



## ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกรองของเกลือแมงกานีสร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วยเยื่อกรองนาโน

### Factors Affecting Filtration Efficiency of Combined Manganese Salts and Natural Organic Matter by Nanofiltration Membrane

สุพัฒน์พงษ์ มัตตราจ<sup>1\*</sup> มณีรัตน์ แก้วกัญญา<sup>2</sup> และ ประยูทธ กองแซง<sup>2</sup>

Supatpong Mattaraj<sup>1\*</sup>, Maneerat Kaewkanya<sup>2</sup> and Prayuth Kongsang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

<sup>1\*</sup> Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

<sup>2</sup>Environmental Engineering Program, Department of Chemical Engineering, Ubon Ratchathani University

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

#### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกรองของเกลือแมงกานีสร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยเยื่อกรองนาโนการทดสอบโดยใช้ชุดทดลองการไหลตามแนวตั้งโดยที่มีแผ่นเยื่อกรองถูกใส่ในระบบการกรองเป็นการศึกษาภายใต้สภาวะควบคุมที่มีปัจจัยที่แตกต่างกัน เช่น (1) ชนิดของเกลือแมงกานีสที่แตกต่างกัน (ได้แก่ แมงกานีสคลอไรด์ แมงกานีสซัลเฟต และแมงกานีสไนเตรต) (2) ค่าพีเอชเท่ากับ 3, 5 และ 7 (3) ความแรงประจุที่ 0.005, 0.01 และ 0.015 M ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10 mg/L ขณะที่ความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบคงที่เท่ากับ 60 psig ตลอดจนการทดสอบผ่านการกรอง จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มค่าพีเอชทำให้ฟลักซ์สารละลายต่ำและลดค่าการกำจัดสารแมงกานีส ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 พบว่าจะให้ค่าฟลักซ์สารละลายและค่าการกำจัดสารแมงกานีสสูงที่สุด ค่าการกำจัดสารแมงกานีสเรียงจากค่ามากที่สุดไปค่าน้อยสุดได้แก่  $MnSO_4$ ,  $MnCl_2$  และ  $Mn(NO_3)_2$  ตามลำดับ การเพิ่มความแรงประจุจาก 0.005 M ถึง 0.015 M ส่งผลให้ฟลักซ์สารละลายและค่าการกำจัดสารแมงกานีสมีค่าลดลง ที่ความแรงประจุเท่ากับ 0.005 M ค่าการกำจัดแมงกานีสจะให้ค่าสูงสุดสำหรับเกลือ  $MnCl_2$ ,  $MnSO_4$  และ  $Mn(NO_3)_2$  เท่ากับร้อยละ 68.09 - 49.62, 95.67-87.27, 68.86-57.48 ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** เยื่อกรองนาโน สารอินทรีย์ธรรมชาติ แมงกานีส ฟลักซ์สารละลาย

#### Abstract

The objective of this research was to study the factors affecting filtration efficiency of combined manganese salts and natural organic matter (NOM) 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 controlled conditions with different factors such as (1) different types of manganese salts (i.e. manganese chloride, manganese sulfate and manganese nitrate) (2) pHs of 3, 5, 7 (3) ionic strengths of 0.005, 0.01, 0.015 M. The NOM concentration was controlled at 10 mg/L, while the pressure was operated constant at 60 psig



throughout filtration experiments. Experimental results revealed that increased pH provided lower solution flux and decreased manganese rejection. At solution pH of 3, it was found that the highest solution flux and manganese rejections were obtained. The manganese rejections were ranged from the highest to the lowest values were  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{MnCl}_2$ , and  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ , respectively. Increased ionic strengths from 0.005 M to 0.015 M resulted in decreased solution flux and manganese rejections. At ionic strength of 0.005 M, the manganese rejections showed the highest values for  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{MnSO}_4$  and  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$  salts were 68.09 - 49.62, 95.67–87.27, 68.86–57.48, respectively.

**Keywords :** Nanofiltration Membrane, Natural Organic Matter, Manganese, Solution Flux

## บทนำ

แมงกานีสและสารประกอบแมงกานีสเป็นธาตุที่มีประจุสองบวกเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในแหล่งน้ำใต้ดิน รวมถึงน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และด้านเกษตรกรรม เป็นต้น (Schaep et al., 1999) ก่อให้เกิดปัญหาความกระด้างในน้ำ ซึ่งความกระด้างเป็นคุณลักษณะอย่างหนึ่งที่ยังชี้ถึงคุณภาพของน้ำ ทำให้เกิดปัญหาสำหรับผู้บริโภค เพราะทำให้เกิดรสชาติที่ไม่พึงประสงค์ อีกทั้งยังส่งผลทำให้เกิดคราบสกปรกบนเครื่องสุขภัณฑ์ เกิดการอุดตันในระบบท่อจ่ายน้ำ เกิดสีในน้ำประปา เกิดการอุดตันในระบบกรองน้ำและไบพัต ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา อีกทั้งสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter: NOM) ยังเป็นต้นเหตุที่สำคัญที่พบในแหล่งน้ำผิวดินที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา ซึ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสี กลิ่น การกัดกร่อน และการรวมตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติกับคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อสามารถก่อให้เกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by Products: DBPs) (Marhaba et al., 2003) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ได้เช่นกัน จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการบำบัดน้ำดิบตามแหล่งน้ำธรรมชาติให้มีความสะอาดเพียงพอก่อนที่จะนำไปใช้ได้ ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยกระบวนการเยื่อกรอง (Membrane process) มีความก้าวหน้าหลากหลายและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น ซึ่งในปัจจุบันเยื่อกรองนาโน (Nanofiltration, NF) เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากนิยมนำมาใช้ในการผลิตน้ำดื่ม การทำน้ำอ่อน สามารถกักกันสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก แบคทีเรีย จุลินทรีย์รวมถึงสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำด้วย และยังสามารถกรองสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกและประจุลบคู่ได้ นอกจากนี้ยังสามารถแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำได้ด้วย (Conlon and McClellan, 1989)

เยื่อกรองนาโนเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันในการดำเนินกระบวนการอยู่ระหว่างอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และออสโมซิสผกผัน (Reverse osmosis) ซึ่งเยื่อกรองแบบนาโนมีข้อได้เปรียบ คือการใช้ความดันในการดำเนินระบบที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับออสโมซิสผกผัน และปริมาณน้ำที่ผลิตได้มีปริมาณมากและยังสามารถใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ปนมากับน้ำได้เป็นอย่างดี (Van der Bruggen and Vandecasteele, 2003; Contreras et al., 2009) ทั้งนี้ปัญหาของกระบวนการ เยื่อกรอง คือ การลดลงของอัตราการไหล โดยมีสาเหตุมาจากการเกิด Concentration Polarization (CP) ทำให้เกิดการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าและภายในรูพรุนของเยื่อกรอง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าลดลงจึงต้องทำความสะอาดบ่อยครั้งมากขึ้น เพื่อให้อัตราการกรองคืนกลับมา และการอุดตันยังส่งผลทำให้อายุการใช้งานของเยื่อกรองสั้นลง ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกรองของเกลือแมงกานีสร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยเยื่อกรองนาโน โดยในการศึกษานี้ให้ประสิทธิภาพการกำจัดของสารอินทรีย์ที่เกิดจากเกลือแมงกานีสและสารอินทรีย์ที่ได้จากแหล่งน้ำธรรมชาติจากผลการทดลองที่ได้จะเป็นการประยุกต์ใช้เยื่อกรองนาโนสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำต่อไป



## วิธีการวิจัย

### สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

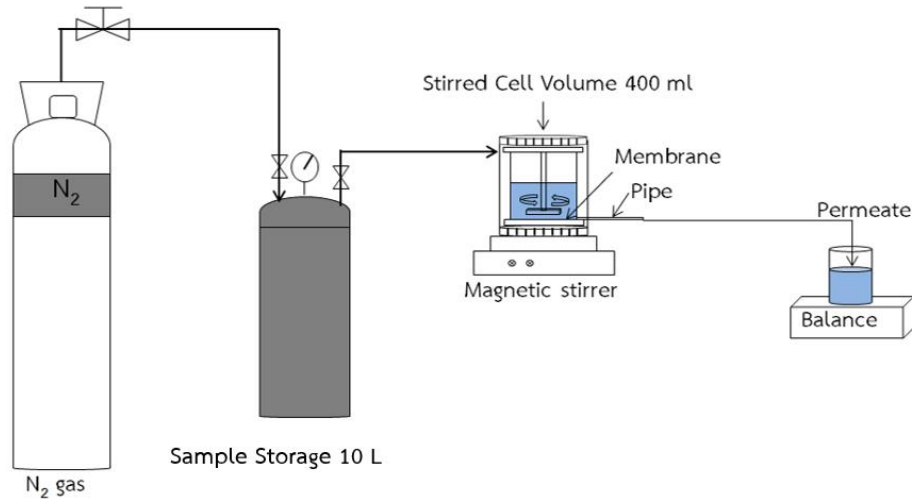
1. Sodium hydroxide (NaOH) AR.grade จากบริษัท Ajax Finechem
2. Citric acid ( $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ ) AR.grade, Loba Chemie Pty Ltd
3. Manganese (II) chloride ( $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ ) AR.grade ยี่ห้อ Qrec ประเทศนิวซีแลนด์
4. Manganese Sulfate Monohydrate ( $Mn(SO_4) \cdot H_2O$ ) AR.grade, Ajax Finechem Pty Ltd
5. Manganese (II) nitrate tetrahydrate ( $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ ) AR.grade, Ajax Finechem Pty Ltd

### การเตรียมสารอินทรีย์ธรรมชาติ

สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากหนองอีเจมส์ แหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ซึ่งมีคุณสมบัติมีดังนี้ สารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด  $4.27 \text{ mg/L}$  มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น  $254 \text{ nm}$  เท่ากับ  $0.178 \text{ cm}^{-1}$  ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่  $44 \text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  พีเอชอยู่ที่ 7.1 และค่าความขุ่น  $7.4 \text{ NTU}$  การเตรียมสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้น้ำจากแหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมาจำนวน  $1,000 \text{ L}$  ผ่านระบบเยื่อกรองแบบไมโครขนาด  $5 \text{ }\mu\text{m}$  และ  $1 \text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ เพื่อการบำบัดน้ำเบื้องต้นก่อนจากนั้นจะผ่านระบบออสโมซิสผันกลับเพื่อแยกสารอินทรีย์ธรรมชาติในส่วนคอนเซนเตรทที่ไม่ผ่านการกรองให้เหลือปริมาตรสารอินทรีย์ธรรมชาติเข้มข้นประมาณ  $30 \text{ L}$  จะนำไปบรรจุในภาชนะที่ปิดสนิทและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  เพื่อเป็นการรักษาสารอินทรีย์ธรรมชาติให้อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานในการทดสอบเยื่อกรองนาโนต่อไป และส่วนน้ำที่ผ่านการกรองจะเก็บไว้สำหรับล้างระบบ

### ชุดทดลองการไหลตามแนวตั้ง

ภาพที่ 1 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน ระบบนี้ใช้เป็นชุดทดสอบการไหลตามแนวตั้ง โดยจะอาศัยแรงดันจากก๊าซไนโตรเจนป้อนสารละลายเข้าไปในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นเยื่อกรองนาโนที่บรรจุอยู่ในชุดทดสอบ น้ำตัวอย่างจะถูกส่งผ่านมายังชุด Stirred cell ซึ่งภายในจะมีแผ่นเยื่อกรองนาโนที่ผลิตจากโพลีเอไมด์ รุ่น HL4040FM ของบริษัท GE Water & Process Technologies ความสามารถในการกำจัดสารที่มีขนาดโมเลกุล  $150\text{--}300 \text{ Da}$  พีเอชที่ใช้ในการดำเนินระบบอยู่ระหว่าง  $3\text{--}9$  และมีความสามารถในการทนต่อคลอรีนที่ระดับต่ำความเข้มข้น  $0.1 \text{ ppm}$  อุณหภูมิที่สามารถทนได้สูงสุดที่  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  ความดันที่ใช้ในการดำเนินงานอยู่ที่  $70\text{--}300 \text{ Psi}$  ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเยื่อกรองเท่ากับ  $0.0045 \text{ m}^2$  สำหรับน้ำที่ผ่านเยื่อกรองจะไหลออกมาทาง pipe จะเรียกว่า เพอร์มิเอท (Permeate) โดยการดำเนินระบบด้วยความดันให้คงที่เท่ากับ  $60 \text{ psig}$  และใช้เวลาทั้งสิ้นในการทดลอง  $240 \text{ min}$  วัดอัตราการไหลของเพอร์มิเอทและเก็บตัวอย่างตามช่วงเวลาเพื่อนำไปตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารแมงกานีส ค่าการนำไฟฟ้าและค่าการดูดกลืนแสงของสารอินทรีย์ธรรมชาติ



ภาพที่ 1 แผนภาพการทำงานของระบบเยื่อกรองนาโน

#### การตรวจวิเคราะห์ผล

น้ำเพอร์มิเอทที่เก็บแต่ละช่วงเวลาจะนำมาวิเคราะห์ผลของค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (model: UV mini-1240, Shimadzu Corporation, Japan) ที่ความยาวคลื่น 254 nm เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ และการวัดหาความเข้มข้นของแมงกานีสโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (PerkinElmer AAnalyst 200, U.S.A)

#### สมการที่ใช้ในการศึกษา

น้ำตัวอย่างที่วัดปริมาตรเทียบกับช่วงเวลาตลอดการทดลองจะใช้คำนวณอัตราการไหลของเยื่อกรองนาโนและค่า ฟลักซ์สารละลาย ( $J_v$ ) ในลำดับต่อมา จากการศึกษาของ Mattaraj and Kilduff (2003) ได้แสดงสมการค่าฟลักซ์สารละลายจากความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของเยื่อกรองนาโนและพื้นที่หน้าตัดของแผ่นกรอง ดังแสดงการคำนวณได้ในสมการ (1)

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A_m} \quad (1)$$

เมื่อ  $J_v$  คือ ฟลักซ์สารละลาย ( $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ),  $L_p$  คือ ค่าการซึมผ่านของเยื่อกรอง (ความชันกราฟระหว่างฟลักซ์และความดัน) ( $LHM \cdot kPa^{-1}$ ),  $\Delta P$  คือ ความดันในการดำเนินระบบ (kPa),  $\sigma$  คือ สัมประสิทธิ์แรงดันออสโมติก (-),  $\Delta \pi$  คือ แรงดันออสโมติก (kPa),  $Q_p$  คือ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านการกรอง ( $L \cdot h^{-1}$ ),  $A_m$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นกรอง ( $m^2$ ) ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดของสารสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

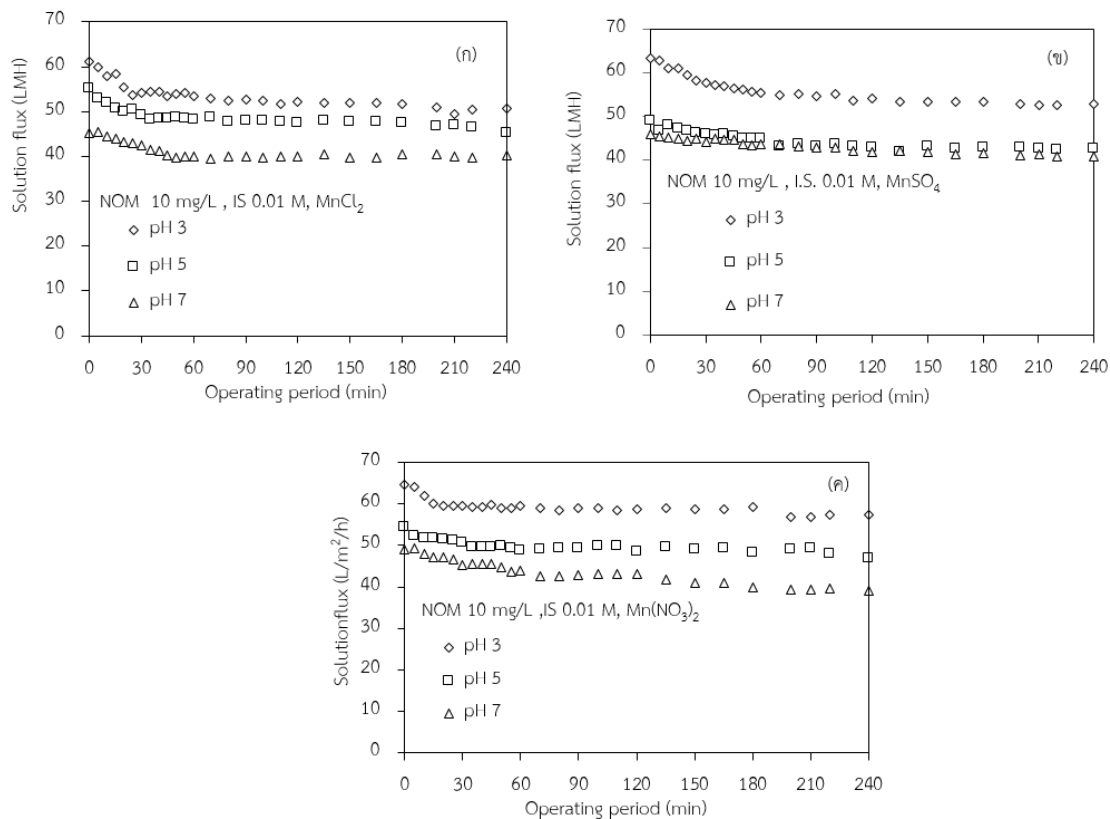
$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_r}\right) \times 100 \quad (2)$$

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

## ผลการวิจัย

### ผลการศึกษาของค่าพีเอช

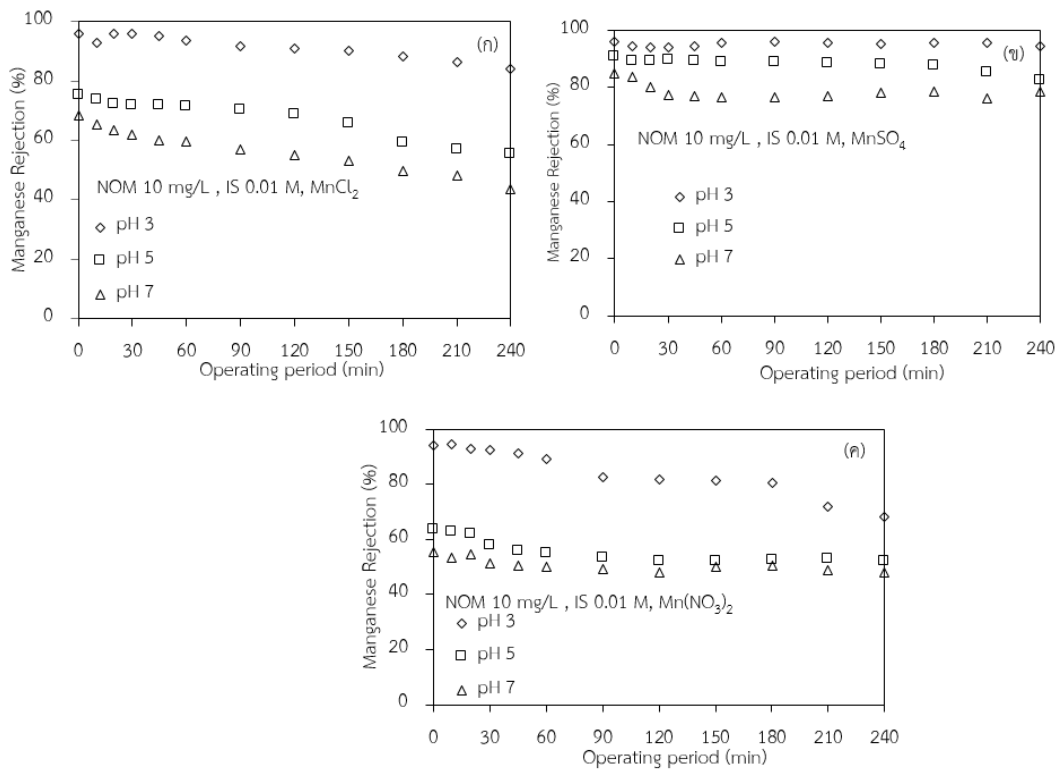
จากภาพที่ 2 แสดงผลพีเอชของเกลือแมงกานีสร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อฟลักซ์สารละลาย โดยเกลือแมงกานีสที่ใช้ ได้แก่  $MnCl_2$ ,  $MnSO_4$  และ  $Mn(NO_3)_2$  โดยปรับค่าพีเอชเป็น 3, 5 และ 7 ใช้เครื่อง pH meter (Eutech pH 700 Meter, Singapore) ควบคุมที่ความแรงประจุ 0.01 M ใช้ความเข้มข้นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 10 mg/L และความดันที่ 60 psig ตลอดจนการทดลอง จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ฟลักซ์สารละลายของสารทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันโดยมีลักษณะของฟลักซ์สารละลายลดลงตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น กล่าวคือ ฟลักซ์สารละลายที่ค่าพีเอช 7 ให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นและสุดท้ายต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าฟลักซ์สารละลายที่ค่าพีเอช 5 และค่าพีเอช 3 ซึ่งค่าฟลักซ์สารละลายสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 (จากผลการวัดอัตราการไหลที่สูงขึ้น) อาจเนื่องมาจากที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ให้ค่าแรงดันออสโมติกที่ต่ำสุดจากสมการที่ (1) นอกจากนี้ยังเป็นจุดที่ใกล้กับจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point: IEP) ของเยื่อกรอง ซึ่งค่าฟลักซ์สารละลายที่จุด IEP ของเยื่อกรองจะให้ค่าสูงสุด สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Qin et al. (2004) ได้เสนอกลไกเพื่ออธิบายค่าฟลักซ์สารละลายที่จุดไอโซอิเล็กทริก ไว้ว่าขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองจะเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช เนื่องจาก 1) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโพลีเมอร์ของเยื่อกรอง (การขยายหรือหดตัว) 2) ผลกระทบทางไฟฟ้ามีผลเล็กน้อย และ 3) แรงผลึกสูงสุดเนื่องจากแรงดันออสโมติกต่ำสุดที่ผิวเยื่อกรอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Rashdi et al., (2013) ที่ทำการศึกษาการกำจัดไอออนโลหะหนักด้วยนาโนฟิลเตรชัน เป็นการใช้อิออนรูนาโนชนิด NF270 ปัจจุบันที่ศึกษา ได้แก่ ผลของค่าพีเอช ความดัน และความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดและฟลักซ์สารละลาย ผลการทดลองพบว่า ค่าฟลักซ์สารละลายแมงกานีสมีค่าสูงสุดอยู่ที่ค่าพีเอช  $3.3 \pm 0.2$  (Al-Rashdi et al., 2013)



ภาพที่ 2 ผลพีเอชของเกลือแมงกานีสร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ (ก)  $MnCl_2$ , (ข)  $MnSO_4$  และ (ค)  $Mn(NO_3)_2$



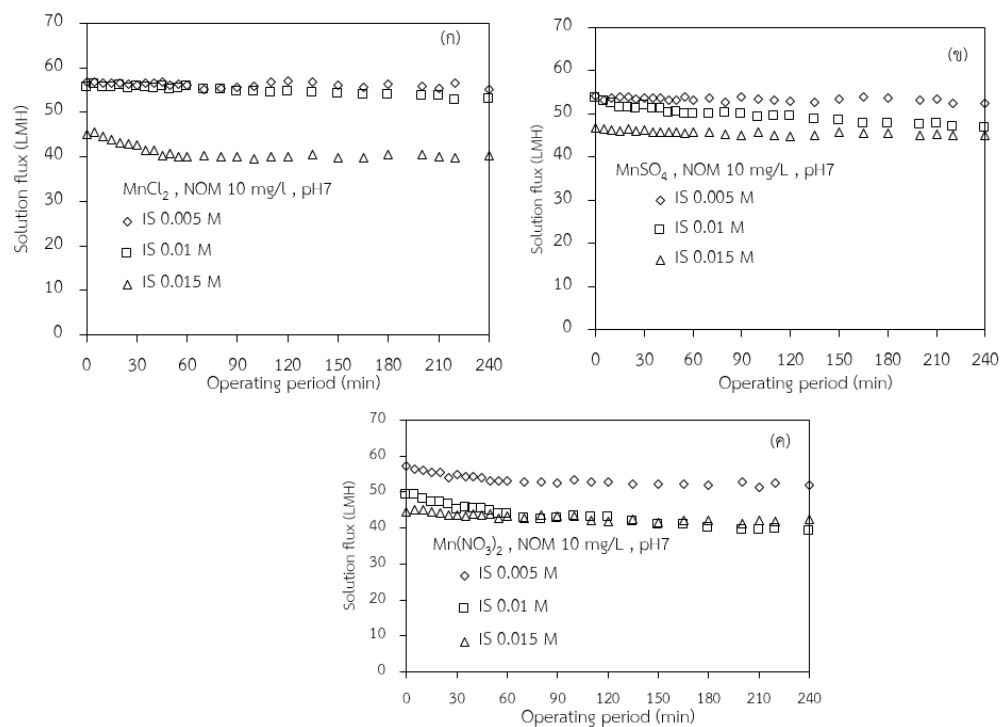
จากภาพที่ 3 แสดงผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดของสารแมงกานีส ผลการทดลองพบว่าค่าการกำจัดแมงกานีสของสารละลายทั้ง 3 ชนิด ( $MnCl_2$ ,  $MnSO_4$  และ  $Mn(NO_3)_2$ ) อ้างอิงจากจากสมการที่ (2) ที่พีเอช 3 ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด อยู่ในช่วงร้อยละ 84.04-96.16, 94.40-96.13 และ 68.36-94.19 ตามลำดับ อาจเกิดจากที่จุด IEP ขนาดของรูพรุนของเยื่อกรองเกิดการขยายตัวทำให้ช่องผ่านน้ำไหลของแมงกานีสน้อยลง ส่งผลทำให้ค่าการกำจัดเพิ่มขึ้นที่ค่าพีเอช 3 และจากการสังเกตยังพบว่าค่าการกำจัดของแมงกานีสสูงที่สุดตลอดช่วงการทดลองเป็นของเกลือ  $MnSO_4$  (ที่มีประจุสองลบของซัลเฟตเปรียบเทียบกับประจุหนึ่งลบของคลอไรด์และไนเตรต) และผลการกำจัดมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน จากการเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายจากพีเอช 3 ไป 7 โดยพบว่าค่าการกำจัดแมงกานีสให้ค่าเรียงจากสูงไปต่ำของสาร  $MnSO_4$ ,  $MnCl_2$  และ  $Mn(NO_3)_2$  ตามลำดับ อาจเนื่องจากการรักษาสมดุลของประจุ (Charge balance) ระหว่างประจุสองบวกของแมงกานีสและประจุสองลบของซัลเฟต ทำให้ค่าการกำจัดของเกลือ  $MnSO_4$  ให้ค่าสูงสุด เมื่อค่าพีเอชที่สูงขึ้นเป็นการเพิ่มแรงผลักของประจุลบจากแผ่นกรองกับประจุลบจากสารอาจทำให้แรงดันออสโมติกต่ำสุด ที่ผิวเยื่อกรอง จึงส่งผลให้ไอออนสามารถแพร่ผ่านเยื่อกรองได้ง่ายทำให้ที่ค่าพีเอชสูงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของสารแมงกานีสลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Rashdi et al., (2013) ที่ทำการศึกษามลของพีเอชต่อการกำจัดไอออนโลหะหนัก (Cu, Mn, Cd และ Pb) ด้วยนาโนฟิลเตรชัน พบว่า เมื่อเพิ่มค่าพีเอชให้สูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดลดลง โดยที่ค่าการกำจัดแมงกานีสไอออนที่พีเอช 1.50 เท่ากับ 89% ในขณะที่พีเอช 5 ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเหลือ 33% แสดงให้เห็นว่าค่า pH ส่งผลต่อการกำจัดแมงกานีสโดยใช้เมมเบรน NF อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 3 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารแมงกานีส (ก)  $MnCl_2$ , (ข)  $MnSO_4$  และ (ค)  $Mn(NO_3)_2$

### ผลของความแรงประจุ

จากการศึกษาผลของความแรงประจุต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ โดยปรับความแรงประจุเท่ากับ 0.005, 0.01 และ 0.015 M ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) เท่ากับ 10 mg/L ค่าพีเอช 7 และเดินระบบความดันที่ 60 psig ตลอดการทดลอง ภาพที่ 4 แสดงผลของความแรงประจุต่อการลดลงของค่าฟลักซ์สารละลาย ผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์สารละลายทั้ง 3 ชนิด คือ  $MnCl_2$ ,  $MnSO_4$  และ  $Mn(NO_3)_2$  มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความแรงประจุที่สูงขึ้น โดยที่ความแรงประจุ 0.015 M ทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลงมากกว่าความแรงประจุ 0.01 และ 0.005 M ตามลำดับ การเพิ่มความแรงประจุเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือแมงกานีสให้สูงขึ้นทำให้เกิดการสะสมตัวของเกลือแมงกานีส (ประจุบวกของแมงกานีสและประจุลบของคลอไรด์ ซัลเฟต และไนเตรต) บริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง มีผลทำให้แรงดันออสโมติกมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ความดันในการเดินระบบคงที่ตลอดการทดลอง จึงทำให้ผลต่างของแรงดันที่จะเอาชนะแรงดันออสโมซิสที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าน้อยลง ( $\Delta P - \sigma \Delta \pi$ ) จากสมการที่ (1) จึงทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายมีค่าลดลง นอกจากนี้สารอินทรีย์ธรรมชาตีก่ส่งผลต่อความสามารถในการผลิตน้ำหรืออัตราการไหลของการกรองแบบนาโน ซึ่งขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่สามารถติดค้างอยู่บนผิวของเยื่อกรองนาโนทำให้ฟลักซ์สารละลายลดลง

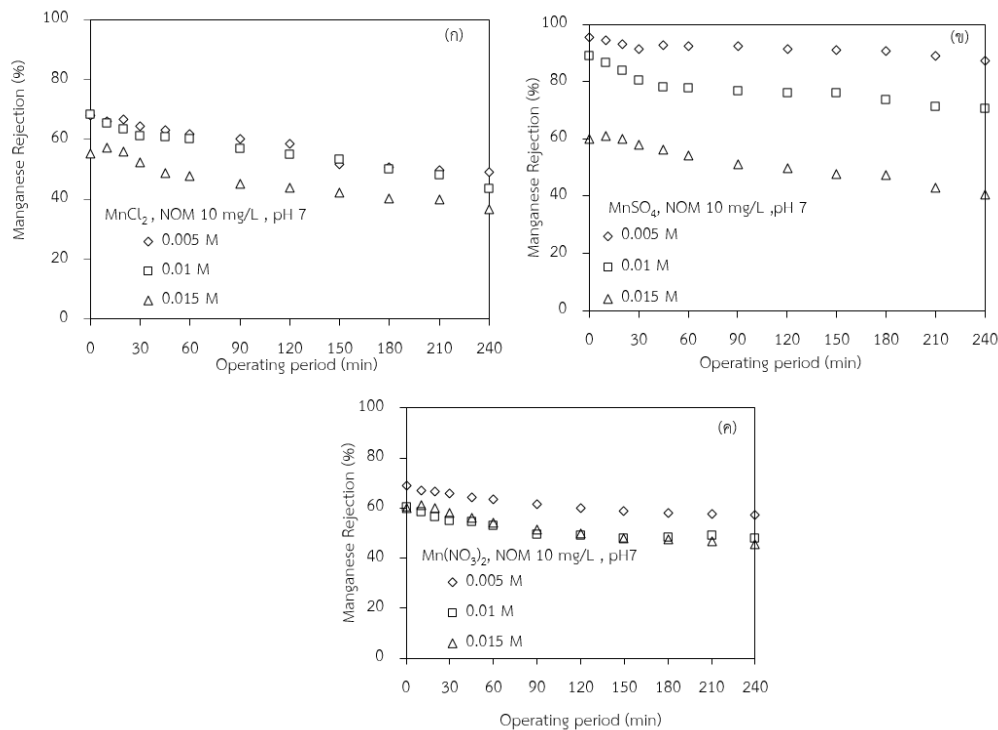


ภาพที่ 4 ผลของความแรงประจุต่อฟลักซ์สารละลาย (ก)  $MnCl_2$ , (ข)  $MnSO_4$  และ (ค)  $Mn(NO_3)_2$

ภาพที่ 5 แสดงผลของความแรงประจุต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารแมงกานีส โดยปรับความแรงประจุเท่ากับ 0.005, 0.01 และ 0.015 M ที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ 10 mg/L ปรับค่าพีเอชเป็น 7 และเดินระบบด้วยความดันคงที่ 60 psig ตลอดการทดลอง จากการทดลองพบว่า ที่ความแรงประจุต่ำสุดเท่ากับ 0.005 M ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารแมงกานีสมากที่สุดเปรียบเทียบกับ 3 ชนิด ( $MnCl_2$ ,  $MnSO_4$  และ  $Mn(NO_3)_2$ ) โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดสารแมงกานีสอยู่ในช่วงร้อยละ 68.09-49.62, 95.67-87.27, 68.86-57.48 ขณะที่การกำจัดของ  $MnSO_4$  (ที่มีประจุสองลบของซัลเฟต) ให้ค่าการกำจัดสูงสุดเมื่อ



เปรียบเทียบกับประจุหนึ่งลบของคลอไรด์และไนเตรต เมื่อเพิ่มความแรงประจุเป็น 0.01 และ 0.015 M ค่าการกำจัดสารแมงกานีสมีค่าลดลง และในขณะเดียวกันค่ากำจัดสารแมงกานีสของเกลือทั้งสามชนิดก็มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการกรอง อาจเป็นผลมาจากเมื่อเพิ่มความแรงประจุสูงขึ้นความสามารถในการกำจัดเกลือแมงกานีสมีค่าลดลง เนื่องจากที่ระดับความแรงประจุสูงจะมีปริมาณเกลือแมงกานีส (ประจุสองบวกของแมงกานีส) ที่เพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้ประจุลบบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองมีค่าที่ลดลงทำให้ลดเกิดการบีบอัด (Double layer) และการลดลงของประจุลบบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองเป็นผลทำให้แรงผลักที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าเยื่อกรองและประจุลบจากเกลือมีค่าที่ลดลงด้วย ส่งผลต่อการสะสมตัวที่บริเวณผิวหน้าเยื่อกรองทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้น ( $C_p$  สูงขึ้น) และส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสที่ลดลงดังแสดงไว้ในสมการที่ (2)



ภาพที่ 5 ผลของความแรงประจุต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารแมงกานีส (ก) 0.005M (ข) 0.01 M และ (ค) 0.015 M

### สรุปผลการวิจัย

ผลของค่าพีเอชต่อค่าฟลักซ์สารละลายและประสิทธิภาพการกำจัดเกลือแมงกานีสด้วยเยื่อกรองนาโน พบว่าการเพิ่มค่าพีเอชจาก 3 ไปพีเอช 7 ทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายและค่าการกำจัดแมงกานีสลดลงในทิศทางเดียวกัน ที่พีเอชเท่ากับ 3 ค่าฟลักซ์สารละลายให้ค่าสูงสุดสำหรับเกลือแมงกานีสทั้ง 3 ชนิด คือ MnCl<sub>2</sub>, MnSO<sub>4</sub> และ Mn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> อยู่ในช่วงร้อยละ 96.16-84.04, 96.13-94.40 และ 94.19-68.36 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของเกลือแมงกานีสพบว่าค่าการกำจัดสารแมงกานีสให้ค่าสูงสุดเกิดขึ้นจากประจุสองลบของซัลเฟต (MnSO<sub>4</sub>) ตามด้วยประจุหนึ่งลบของคลอไรด์ (MnCl<sub>2</sub>) และไนเตรต (Mn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มความแรงประจุจาก 0.005 M ถึง 0.015 M ทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายและประสิทธิภาพการกำจัดสารแมงกานีสลดลง ที่ความแรงประจุเท่ากับ 0.005 M ค่าการกำจัดสารแมงกานีสที่ให้สูงสุดสำหรับเกลือแมงกานีสต่างชนิดกัน (MnCl<sub>2</sub>, MnSO<sub>4</sub> และ Mn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) ซึ่งให้ค่าการกำจัดในช่วงร้อยละ 68.09-49.62, 95.67-87.27, 68.86-57.48 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม





ก็ตามการกำจัดสารแมงกานีสของกลุ่มสารประจุสองลบของซัลเฟตยังให้ค่าการกำจัดที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับประจุหนึ่งลบของคลอไรด์และไนเตรต ตามลำดับและมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลของพีเอช

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือในการทดลอง สถานที่วิจัย ตลอดจนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Al-Rashdi, B. A. M., Johnson, D. J. and Hilal, N. (2013). Removal of heavy metal ions by nanofiltration. *Desalination*, 315, 2-17.
- Conlon, W. and McClellan, S. (1989). Membrane Softening: A Treatment Process Comes of Age. *Journal AWWA*, 81(11), 47-51.
- Contreras, A. E., Kim, A. and Li, Q. (2009). Combined fouling of nanofiltration membranes: mechanisms and effect of organic matter. *Journal of Membrane Science*, 327(1-2), 87-95.
- 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*, Bangkok, Thailand, on April 3-5.
- Qin, J. J., Oo, H. M., Lee, H. and Coniglio, B. (2004). Effect of feed pH on permeate pH and ion rejection under acidic conditions in NF process. *Journal of Membrane Science*. 232(1-2): 153-159.
- Schaep, J., Vandecasteele, C., Peeters, B., Luyten, J., Dotremont, C. and Roels, D. (1999). Characteristics and retention properties of a mesoporous  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  membrane for nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 163(2), 229-237.
- Van der Bruggen, B. and Vandecasteele, C. (2003). Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry. *Environmental pollution*, 122(3), 435-445.