



การใช้ออสโมซิสย้อนกลับสำหรับกำจัดเกลือคลอไรด์ และสารอินทรีย์ธรรมชาติ

Using Reverse Osmosis for Chloride Salts and Natural Organic Matter (NOM) Removal

Supatpong Mattaraj** and Worawut Eamchuphter**

สุพัตน์พงษ์ มัตราจ* และ วรวุฒิ เอี่ยมชูเพชร**

*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

**สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 34190

E-mail : supatpong.mj@gmail.com, worawut2860@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดเกลือคลอไรด์และสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้ออสโมซิสย้อนกลับ ชนิดเกลือคลอไรด์ที่แตกต่าง (ได้แก่ แมกนีเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ โปแตสเซียมคลอไรด์) และสารอินทรีย์ธรรมชาติถูกนำมาทดสอบด้วยออสโมซิสย้อนกลับแบบไหลตามขวาง ความแรงประจุที่ต่างกันที่ 0.01 M และ 0.05 M นำมาทดสอบกับความดันในการดำเนินระบบจาก 20 40 และ 60 psi ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มความแรงประจุทำให้ลดลงของการลดลงของฟลักซ์และการกำจัดเกลือวัดจากค่าการนำไฟฟ้า เนื่องจากการเพิ่มความดันออสโมติกจากความเข้มข้นของเกลือที่ผิวของเยื่อกรอง การเพิ่มความดันของระบบทำให้เพิ่มฟลักซ์สารละลายจากการเพิ่มความดันที่แตกต่างบนผิวของเยื่อกรอง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้การลดลงของฟลักซ์เพิ่มขึ้นโดยความแรงประจุเท่ากันจากการสะสมสารอินทรีย์ธรรมชาติบนผิวเยื่อกรอง การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติวัดโดยค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ให้ค่าการกำจัดสูงมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ การเพิ่มความแรงประจุที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติทำให้ค่าการกำจัดสารอินทรีย์ลดลงเล็กน้อย อาจเนื่องจากการลดของแรงผลักประจุลบระหว่างการจับตัวของประจุบวกของเกลือคลอไรด์กับประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

คำสำคัญ : เกลือคลอไรด์; สารอินทรีย์ธรรมชาติ; ออสโมซิสย้อนกลับ

Abstract

This research was to study the performance of chloride salts and natural organic matter (NOM) removal using reverse osmosis (RO). Different chloride salts (i.e. magnesium chloride, calcium chloride, sodium chloride, potassium chloride) and NOM were tested under crossflow reverse osmosis membrane. Different ionic strengths of 0.01 M and 0.05 M were determined with different operating pressures of 20, 40, and 60 psi. Experimental results revealed that increased ionic strengths caused reductions of solution flux and salt rejection measured from conductivity, due to increased osmotic pressure from salt concentration at the membrane surface. Increased operating pressures increased solution flux, increasing pressure differences across the membrane surface. NOM concentration of 2 mg/L caused a greater flux decline with similar ionic strength, accumulating NOM at the membrane surface. The rejections of natural organic matter measured by $UV_{254\text{ nm}}$ were relatively high more than 95%. Additionally, increased ionic strengths with NOM composition caused a slight reduction in NOM rejection, possibly due to reduced charge repulsion between positively charged chloride salts and negatively charged NOM.

Keywords : Chloride salts; Natural Organic Matter; Reverse osmosis

บทนำ

ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เป็นกระบวนการเมมเบรนที่มีความสามารถในการกักกันโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เกลืออนินทรีย์ และสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ [1] จึงทำให้สารละลายที่ผ่านออกมาได้เป็นน้ำบริสุทธิ์ ปัจจุบันมีการใช้กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับอย่างกว้างขวาง เช่น การผลิตน้ำบริสุทธิ์สำหรับบริโภคตามที่ทุกอาศัยทั่วไป และใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

เกลืออนินทรีย์และสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นเหตุที่สำคัญส่งผลต่อประสิทธิภาพการกรองโดยออสโมซิสย้อนกลับโดยเกิดการอุดตันเยื่อกรองทำให้การผลิตน้ำลดลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้หลายอย่างได้แก่ ความดัน ชนิดสารละลาย ความเข้มข้น พีเอช เป็นต้นการทำวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษากาการใช้ออสโมซิสย้อนกลับสำหรับเกลือคลอไรด์ ได้แก่ แมกนีเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ระบุว่า เป็นสารอนินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก [2] และสำหรับสารอินทรีย์ธรรมชาติมีส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น ไตรฮาโลมีเทน เกิดขึ้นในกระบวนการใช้คลอรีนสำหรับฆ่าเชื้อ (Chlorination process) และยังคงผลทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีในการผลิตน้ำประปา

นอกจากนี้ผลของเกลือคลอไรด์รวมตัวกับสารอินทรีย์ธรรมชาติยังส่งผลต่อการกำจัดของเกลืออนินทรีย์วัดโดยค่าการนำไฟฟ้า และสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยใช้ค่าการดูดกลืนแสง

จุดประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาผลกระทบชนิดของเกลืออนินทรีย์ ความเข้มข้นของเกลืออนินทรีย์และผลร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) รวมถึงสภาวะการเดินระบบซึ่งได้แก่ ความดัน (Pressure) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกรองออสโมซิสย้อนกลับ ค่าการกำจัดของเกลือ ค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ ระหว่างการกรองด้วยกระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ

อุปกรณ์และวิธีการ

เยื่อกรองออสโมซิสย้อนกลับที่ใช้ในการศึกษาวิจัย รุ่น TW2012 – 150GPD (Spiral Wound) โดยใช้ชุดทดลองแบบไหลตามขวาง โดยทำการศึกษาสารคลอไรด์ที่ใช้ $MgCl_2$, $CaCl_2$, $NaCl$, KCl ที่ความแรงประจุ 0.01 M and 0.05 M และสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ได้จากแหล่งน้ำผิวดินภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีโดยใช้ระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis, RO) ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

การดำเนินระบบชุดทดลองล้างระบบด้วยน้ำปราศจากไอออน 30 นาที ก่อนจะทำการดำเนินระบบด้วยสารละลายและวัดค่าอัตราการไหลที่ความดัน 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 psi โดยควบคุมความดันให้คงที่แล้วจับเวลา การวัดค่าการนำไฟฟ้าของเกลืออนินทรีย์ โดยใช้เครื่องวัดค่าสภาพนำไฟฟ้ายี่ห้อ INO LAB รุ่น Cond Level 2 ในกรณีทำการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติจะวัดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติจะใช้เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสงยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV mini 1240 เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

ทฤษฎีสำหรับการกรองของเมมเบรน

กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับมีอัตราการของมวลสารเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลและความเข้มข้นสารละลายเข้าสู่ระบบ (C_p) เมื่อสารละลายผ่านเมมเบรนส่งผลทำให้ความเข้มข้นลดลงต่ำมากโดยปกติจะเรียกว่าเพอร์มิเอท (C_p) ส่วนความเข้มข้นอีกส่วนหนึ่งเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนไม่ผ่านการกรองจะเรียกว่ารีเทนเทท (C_r) ซึ่งสามารถสรุปความเข้มข้นของสารละลายในแต่ละส่วนได้ดังนี้ $C_f > C_p > C_r$ สมการมวลสมดุล ณ สภาวะสมดุลเขียนได้ดังนี้

$$Q_f C_f = Q_p C_p + Q_r C_r \quad (1)$$

โดยที่ Q_f , Q_p , Q_r คืออัตราการไหลเข้า อัตราการซึมผ่าน และอัตราการรีเทนเทท (Q_r) ตามลำดับ มีหน่วยเป็น L/min ความเข้มข้นของสารละลายมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

สมการของ Van't Hoff ใช้คำนวณความดันออสโมติกของสารละลายสำหรับสารละลายเจือจางหรือสารละลายอุดมคติ ซึ่งได้เสนอว่าความดันออสโมติก (Osmotic pressure, π) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของตัวถูกละลาย และอุณหภูมิ สัมบูรณ์ของสารละลาย แต่ไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของเมมเบรนซึ่งคำนวณได้ตามสมการ (2)

$$\pi = CRT \quad (2)$$

ค่า C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L), R คือค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 0.082 L-atm/ (mol.K) T คือ อุณหภูมิ (K)

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั่วไปในการศึกษากระบวนการออสโมซิสย้อนกลับพบว่า ฟลักซ์สารละลาย (Solution Flux, J_v) มีหน่วยเป็น L/(m²-hr) or LMH สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3)

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma\Delta\pi) = \frac{Q_p}{A_m} \quad (3)$$

โดยที่ L_p คือ อัตราการซึมผ่านของเมมเบรนมีหน่วยเป็น (L/(m²-h . kPa)) or LMH/kPa, ΔP คือ ความแตกต่างระหว่างความดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรนมีค่าเท่ากับ $\left[\frac{P_f + P_r}{2} - P_p\right]$ โดยที่ P_f คือ

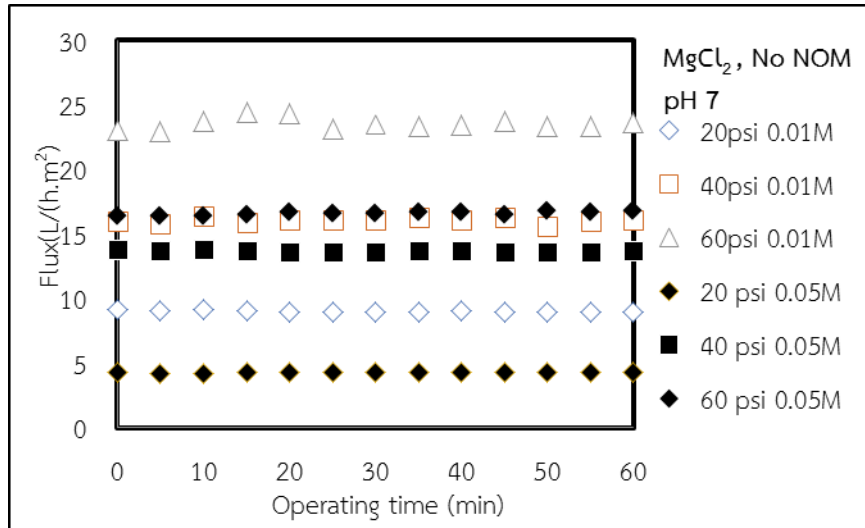
ความดันด้านสารละลายป้อน, P_r คือความดันด้านรีเทนเทท, P_p คือความดันด้านน้ำเพอร์มิเอท มีหน่วยเป็น kPa, σ = คือ Osmotic Reflection Coefficient เป็นค่าประมาณการกำจัดที่ผิวเมมเบรน, $\Delta\pi$ = คือ ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติกของน้ำที่อยู่คนละข้างของเมมเบรน มีหน่วยเป็น kPa, A_m คือ พื้นที่หน้าตัดเมมเบรน มีหน่วยเป็น m²

ร้อยละการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ (Rejection, R_p) โดยการกรองผ่านเมมเบรนจะกักกันสารละลายออกจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$R_p = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (4)$$

ผลการทดลองและวิจารณ์

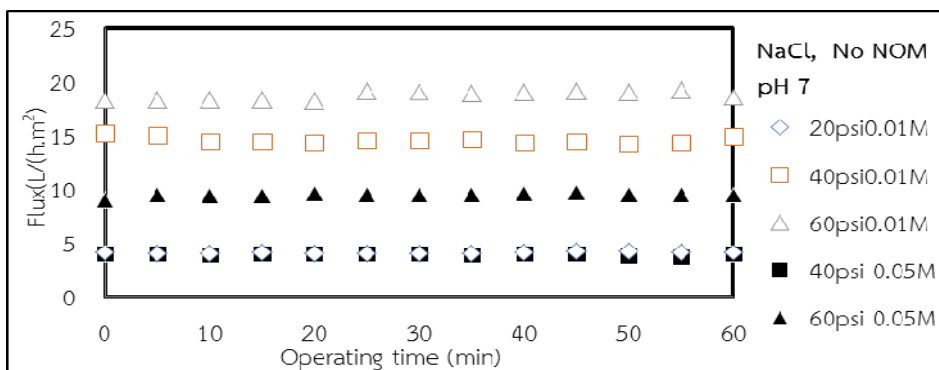
รูปที่ 1 แสดงผลของความดันที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของแมกนีเซียมคลอไรด์ สารละลายเริ่มต้นของสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ที่ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร ที่ความดัน 60 psi มีค่าที่สูงที่สุด โดยสูงกว่าค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นของสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ที่ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตร เนื่องจากการเพิ่มความแรงประจุจะทำให้ตัวทำละลายผ่านเยื่อกรองได้น้อยลง แต่การที่เพิ่มความดันของออสโมซิสย้อนกลับจะเป็นการเพิ่มความเข้มข้นรวม ($\Delta P - \Delta\pi$) และจะทำให้สารละลายผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้น ดังสมการที่ (3)



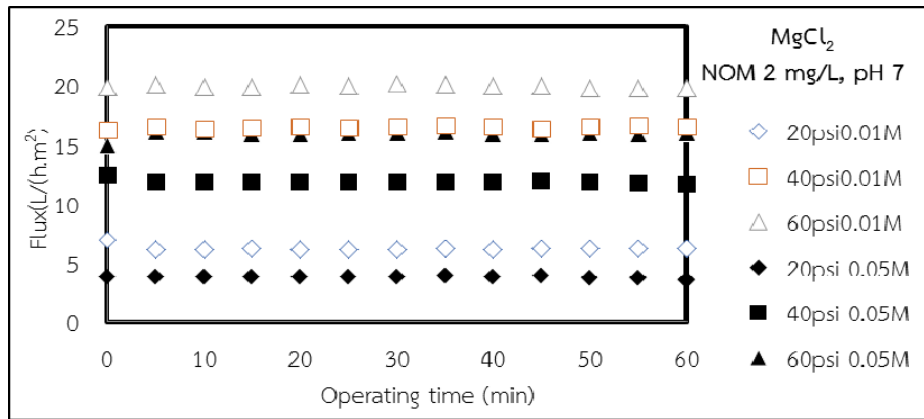
รูปที่ 1 ผลของความดันที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของแมกนีเซียมคลอไรด์

รูปที่ 2 แสดงผลของความดันที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของโซเดียมคลอไรด์ ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร ผลการทดสอบพบว่าที่ความดัน 60 psi ให้ค่าสูงสุด โดยสูงกว่าค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตร ผลการทดสอบแสดงผลในทำนองเดียวกันกับผลของแมกนีเซียมคลอไรด์ อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นความแรงประจุทำให้เพิ่มความดันออสโมติกส่งผลให้ตัวทำละลายผ่านเยื่อกรองได้น้อยลง อย่างไรก็ตามที่ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตร ความดัน 20 psi ไม่ปรากฏค่าฟลักซ์สารละลายอาจเนื่องจากความดันออสโมติก (ประมาณ 35.93 psi) ที่สูงกว่าความดันในการดำเนินระบบทำให้น้ำไม่สามารถไหลผ่านออกจากเยื่อกรอง

รูปที่ 3 แสดงผลของความดันที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของแมกนีเซียมคลอไรด์ที่ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นของสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ที่ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร ที่ความดัน 60 psi ให้ค่าที่สูงสุด โดยสูงกว่าค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นของสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตร อย่างไรก็ตามค่าฟลักซ์สารละลายให้ค่าลดลงจากผลร่วมของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (2 มิลลิกรัมต่อลิตร) อาจเนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติบนเยื่อกรองทำให้เกิดการอุดตันส่งผลทำให้ตัวทำละลายผ่านเยื่อกรองได้น้อยลง



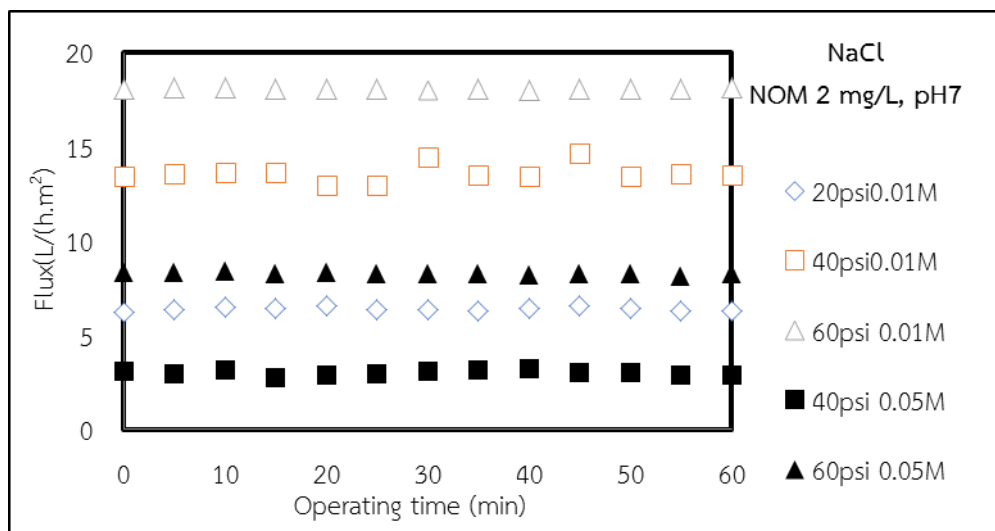
รูปที่ 2 ผลของความดันที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของโซเดียมคลอไรด์



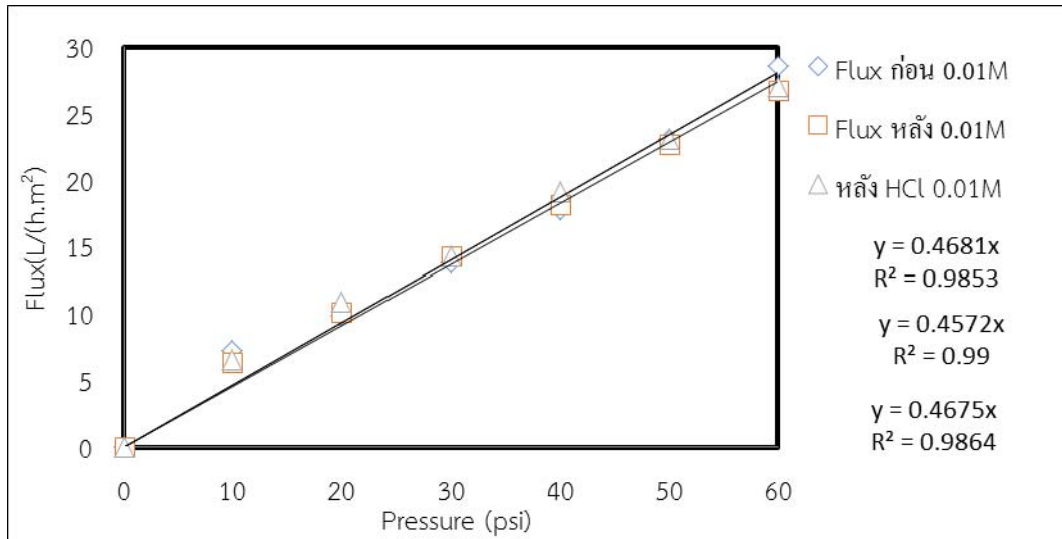
รูปที่ 3 ผลของความดันที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของแมกนีเซียมคลอไรด์ที่ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ

รูปที่ 4 แสดงผลของความดันที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของโซเดียมคลอไรด์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีแนวโน้มสอดคล้องกับความดันที่ใช้ในการดำเนินระบบ ทั้งความแรงประจุต่ำ 0.01 โมลต่อลิตร และที่ความแรงประจุสูง 0.05 โมลต่อลิตร โดยความดันในการดำเนินระบบสูงให้ค่าฟลักซ์สารละลายเริ่มต้นสูง สำหรับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีแนวโน้มทำให้ค่าฟลักซ์สารละลายลดลง เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ระหว่างรูปที่ 2 และรูปที่ 4 เนื่องจากผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติร่วมกับสารอนินทรีย์ส่งผลต่อฟลักซ์สารละลายที่ลดลง

รูปที่ 5 แสดงค่าฟลักซ์ของเมมเบรนก่อนการดำเนินการระบบและหลังจากล้างด้วยน้ำและกรดไฮโดรคลอริก การล้างระบบด้วยน้ำบริสุทธิ์ DI และล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยหาค่าฟลักซ์ของเมมเบรนที่ความดัน 10, 20, 30, 40, 50 และ 60psi การทดสอบพบว่าฟลักซ์ก่อนล้างและหลังล้างด้วยน้ำ DI และกรดไฮโดรคลอริกให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากเกลือคลอไรด์ทำให้เกิดความดันออสโมติกเกิดที่ผิวเยื่อกรองระหว่างการกรอง แต่สามารถล้างออกได้โดยง่ายจากการใช้น้ำ DI และกรดไฮโดรคลอริก ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ของเยื่อกรองก่อนการทดสอบ



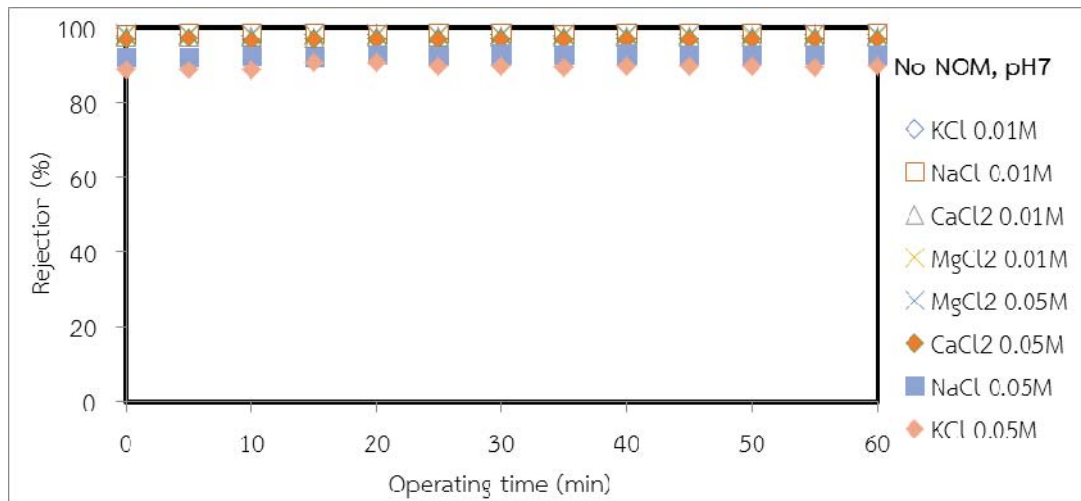
รูปที่ 4 ผลของความดันที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของโซเดียมคลอไรด์ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ



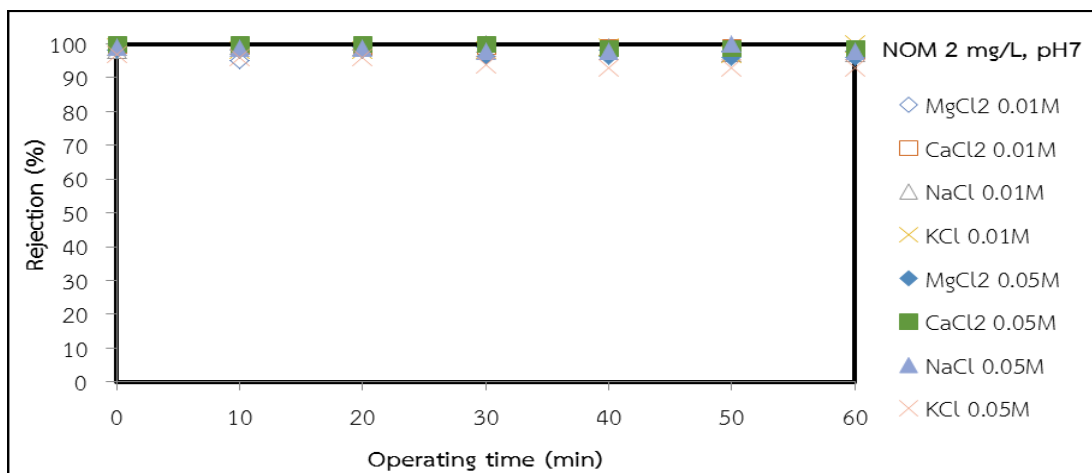
รูปที่ 5 ค่าฟลักซ์ของเมมเบรนก่อนการดำเนินระบบและหลังจากล้างด้วยน้ำและกรดไฮโดรคลอริก

รูปที่ 6 แสดงค่าการกำจัดของเกลือคลอไรด์ พิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า การทดลองพบว่าร้อยละการกำจัดของเกลือคลอไรด์ ที่ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร มีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละดังนี้ $MgCl_2$ (98.09-97.78), $CaCl_2$ (97.77-97.39), $NaCl$ (98.53-98.29), KCl (98.22-97.81) ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าร้อยละการกำจัดสารละลายที่ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตร มีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละดังนี้ $MgCl_2$ (98.43-98.27), $CaCl_2$ (97.21-96.79), $NaCl$ (93.09-92.10), KCl (90.86-88.83) ตามลำดับ ค่าการกำจัดของประจุเดี่ยวโซเดียมกับโปแตสเซียมให้ค่าที่แตกต่างกันมากกับประจุคู่แมกนีเซียมและแคลเซียมระหว่างความแรงประจุต่ำ 0.01 โมลต่อลิตร และที่ความแรงประจุสูง 0.05 โมลต่อลิตร ที่ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตร ค่าการกำจัดให้ค่าน้อยลงอาจเกิดการสะสมความเข้มข้นที่ผิวของเยื่อกรองทำให้ผ่านผิวเยื่อกรองได้มากกว่าที่ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร ส่งผลต่อความเข้มข้นของเกลือผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้นทำให้ร้อยละการกำจัดลดลง

รูปที่ 7 แสดงค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของเกลือคลอไรด์ การทดลองพบว่า ที่ความแรงประจุ 0.01 โมลต่อลิตร มีค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าจากสูงไปต่ำอยู่ในช่วงร้อยละดังนี้ $NaCl$ (99.9-97.6), KCl (99.9-97), $CaCl_2$ (99.66-98.11), $MgCl_2$ (99.03-95.19) ตามลำดับ ที่ความแรงประจุ 0.05 โมลต่อลิตร มีค่าการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละดังนี้ $CaCl_2$ (99.9-98.90), $NaCl$ (99.9-97.84), $MgCl_2$ (98.18-96.11), KCl (95.95-92.87) ตามลำดับ ผลการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติให้ค่าที่สูงอาจเนื่องจากขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีขนาดสูงกว่าเกลือคลอไรด์ และการลดแรงผลักของประจุลบจากการจับตัวของประจุบวกของเกลือคลอไรด์กับประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ขณะที่ความแรงประจุสูงให้ค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติลดลงอาจเนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลหรือขนาดของสารอินทรีย์ธรรมชาติทำให้ผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้น [3]



รูปที่ 6 ค่าการกำจัดของเกลือคลอไรด์พิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า



รูปที่ 7 ค่าการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติของเกลือคลอไรด์

สรุปผล

การใช้โซลิมซีสย้อนกลับสามารถให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเกลือคลอไรด์และสารอินทรีย์ธรรมชาติ การเพิ่มความแรงประจุทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเกลือคลอไรด์ลดลง อาจเนื่องจากการสะสมความเข้มข้นเกลือที่ผิวของเยื่อกรองทำให้สารละลายผ่านเยื่อกรองได้ง่ายขึ้น ขณะที่การเพิ่มความแรงประจุทำให้การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติลดลงอาจเนื่องจากการลดลงของแรงผลักประจุลบโดยการจับตัวของประจุบวกของเกลือคลอไรด์กับประจุลบของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ผลการ

ทดสอบนี้ยังสามารถนำมาซึ่งการประยุกต์ใช้โซลิมซีสย้อนกลับกับน้ำตัวอย่างที่มีองค์ประกอบทั้งเกลืออนินทรีย์อื่นร่วมกับสารอินทรีย์ในน้ำได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ รุ่นพี่ระดับบัณฑิตศึกษาที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mattaraj, S., Phimpha, W., Hongthong, P. and Jiratananon, R. 2010. Effect of Operating Conditions and Solution Chemistry on Model Parameters in Crossflow Reverse Osmosis of Natural Organic Matter. *Desalination*. 253: 38-45.
- [2] Bodzek, M. 2013. Inorganic micropollutants removal by means of membrane processes-state of the art. *Ecological Chemistry and Engineering*. 20(4): 633-658.
- [3] Kilduff, J. E., Mattaraj, S. and Belfort, G. (2004) Flux Decline during Nanofiltration of Naturally-Occurring Dissolved Organic Matter: Effects of Osmotic Pressure, Membrane Permeability, and Cake Formation, *J. Membrane Sci.* 239(1): 39-53.