่ใช้ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ MnCl₂, MnSO₄ และ Mn(NO₃)₂ พบค่าการกำจัดของสารละลาย MnSO₄ ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 95 เนื่องจากซัลเฟตมีไอออนประจุลบสองตัว (Divalent Anions) จะถูกผลักโดยเยื่อกรองที่มีประจุลบ โดยประจุที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกกักกันได้มากกว่าจึงส่งผลให้ค่าการกำจัดเกลือของสารละลาย MnSO₄ มีค่ามากที่สุด ในขณะที่ MnCl₂ และ Mn(NO₃)₂ มีการกำจัดแมงกานีสเท่ากับร้อยละ 84.86 และ 70.7 ตามลำดับ และพบค่าฟลักซ์ในแต่ละสภาวะมีค่าต่างกันเล็กน้อย เพราะเป็นสารละลายที่อยู่ในกลุ่มของสารประกอบแมงกานีสเหมือนกัน จึงเป็นผลให้ค่าฟลักซ์ที่ได้แตกต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเท่ากับ 3, 5 และ 7 พบค่าพีเอช 3 ให้ร้อยละการกำจัดแมงกานีสสูงสุด ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากค่าพีเอช 3 มีต่ำกว่าจุด Isoelectric point หรือ IEP ทำให้ประจุเยื่อกรองแบบนาโนเป็นประจุบวก ซึ่งทำให้การกำจัดประจุบวกของ

แมงกานีสให้สูงขึ้น ในขณะที่การศึกษากำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าในทุกสภาวะการทดลอง ทุกค่ามีการกำจัดที่สูง ซึ่งมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 97 เนื่องจากเยื่อกรองแบบนาโนใช้กลไกในการคัดขนาด ซึ่งขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองแบบนาโน ทำให้การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าสูง ส่วนการศึกษารูปแบบการอุดตันจากการการใช้เฉพาะเกลือแมงกานีสร่วมกับเยื่อกรองแบบนาโน พบว่าทุกกรณีมีรูปแบบการอุดตันสอดคล้องกับรูปแบบของ CBM ซึ่งต่างจากในกรณีที่มีการใช้เกลือแมงกานีสผสมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติร่วมกับเยื่อกรองแบบนาโน ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและการเพิ่มความแรงประจุ พบว่ารูปแบบการอุดตันเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบของ CFM ซึ่งเกิดจากการเกิดชั้นเค้กของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

สำหรับข้อเสนอแนะจากงานวิจัย การทดสอบควรมีการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเยื่อกรองแบบนาโนก่อนและหลังนำไปใช้งาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope; SEM) เพื่อแสดงถึงการเกิดอุดตันบนผิวของเยื่อกรองในรูปแบบต่างๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Norherdawati, W. M. Abdul and R. S. A. Siti, "Iron and manganese removal by nanofiltration and ultrafiltration membranes: Influence of pH adjustment," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol. 21, no. 1, pp. 149–158, 2017, doi: 10.17576/mjas-2017-2101-1.
- [2] J. E. Marcovecchio, S. E. Botté, C. E. Domini and R. H. Freije, "Heavy metals, major metals, trace elements" in *Handbook of Water Analysis*, 3rd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013, ch. 15, pp. 385–434.
- [3] World Health Organization, "Chemical fact sheets," in *WHO. Guidelines for drinking-water quality, in Recommendations*, 3rd ed., Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2008, ch. 12, sec. 74–80, pp. 390–399.
- [4] M. S. Islam, R. Sadiq, M. J. Rodriguez, H. Najjaran, A. Francisque and M. Hoorfar, "Evaluating water quality failure potential in water distribution systems: A fuzzy-TOPSIS-OWA-based methodology," *Water resources management*, vol. 27, pp. 2195–2216, 2013, doi: 10.1007/s11269-013-0283-6.
- [5] 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, 2005, Art. no. 1494, doi: 10.1088/0960-1317/15/8/016.
- [6] A. bin Jusoh, W. H. Cheng, W. M. Low, A. Nora'aini and M. M. M. Noor, "Study on the removal of iron and manganese in groundwater by granular activated carbon," *Desalination*, vol. 182, no. 1–3, pp. 347–353, 2005, doi: 10.1016/j.desal.2005.03.022.
- [7] D. Ellis, C. Bouchard and G. Lantagne, "Removal of iron and manganese from groundwater by oxidation and microfiltration," *Desalination*, vol. 130, no. 3, pp. 255–264, 2000, doi: 10.1016/S0011-9164(00)00090-4.
- [8] A. Abdul Kadir, N. B. Othman and N. M. Azmi, "Potential of using Rosa Centifolia to remove iron and manganese in groundwater treatment," *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 70–82, 2012.
- [9] K. -H. Choo, H. Lee and S. -J. Choi, "Iron and manganese removal and membrane fouling during UF in conjunction with prechlorination for drinking water

- treatment,” *Journal of Membrane Science*, vol. 267, no. 1–2, pp. 18–26, 2005, doi: 10.1016/j.memsci.2005.05.021.
- [10] J. H. Potgieter, R. I. Mccrindle, Z. Sihlali, R. Schwarzer and N. Basson, “Removal of iron and manganese from water a high organic carbon loading part I : The effect of various coagulants,” *Water, Air Soil Pollution*, vol. 162, no. 1–4, pp. 49–59, 2005, doi: 10.1007/s11270-005-5992-x.
- [11] P. Wu and M. Imai, “Novel biopolymer composite membrane involved with selective mass transfer and excellent water permeability,” in *Advancing Desalination*, London, UK: IntechOpen Limited, ch. 3, 2012, pp. 57–81.
- [12] P. H. Hermans and H. L. Brede'e, “Principles of the Mathematical Treatment of Constant-pressure Filtration,” *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 55, no. 2, pp. T1–T8, 1936, doi: 10.1002/jctb.5000550219.
- [13] 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.
- [14] J. Lee, S. Jeong, Y. Ye, V. Chen, S. Vigneswaran, T. Leiknes and Z. Liu, “Protein fouling in carbon nanotubes enhanced ultrafiltration membrane: fouling mechanism as a function of pH and ionic strength,” *Separation and Purification Technology*, vol. 176, pp. 323–334, 2017, doi: 10.1016/j.seppur.2016.10.061