ITIChE2018
TIChE2018
TIChE
สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย
The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry

T-SEP-O-201-04

การศึกษารูปแบบอุดตันของรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน
Study on Membrane Fouling from Reverse Osmosis Membrane

ทิพย์สุรีย์ กรบุญรักษา[1*], ธนกร วุฒิสอน[2] และ ปุริมปรัชญ์ พวงเข็มวรวธนา [3]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[2]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[3]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

*ติดต่อ E-mail: thipsuree@eng.buu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 094-5365545

บทคัดย่อ

การศึกษาการอุดตันของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน (Reverse Osmosis Membrane, RO Membrane) โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำทิ้ง (Brine) จากการเดินระบบ RO ในกระบวนการผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมที่มีน้ำจืดเป็นแหล่งน้ำดิบ (ต่อไปนี้จะเรียกว่าน้ำประปา) และน้ำทิ้ง (Brine) ทำการเดินระบบ RO Membrane ของตัวอย่างน้ำสองชนิดในระดับห้องปฏิบัติการ และศึกษาผลการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีที่ประกอบด้วยสารละลายด่างผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1% กับ สารละลาย Ethylene Diamine Tetra-Acetic Acid (Na_4EDTA) เข้มข้น 1.0 % ตามด้วยการล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มเข้ม 0.2 % จากผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนของ Cl^- ต่อ TDS สำหรับตัวอย่างน้ำดิบทั้งสองชนิดมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับไอออนชนิดอื่นๆ คือ อยู่ในช่วง 14.24-28.36% และ 65.33-77.54% ตามลำดับ และเมื่อนำตัวอย่างน้ำดิบไปผ่านการเดินระบบด้วย RO Membrane พบว่า อนุภาคของ Cl^- ที่พบในน้ำเพอมิเอท (Permeate) มีค่ามากกว่าอนุภาคชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของ Cl^- ที่มีมากกว่าไอออนชนิดอื่นๆ และขนาด Cl^- ที่มีขนาด 0.000181 μm เมื่อเทียบกับรูพรุนของ RO Membrane ที่มีขนาด 0.0001 μm ทำให้ Cl^- สามารถลอดผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้ เมื่อพิจารณาการสะสมของอนุภาคของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total Dissolved Solids, TDS) บนเมมเบรน พบว่าการสะสมของ TDS สำหรับน้ำประปาในการเดินระบบรอบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 640 mg/L ที่ความต้านทานเมมเบรน 2.11×10^{14} m^{-1} และรอบที่ 2 มีค่า 810 mg/L ที่ความต้านทานเมมเบรน 1.98×10^{14} m^{-1} ตามลำดับ ในขณะที่การสะสมของ TDS สำหรับน้ำทะเลในการเดินระบบรอบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 5,040 mg/L ที่ความต้านทานเมมเบรน 4.11×10^{14} m^{-1} และรอบที่ 2 มีค่า 8,690 mg/L ที่ความต้านทานเมมเบรน 3.78×10^{14} m^{-1} ตามลำดับ ในขณะที่ % Flux Recovery ภายหลังการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีสำหรับการทดลองน้ำประปาและน้ำทะเลมีค่าไม่แตกต่างกัน คือ 82.1% และ 83.0% ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปแบบการอุดตันบนเมมเบรน กรณีของการทดลองน้ำประปาในรอบที่ 1 และรอบที่ 2 พบว่ามีการอุดตันของเมมเบรนแบบ Complete Blocking Model โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8714 และ 0.9822 ตามลำดับ ในกรณีของน้ำทะเลก็มีการอุดตันของเมมเบรนแบบ Complete Blocking Model เช่นเดียวกัน โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9871 และ 0.9704 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การอุดตัน, รีเวอร์สออสโมซิสเมมเบรน, การทำความสะอาด, รูปแบบการอุดตันของเมมเบรน

Abstract

This research was study in membrane fouling from Reverse Osmosis Membrane (RO Membrane) system. Two types of samples were used is this study, hereafter mentioned to brine. First sample was collected from the operation of RO water supply which fresh water feed as raw water to the system, hereafter mentioned to tap water. The second sample was collected from Desalination Plant which sea water feed as raw water, hereafter mentioned to sea water. In this experiment, the RO Membrane Process was operated with two types of water sample in laboratory scale. Study on membrane cleaning was investigated with alkali cleaning method of 0.1% NaOH mixed with 1.0% Na_4EDTA and acid cleaning method of 0.2% HCl. Results found that Cl^-/ TDS ratio for both samples showed the highest value as compared to other ions. It was in the range of 28.36-4.24% and77.54 -65.33 %, respectively. Chloride ion in permeate also showed higher amount than the rest of ions. The reason was Cl^- had the highest amount in sample as mentioned before. Furthermore, the diameter of Cl^- is only 0.000181μm that Cl^- could pass through the pore size of RO Membrane at 0 0001.μm. Accumulation of Total Dissolved Solids (TDS) on RO Membrane impacted to RO membrane resistance. The first experiment of tap water showed the accumulation of TDS at 640 mg/L with membrane resistance of $2.11x10^{14}$ m^{-1} while the second experiment of tap water was 810mg/L with $1.98x10^{14}$ m^{-1}, respectively. In terms of sea water, the first experiment showed the accumulation of TDS at 5, 040mg/L with membrane resistance of $4.11x10^{14}$ m^{-1} while the second experiment of sea water was 8, 690mg/L with $3.78x10^{14}$ m^{-1}, respectively. There was no difference in terms of % flux recovery of both of samples after RO membrane was cleaned. They were 82.1% and 83.0% of tap water and sea water, respectively. The membrane fouling model was complete blocking model for all types of sample. First and second experiments of tap water showed the linearity of graph with R^2 value of 0.8714 and 0.9822, respectively. While, first and second experiments of tap water showed the linearity of graphs with R^2 value of 0.9871 and 0.9704, respectively.

Keywords: Fouling, Reverse Osmosis Membrane, Cleaning, Types of Membrane Fouling

บทนำ

การอุปโภคบริโภคน้ำสะอาดมีความต้องการเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการขยายตัวอย่างต่อเนื่องของภาคอุตสาหกรรม ทำให้ต้องมีกระบวนการผลิตน้ำสะอาดในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสเป็นกระบวนการผลิตน้ำสะอาดที่ใช้ได้ทั้งในระดับครัวเรือนไปจนถึงระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แหล่งน้ำดิบที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO) อาจมาได้จากหลายแหล่ง เช่น น้ำบาดาล น้ำผิวดิน น้ำประปา รวมถึงบริเวณที่ขาดแคลนน้ำสะอาดตามหมู่เกาะต่างๆ ก็สามารถนำน้ำทะเลมาใช้เป็นแหล่งน้ำดิบเพื่อป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำด้วยระบบ RO ได้ ซึ่งในกระบวนการ RO เป็นการใช้แรงดันให้น้ำผ่านเยื่อเมมเบรน (Membrane) โดยที่ระบบมีความสามารถในการกรองอนุภาคได้ละเอียดถึง 0.0001 μm ทำให้สามารถกรองไอออนและโมเลกุลของ

สารละลายที่อยู่ในน้ำ อีกทั้งยังกำจัดสารตกค้างและเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันพบว่าการใช้ระบบรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อเปลี่ยนน้ำทะเลให้เป็นน้ำจืดสามารถทำได้อย่างแพร่หลายทั้งในยุโรป อเมริกา และเอเชีย กรณีน้ำทะเลที่สูบขึ้นมาจากทะเลที่ 1,000 ลิตร เมื่อผ่านการกรองด้วยระบบ RO แล้วจะได้น้ำจืดประมาณ 400 ลิตร ส่วนอีก 600 ลิตร จะเป็นน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นของเกลือมากกว่าปกติเกือบ 2 เท่า โดยน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นของเกลือมากกว่าปกตินั้นส่งผลให้เมมเบรนเกิดการอุดตันหรือการสะสมของอนุภาคบนพื้นที่ผิวการกรองของเมมเบรน ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการใช้งานระบบ RO เมมเบรน ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการลดลงของฟลักซ์ (Flux Decline) และส่งผลให้เกิดการอุดตันหรือฟาวลิ่ง (Fouling) การทำความสะอาดเมมเบรนสามารถด้วยวิธีที่เหมาะสมกับชนิดของการอุดตันบนเมมเบรนจะทำให้สามารถใช้งานเมมเบรนได้อย่างต่อเนื่องยาวนาน วิธีการต่างๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น การใช้สารเคมี การล้างแบบล้างย้อน เป็นต้น กระบวนการทำความสะอาดเมมเบรนที่เหมาะสมจะทำให้เมมเบรนสามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่อง ยาวนาว และได้ปริมาณน้ำที่ผลิตได้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ [1, 2]

ในงานวิจัยนี้จะศึกษารูปแบบการอุดตันของเมมเบรนจากกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสและศึกษาคุณลักษณะการอุดตันโดยการใช้น้ำดิบ จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำทิ้ง (Brine) จากการเดินระบบ RO ที่มีการใช้น้ำจืดเป็นแหล่งน้ำดิบ และน้ำทิ้งจากการเดินระบบ RO ที่มีการใช้น้ำทะเลเป็นแหล่งน้ำดิบ ศึกษาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมี ศึกษารูปแบบการอุดตันบนเมมเบรนผ่านสมการรูปแบบการอุดตันต่างๆ 4 รูปแบบ

วิธีการทดลอง

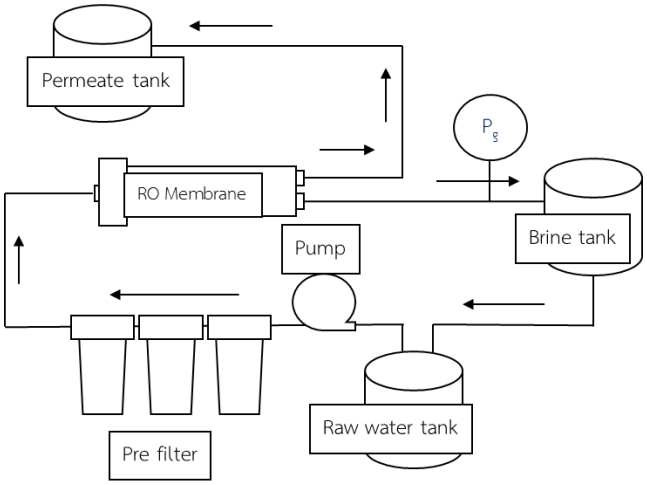
ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

น้ำทิ้ง (Brine) จากการเดินระบบ RO Membrane ในกระบวนการผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมที่มีน้ำจืดเป็นแหล่งน้ำดิบจากบริษัทบริษัท โกลว์ พลังงาน จำกัด (มหาชน) จ.ระยอง

น้ำทิ้ง (Brine) จากการเดินระบบ RO Membrane ในกระบวนการผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้อุปโภคบริโภคที่มีน้ำทะเลเป็นแหล่งน้ำดิบจากเกาะล้าน จ.ชลบุรี ที่มีการเจือจางความเข้มข้นลง 20 เท่า

ระบบการทดลอง

ระบบ RO Membrane แสดงดังรูปที่ 1 โดยน้ำดิบจะไหลผ่านไส้กรอง Pre-Treatment ทำมาจากพอลิโพพิลีน (PP) ขนาด 5, 1, 0.1 μm ตามลำดับ และเพิ่มความดันน้ำด้วยปั๊มแรงดันสูง (High Presser Pump) เพื่อให้น้ำเข้าสู่ไส้กรอง RO Membrane ขนาด 0.0001 μm มีพื้นที่ผิวเมมเบรน (A_m) เท่ากับ 0.315 m^2 และทำมาจากพอลิเอไมด์ (PA) ซึ่งสามารถแยกน้ำออกเป็น 2 ส่วน คือ น้ำเพอมิเอท (Permeate) และน้ำทิ้ง (Brine)



รูปที่ 1 ชุดทดลองระบบ RO Membrane

การวิเคราะห์การอุดตันของเมมเบรน

ค่าฟลักซ์ที่นำมาใช้หาค่าความต้านทานของเมมเบรน คือ ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอท (Permeate flux) โดยหาได้จากสมการที่ 1

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_w . J} \qquad (1)$$

เมื่อ R_m คือ ค่าความต้านทานเมมเบรน (m^{-1})

TMP คือ ความดันผ่านเมมเบรนที่วัดได้ (psi_g)

μ_w คือ ความหนืดของน้ำเพอมิเอท (Pa.s)

J คือ ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอท ($L/hr.m^2$)

การศึกษารูปแบบการอุดตันของเมมเบรน

รูปแบบการอุดตันของเมมเบรน สามารถแสดงถึงลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่ใช้ในการทดลองได้ โดยรูปแบบการอุดตันของเมมเบรนที่ได้ทำการศึกษามีดังนี้

1) Complete Blocking Model เขียนกราฟระหว่าง V/A กับ d(V/A)/dt
2) Intermediate Blocking Model เขียนกราฟระหว่าง เวลา กับ dt/d(V/A)
3) Standard Blocking Model เขียนกราฟระหว่าง เวลา กับ t/(V/A)
4) Cake Filtration Model เขียนกราฟระหว่าง V/A กับ t/(V/A)

ผลการทดลองและวิจารณ์

คุณลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำน้ำดิบจาก 2 แหล่งได้แก่ น้ำทิ้ง (Brine) จากการเดินระบบ RO Membrane ในกระบวนการผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมที่มีน้ำจืดเป็นแหล่งน้ำดิบจากบริษัท โกลว์ พลังงาน จำกัด

(มหาชน) จ.ระยอง และ น้ำทิ้ง (Brine) จากการเดินระบบ RO Membrane คุณลักษณะของตัวอย่างน้ำแต่ละชนิดได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของตัวอย่างน้ำเริ่มต้น

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำประปา ตัวอย่างที่ 1	น้ำประปา ตัวอย่างที่ 2	น้ำทะเล ตัวอย่างที่ 1	น้ำทะเล ตัวอย่างที่ 2
ค่าของแข็งละลายในน้ำ (TDS)	mg/L	550	590	3,740	3,540
ค่าความกระด้างของน้ำ (Hardness)	mg/L	140	140	181	180
ค่าคลอไรด์ไอออน (Cl^-)	mg/L	156	84	2,900	2,450
ค่าแคลเซียมไอออน (Ca^{2+})	mg/L	106	83	103	150
ค่าแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+})	mg/L	22	27	27	35
ค่าซิลิกา (SiO_2)	mg/L	67	61	29	28
ค่าเหล็กไอออน (Fe^{3+})	mg/L	1	1	1	1
ค่า pH	-	8.10	7.97	7.89	8.12

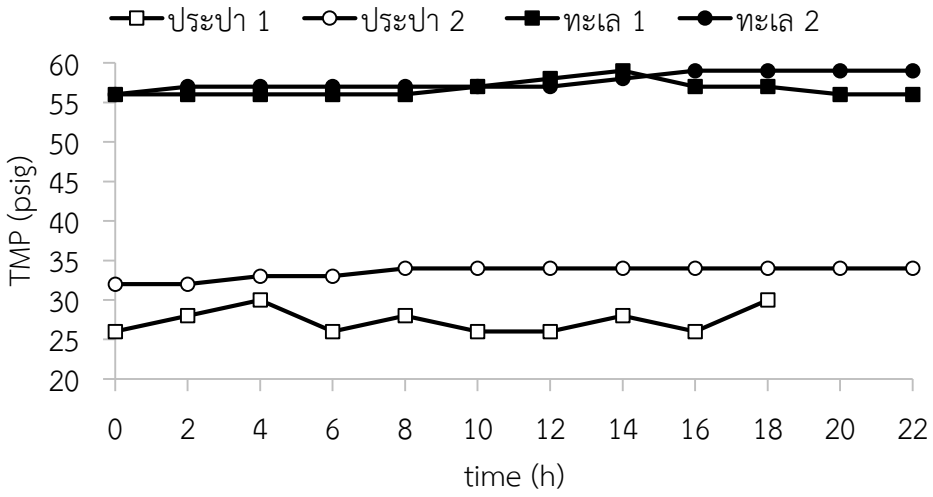
ผลการเดินระบบ RO Membrane

ผลการเดินระบบ RO Membrane ที่มีการวัดค่าความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane Pressure) และค่าฟลักซ์เพอมิเอท (Flux Permeate) ทุก 2 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังนี้

ความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane Pressure, TMP)

เมื่อระบบ RO Membrane มีการปรับความดันผ่านเมมเบรนเริ่มต้นในครั้งแรกของแต่ละการทดลอง และบันทึกความดันผ่านเมมเบรนทุก 2 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาความดันผ่านเมมเบรนตามระยะเวลาการเดินระบบมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 ความดันผ่านเมมเบรนในขณะที่มีการเดินระบบการทดลองน้ำประปาตัวอย่างที่ 1 อยู่ในช่วง 26 ถึง 30 psig ตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วง 32 ถึง 34 psig สำหรับการทดลองน้ำทะเลตัวอย่างที่ 1 อยู่ในช่วง 56 ถึง 59 psig ส่วนตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วง 56 ถึง 59 psig พบว่าความดันผ่านเมมเบรนของการทดลองน้ำประปามีค่าน้อยว่าการทดลองน้ำทะเล และพบว่าการทดลองน้ำประปาตัวอย่างที่ 2 มีความดันผ่านเมมเบรนมากกว่าการทดลองน้ำประปาตัวอย่างที่ 1 เนื่องจากมีการอุดตันของเมมเบรนหลังจากการทำความสะอาดเมมเบรน และมีการปรับความดันเริ่มต้นของการเดินระบบที่มากกว่าน้ำประปาตัวอย่างที่ 1 โดยความดันเริ่มต้นของการทดลองน้ำประปารอบที่ 2 อยู่ที่ 32 psig ในขณะที่ความดันเริ่มต้นของการทดลองน้ำประปารอบที่ 1 อยู่ที่ 26 psig

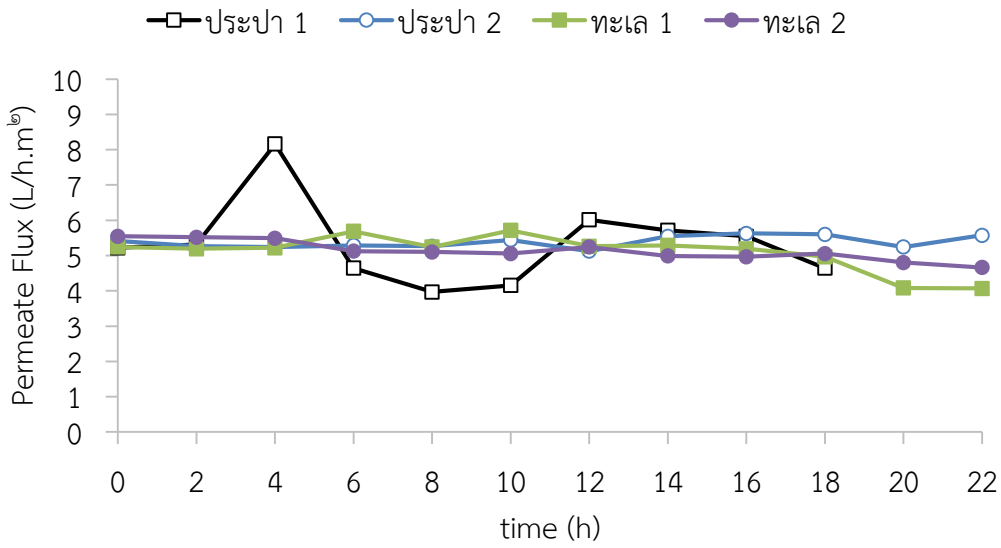


รูปที่ 2 ค่าความดันผ่านเมมเบรนตามระยะเวลา

ค่าฟลักซ์เพอมิเอท (Permeate Flux)

เมื่อระบบ RO Membrane มีการบันทึกอัตราการไหลของน้ำเพอมิเอท เพื่อนำมาหาค่า ฟลักซ์เพอมิเอท ทุก 2 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาความดันผ่านเมมเบรนตามระยะเวลาการเดินระบบมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3

ค่าฟลักซ์เพอมิเอททั้งการทดลองน้ำประปาและน้ำทะเลมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยค่าฟลักซ์ทั้งของการทดลองน้ำประปาตัวอย่างที่ 1 อยู่ในช่วง 3.97 ถึง 8.16 L/h.m^2 ตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วง 5.12 ถึง 5.60 L/h.m^2 สำหรับการทดลองน้ำทะเลตัวอย่างที่ 1 อยู่ในช่วง 4.07 ถึง 5.69 L/h.m^2 ตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วง 4.66 ถึง 5.55 L/h.m^2 แต่ในการทดลองน้ำทะเลต้องปรับความดันผ่านเมมเบรนให้สูงกว่าการทดลองน้ำประปา จึงทำให้ค่าฟลักซ์เพอมิเอทมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากตัวอย่างน้ำทะเลมีความเข้มข้นมากกว่าตัวอย่างน้ำประปาโดยสังเกตได้จากค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) และค่าความกระด้างของน้ำ (Hardness) จากตารางที่ 1 โดยค่าฟลักซ์เพอมิเอทมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการทดลอง เนื่องจากการอุดตันของ เมมเบรนที่เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าฟลักซ์เพอมิเอทลดลงไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก เนื่องจากยังมีการสะสมของอนุภาคบนเมมเบรนหรือภายในรูพรุนเล็กน้อยและยังสามารถเดินระบบต่อไปได้



รูปที่ 3 ค่าฟลักซ์เพอมิเอทตามระยะเวลา

การวิเคราะห์ค่าการอุดตันของเมมเบรน

ในการทดลองได้ทำการทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอทสำหรับ RO Membrane ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเทียบกับค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอทสำหรับเมมเบรนที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยสารเคมีหลังการใช้งาน โดยเก็บข้อมูลค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอทเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและนำมาวิเคราะห์ค่าร้อยละของฟลักซ์กลับคืน (% Flux Recovery) ดังสมการที่ 2 ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2 [3]

$$\% \text{ Flux Recovery} = \frac{J2}{J1} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ J_1 คือ ค่าเพอมิเอทฟลักซ์ของเมมเบรนใหม่

J_2 คือ ค่าเพอมิเอทฟลักซ์ของเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานและทำความสะอาดแล้ว

ตารางที่ 2 ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอทก่อนและหลังเดินระบบและค่าความต้านทานเมมเบรน

การทดลอง	ฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอท ($J/h.m^2$)		% Flux Recovery	ความต้านทานเมมเบรน (m^{-1})	
	เมมเบรนใหม่	เมมเบรนหลังทำความสะอาดด้วยสารเคมี		เมมเบรนใหม่	เมมเบรนหลังทำความสะอาดด้วยสารเคมี
น้ำประปา	8.05	6.61	82.1	1.04×10^{14}	1.18×10^{14}
น้ำทะเล	8.10	6.73	83.0	9.58×10^{13}	1.15×10^{14}

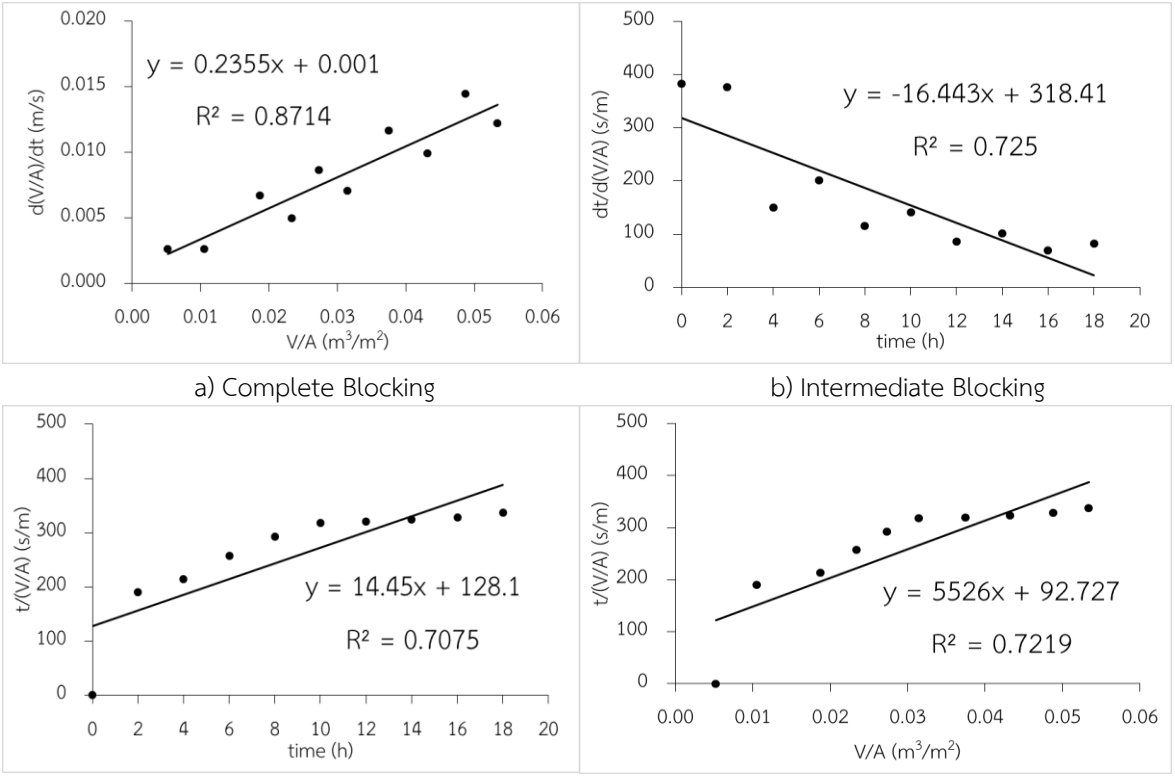
ค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอทของเมมเบรนใหม่ ในการทดลองน้ำประปาและน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 8.05 และ 8.10 $J/h.m^2$ ตามลำดับ และหลังทำความสะอาดเมมเบรนด้วยสารเคมีมีค่าเท่ากับ 6.61 และ 6.73 $J/h.m^2$ ตามลำดับ โดยมีค่า % Flux Recovery เท่ากับ 82.1 และ 83.0 % ตามลำดับ สังเกตได้ว่าค่าฟลักซ์ของน้ำเพอมิเอทของเมมเบรนหลังทำความสะอาดทั้ง 2 การทดลองมีค่าลดลง เนื่องจากเมมเบรนที่ผ่านการใช้งานหรือเดิน

ระบบด้วยน้ำทิ้งจากทั้ง 2 แหล่งมีการอุดตันของอนุภาคของแข็งหรือสารอนินทรีย์ต่างๆ เช่น คลอไรด์ไอออน (Cl^-) จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวในการกรองของ RO Membrane มีค่าลดลง โดยเมมเบรนที่ใช้ในการทดลองทั้งน้ำประปาและน้ำทะเลมีร้อยละของฟลักซ์กลับคืนมากกว่า 80% ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

เมื่อพิจารณาร่วมกับความต้านทานเมมเบรนของเมมเบรนพบว่าความต้านทานเมมเบรนของเมมเบรนใหม่ของการทดลองน้ำประปาและน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ $1.04x10^{14}$ และ $9.58x10^{13}$ m^{-1} ตามลำดับ ส่วนความต้านทานเมมเบรนของเมมเบรนหลังทำความสะอาดมีค่าเท่ากับ $1.18x10^{14}$ และ $1.15x10^{14}$ m^{-1} ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าความต้านทานเมมเบรนของเมมเบรนใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งาน

<u>การศึกษารูปแบบการอุดตันของเมมเบรน</u>

การวิเคราะห์รูปแบบการอุดตันของเมมเบรน [4] ด้วยแบบจำลองต่างๆ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นของช่วงเวลาต่างๆในการทดลอง หากกราฟใดมีค่า R^2 (Linear Regression Coefficient) เข้าใกล้ 1 มากที่สุด หมายความว่าเมมเบรนมีลักษณะการอุดตันเป็นไปตามรูปแบบนั้นๆ โดยแสดงการหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



a) Complete Blocking b) Intermediate Blocking

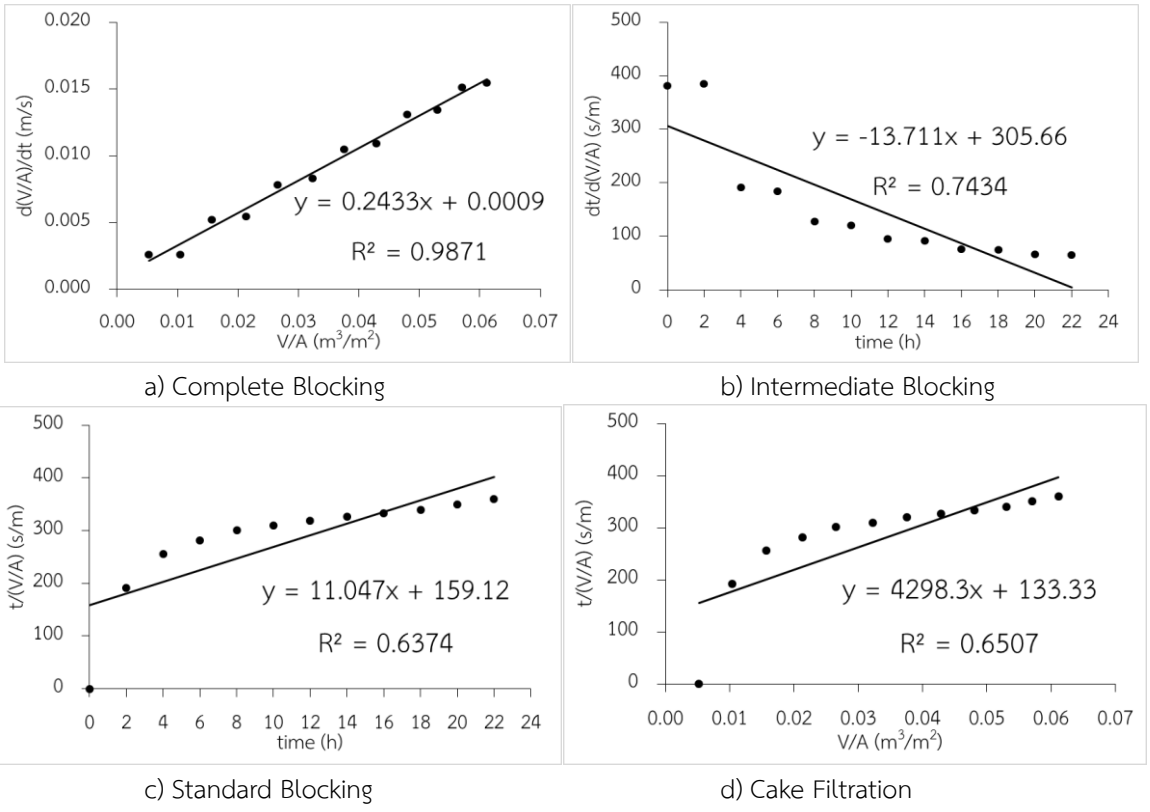
c) Standard Blocking d) Cake Filtration

รูปที่ 4 รูปแบบการอุดตันของเมมเบรนของการทดลองน้ำประปา

จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นตามรูปแบบการอุดตันต่างๆ พบว่าการทดลองน้ำประปาและน้ำทะเล มีรูปแบบการอุดตันใน แบบ Complete Blocking Model โดยมีลักษณะการอุดตันของอนุภาคที่สะสมอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคในตัวอย่างน้ำทั้ง 2 แหล่ง ที่อุดตัน

บนเมมเบรนส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรน โดยมีค่า R^2 ของการทดลองน้ำประปาตัวอย่าง เท่ากับ 0.8714 และค่า R^2 ของการทดลองน้ำทะเลตัวอย่าง เท่ากับ 0.9871

เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคของไอออนต่างๆ มีขนาดอนุภาคดังนี้ Cl^- มีขนาดไอออนเท่ากับ 0.000181 μm Ca^{2+} มีขนาด 0.000099 μm Mg^{2+} มีขนาด 0.000065 μm ส่วนซิลิกามีขนาดอนุภาคเท่ากับ 0.2 μm สำหรับอนุภาคสารชีวภาพ เช่น ไวรัส แบคทีเรีย หรือสารแขวนลอยเช่น ทราย ฝุ่น หรือสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน ไขมัน ทั้ง 3 ประเภทนี้มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของ RO Membrane [4, 5] .



a) Complete Blocking b) Intermediate Blocking

c) Standard Blocking d) Cake Filtration

รูปที่ 5 รูปแบบการอุดตันของเมมเบรนของการทดลองน้ำทะเลตัวอย่าง

สำหรับ RO Membrane ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.0001 μm พบว่าไอออนต่างๆ มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรน สามารถไหลผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้ สำหรับซิลิกา (SiO_2) สารชีวภาพ สารแขวนลอย และสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรน เมื่อพิจารณารูปแบบการอุดตันแบบ Complete Blocking Model อาจสันนิฐานได้ว่า RO Membrane มีการอุดตันเนื่องจาก ซิลิกา สารชีวภาพ สารแขวนลอย และสารอินทรีย์

ดังนั้น การทราบสาเหตุของการอุดตันและรูปแบบการอุดตันจะทำให้สามารถเลือกวิธีการทำความสะอาดเมมเบรนและชนิดของสารเคมีที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งจะส่งผลทำให้สามารถใช้งานเมมเบรนได้อย่างต่อเนื่องยาวนาน และรักษาปริมาณน้ำที่ผลิตได้ใกล้เคียงกับการเดินระบบเมมเบรนใหม่

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองการเดินระบบ RO Membrane ด้วยตัวอย่างน้ำ 2 ชนิดได้ผลการทดลองดังนี้

1. คุณลักษณะของตัวอย่างน้ำทั้ง 2 แหล่ง พบว่าค่าของแข็งที่ละลายในน้ำ (TDS) ของตัวอย่างน้ำประปามีค่าเท่ากับ 550 และ 590 mg/L ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า TDS ของตัวอย่างน้ำทะเลที่มีค่าเท่ากับ 3,740 และ 3,540 mg/L โดยพบว่ามีปริมาณคลอไรด์ไอออน (Cl^-) มากที่สุดทั้งสองตัวอย่างน้ำ โดยสัดส่วนของ Cl^- ต่อ TDS ของตัวอย่างน้ำประปามีค่าเท่ากับ 28.36 และ 14.24 % และสัดส่วนของ Cl^- ต่อ TDS ของตัวอย่างน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 77.54 และ 65.33 % สำหรับค่าความกระด้างของน้ำ (Hardness) ของการทดลองน้ำประปามีค่าเท่ากับ 140 mg/L ทั้งสองการทดลอง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า Hardness ตัวอย่างน้ำทะเลที่มีค่าเท่ากับ 181 และ 180 mg/L

2. ความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane Pressure, TMP) ของตัวอย่างน้ำทั้ง 2 แหล่ง พบว่าค่า TMP ของตัวอย่างน้ำประปาตัวอย่างที่ 1 อยู่ในช่วง 26 ถึง 30 psig ตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วง 32 ถึง 34 psig ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า TMP ของตัวอย่างน้ำทะเลทั้งตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ที่มีค่าอยู่ในช่วง 56 ถึง 59 psig เช่นเดียวกันทั้ง 2 ครั้งการทดลอง ในขณะที่ค่าฟลักซ์เพอมิเอท (Permeate Flux) ของตัวอย่างน้ำทั้ง 2 ชนิด มีค่าฟลักซ์เพอมีเอทใกล้เคียงกัน โดยการทดลองน้ำประปาตัวอย่างที่ 1 อยู่ในช่วง 3.97 ถึง 8.16 $L/h.m^2$ ตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วง 5.12 ถึง 5.60 $L/h.m^2$ สำหรับการทดลองน้ำทะเลตัวอย่างที่ 1 อยู่ในช่วง 4.07 ถึง 5.69 $L/h.m^2$ และตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วง 4.66 ถึง 5.55 $L/h.m^2$

3. รูปแบบการอุดตันของเมมเบรนของทั้งการทดลองน้ำประปาและน้ำทะเลมีรูปแบบการอุดตันของเมมเบรนที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นมากที่สุด คือ แบบ Complete Blocking โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8714 และ 0.9822 ตามลาดับ ในกรณีของน้าทะเลก็มีการอุดตันของเมมเบรนแบบ Complete Blocking Model เช่นเดียวกัน โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9871 และ 0.9704 ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

[1] Zsirai, T., Qiblawey, H., Buzatu P., Al-Marr, M. and Judd S.J. (2018). Cleaning of ceramic membranes for produced water filtration. *J. Petrol Sci Eng.* 166, 283-289.

[2] Moe, M. M. T., George, A. Osamu, N., Shuji, T., Hitoshi, K., Long, D.N. and Takahiro, F. (2017). Membrane fouling, chemical cleaning and separation performance assessment of a chlorine-resistant nanofiltration membrane for water recycling applications. *Sep. Purif. Technol.* 189, 170-175.

[3] ฐปนีย์ ฤทธิไพโรจน์ วิโรจน์ ยูรวงศ์ และพิกุล วณิชาภิชาติ. (2559). ฟลักซ์ การกักกัน และฟาวลิง ระหว่างกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชั่นน้ำตาลโตนดในระดับโรงงานทดลอง. Songklanakarin J. Sci. Technol., 28(4), 817-828.

[4] Pradanos, P. (1997). Flux Decline in Protein. *Microfiltration Influence of Operation Parameter J. Colloid Interf. Science*, .351-344

[5] ทับอุไร สุกลยา. (2554) การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตร้าฟิลเตรชันสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการผลิตน้ำประปา. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.