

การบำบัดน้ำทะเลสำหรับกระบวนการออสโมซิสผันกลับ

รัตนา จิระรัตนานนท์¹ ดุษฎี อุดภาพ² และ ณรงค์ กลั่นเงิน³
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของน้ำทะเลและระบบบำบัดที่มีผลต่อเยื่อแผ่นและสมรรถนะของกระบวนการออสโมซิสผันกลับ ผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบของน้ำทะเลที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเยื่อแผ่น คือ ตะกอนเกลือซัลเฟตและคาร์บอเนต คอลลอยด์ โลหะออกไซด์และจุลินทรีย์ และพบว่าระบบบำบัดที่เหมาะสมต้องประกอบด้วยกรองด้วย Cartridge filter 5 μm การเติมสารเคมี การกรองผ่านเครื่องกรองถ่านและการกรองด้วย Cartridge filter 1 μm ตามลำดับ

เมื่อนำน้ำทะเลที่ไปทดสอบกับระบบออสโมซิสผันกลับ พบว่าน้ำที่ผ่านระบบบำบัดจะให้ค่าฟลักซ์และรีเจคชันสูงกว่าน้ำที่ไม่ผ่านระบบบำบัดและมีอัตราการสะสมที่ผิวของเยื่อแผ่นต่ำกว่าสถานะการทดลอง เช่น เปอร์เซ็นต์ Recovery ความดันและอัตราการไหลมีผลกระทบต่อฟลักซ์และสามารถอธิบายได้ในรูปของ อัตราการสะสมบนผิวเยื่อแผ่นและความต้านทานการไหล ส่วนรีเจคชันไม่ขึ้นกับสถานะการทดลองและมีค่า 98.6-99.0%

การทดลองออสโมซิสผันกลับ โดยใช้สารละลายสังเคราะห์ของโซเดียมคลอไรด์ แมกนีเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟตพบว่า องค์ประกอบที่ส่งผลกระทบต่อเยื่อแผ่นมากที่สุด คือ สารประกอบของเกลือซัลเฟต เนื่องจากทำให้ฟลักซ์มีอัตราการลดลงมากที่สุดคือ ประมาณ 8%

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

³ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

Pretreatment of Seawater for Reverse Osmosis

Ratana Jiratananon ¹ Dudsadee Uttapap ² and Chakun Klun-ngern ³

King Mongkut's University of Technology Thonburi

Abstract

The objective of this work is to study the components in seawater and the pretreatment system which affects the performance of reverse osmosis process. Scales of sulfates and carbonates, colloids, metal oxides and microorganisms were the major components in which removal was necessary. The appropriate pretreatment system for these components should consist of a 5 μm cartridge filter, chemicals dose, activated carbon filter and a 1 μm cartridge filter respectively.

Reverse osmosis of pretreated seawater gave higher flux and salt rejection and low accumulation on the membrane surface compared to untreated seawater. Operating conditions such as recovery (%), pressure and flow rate changed permeation flux and it can be explained by surface accumulation and flow resistances. Salt rejections were independent of operating conditions and were 98.6-99.0 %

Reverse osmosis of synthetic solutions consisting of NaCl, MgCl₂ and CaSO₄ showed that the membrane was most affected by sulfates with the rate of flux decline of approximately 8 %

¹ Associate **professor, Dept. of Chemical** Engineering

² Assistant **professor, School of Bioresources and Technology**

³ Graduate student, **Dept. of Chemical** Engineering

1. บทนำ

กระบวนการแยกเกลือออกจากน้ำทะเลและน้ำกร่อย (Desalination) เพื่อผลิตน้ำดื่มมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการออสโมซิสผันทกลับ (Reverse Osmosis), Multistage Flash Evaporation (MSF), Vapor Compression (VC), Solar Evaporation และกระบวนการ Electrodialysis ในปัจจุบันพบว่ากระบวนการออสโมซิสผันทกลับเป็นที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากใช้พลังงานและเงินทุนในการดำเนินงานต่ำ มีความต้องการพื้นที่ใช้งานและระยะเวลาการประกอบติดตั้งน้อย [1, 2, 3, 4, 5]

ในการนำเอากระบวนการออสโมซิสผันทกลับ (RO) ไปใช้ในการผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเล ปกติแล้วน้ำทะเลที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการออสโมซิส-ผันทกลับ ประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์ความเข้มข้นสูงและองค์ประกอบอื่นที่สามารถทำให้เยื่อแผ่นเกิดการอุดตัน (Fouling) และทำให้ผลผลิตที่ได้ลดลงซึ่งสิ่งอุดตัน (Foulant) หลักๆ ได้แก่ ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) ตะกรันเกลือ (Salt Precipitate) คอลลอยด์ (Colloids) โลหะออกไซด์ (Metal Oxide) และสิ่งมีชีวิตต่างๆ (Biological Matters) ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำทะเล (Pretreatment) ที่เหมาะสมก่อนป้อนเข้าสู่กระบวนการออสโมซิสผันทกลับเพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดกับเยื่อแผ่นได้

การบำบัดน้ำทะเลก่อนป้อนเข้าสู่ระบบออสโมซิสผันทกลับหรือการบำบัดเบื้องต้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การบำบัดเพื่อป้องกันความเสียหายต่อเยื่อแผ่นจากสารเคมี เช่น คลอรีนและ pH และการบำบัดเพื่อป้องกันการอุดตันบนผิวของเยื่อแผ่น เช่น การอุดตันจากตะกรันเกลือ โลหะออกไซด์ และการอุดตันจากสิ่งมีชีวิตต่างๆ องค์ประกอบแต่ละชนิดมีวิธีการบำบัดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

Al-Rqoba et al. [7, 8, 9] ได้รายงานถึง Reverse Osmosis Plant ที่ เมือง Doha ประเทศคูเวต ซึ่งมีกำลังการผลิตน้ำจืด 5000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประกอบด้วยระบบออสโมซิสผันทกลับ 3 หน่วย แต่ละหน่วยใช้เยื่อแผ่นต่างชนิดกันและมีระบบบำบัดซึ่งต่างกันอยู่บ้าง ได้แก่

หน่วยที่ 1 ที่ใช้เยื่อแผ่น Spiral Wound : UOP-PA 1501 และ UOP-PA 8600 ซึ่งประกอบด้วยระบบบำบัดเบื้องต้น คือ การเติมโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพื่อนำเอาคลอรีนตกค้างออกจากน้ำป้อน การกรองผ่าน Activated Carbon เพื่อนำเอาคลอรีนออกได้อย่างสมบูรณ์ การเติมสารต่อต้านตะกรัน (Anti-Scalant) เพื่อป้องกันการเกิดตะกรันของคาร์บอเนต และการกรองผ่าน Cartridge Filter เพื่อกรองเอาอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอนออก ตามลำดับ

หน่วยที่ 2 เป็นระบบออสโมซิสผันทกลับที่ใช้เยื่อแผ่น Hollow Fine Fiber : Dupont B10 และ Dupont B9 ซึ่งประกอบด้วยระบบบำบัดเบื้องต้นคือ การเติมกรดเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันของคาร์บอเนต การเติมโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte Dosing) การโคแอกกูเลชันเพื่อลด Silt Density Index (SDI) ให้น้อยกว่า 3.0 และการกรองผ่าน Cartridge Filter เพื่อกรองเอาอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอนออก ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ระบบบำบัดที่ใช้สำหรับป้องกันการอุดตันบนเยื่อแผ่นออสโมซิสผันทกลับ [6]

ชนิดของสารที่ทำให้เกิดการอุดตัน	วิธีการบำบัดเบื้องต้น
ของแข็งแขวนลอยและอนุภาคต่าง ๆ	ใช้ตะแกรงหยาบ ใช้ไฮโดรไซโคลอน ใช้ Cartridge Filters ใช้เครื่องกรองแบบหลายชั้นกรอง
คอลลอยด์	Coagulation / Flocculation / Filtration อัลตราฟิลเตรชัน
การก่อตัวของตะกรันเกลือ	การเติมกรด / สารต่อต้านตะกรัน การทำน้ำอ่อน
โลหะออกไซด์	ใช้การทำความสะอาดโดยกรด เลือกวัสดุที่เหมาะสม
การอุดตันจากเชื้อจุลินทรีย์	การเติมคลอรีน การเติมโอโซน การเติมคอปเปอร์ซัลเฟต
การอุดตันจากสารอินทรีย์	Coagulation followed by Filtration การดูดซับโดยคาร์บอน การออกซิเดชันโดยสารเคมี อัลตราฟิลเตรชัน/ไมโครฟิลเตรชัน

หน่วยที่ 3 เป็นระบบออสโมซิสผันทกลับที่ใช้เยื่อแผ่น Plate & Frame : Enro-Schleicher & Schuell+FilmTec และเยื่อแผ่น Spiral Wound : Hydronautics 8040B ซึ่งประกอบด้วยระบบบำบัดเบื้องต้น คือการเติมกรดเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันของคาร์บอนเต การเติมสารต่อต้านตะกรันเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันของซัลเฟต การเติมโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์เพื่อนำคลอรีนตกค้างออกจากน้ำป้อน และการกรองผ่าน Cartridge Filter เพื่อกรองอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 25 ไมครอนออกตามลำดับ

บริษัท Dow Chemical [10] ผู้ผลิตเยื่อแผ่นภายใต้ชื่อสินค้า Filmtec ได้ทำการทดสอบตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิและความเข้มข้นของน้ำทะเลสังเคราะห์ ที่มีผลกระทบต่อเพอเมอเทฟลักซ์และรีเจคชัน โดยใช้เยื่อแผ่น FT30 (Thin Film Composite RO Membrane) พบว่า เมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ค่าเพอเมอเทฟลักซ์และรีเจคชันสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลทำให้เพอเมอเทฟลักซ์สูงขึ้น แต่รีเจคชันจะมีค่าลดลง ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำทะเลสังเคราะห์จะมีผลทำให้เพอเมอเทฟลักซ์และรีเจคชันลดลง ตามลำดับ

Fountoukidis, Maroulis และ Marinou-Kouris [11] ศึกษาการเกิดการอุดตันของแคลเซียมซัลเฟตบนเยื่อแผ่นออสโมซิสผันกลับ จากปรากฏการณ์การตกตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถทำนายค่าฟลักซ์ และการสะสมของแคลเซียมซัลเฟตบนเยื่อแผ่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาได้ จากสมมติฐานที่ตั้งไว้ คือ 1) อัตราการสะสมของตะกอนเป็นสัดส่วนกับการเบี่ยงเบนจากสภาวะสมดุล และ 2) ความสามารถในการไหลผ่านเยื่อแผ่น (Membrane Permeability) ลดลงเป็นสัดส่วนกับการสะสมของแคลเซียมซัลเฟต แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลถูกต้องเป็นที่น่าพอใจเมื่อเทียบการทดลองจริง โดยอยู่ในรูปแบบจำลองโพลีโนเมียล ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความดันและอุณหภูมิ

เนื่องจากมีการนำเอากระบวนการออสโมซิสผันกลับไปใช้ในการทำน้ำดื่มจากน้ำทะเลอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ ส่วนประเทศไทยมีการใช้กระบวนการออสโมซิสผันกลับสำหรับการผลิตน้ำสะอาดจากน้ำกร่อย น้ำบาดาล ตลอดจนน้ำประปาเพื่อใช้สำหรับกระบวนการต่างๆ แต่ยังไม่มีการประยุกต์ใช้กับน้ำทะเล งานวิจัยนี้เสนอผลการศึกษาระบบการบำบัดเบื้องต้นที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำทะเลในประเทศไทย ตลอดจนศึกษาผลของการบำบัดและไม่บำบัดต่อสมรรถนะของกระบวนการ ซึ่งจะได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้กระบวนการออสโมซิสผันกลับในการผลิตน้ำสะอาดในประเทศไทยต่อไป

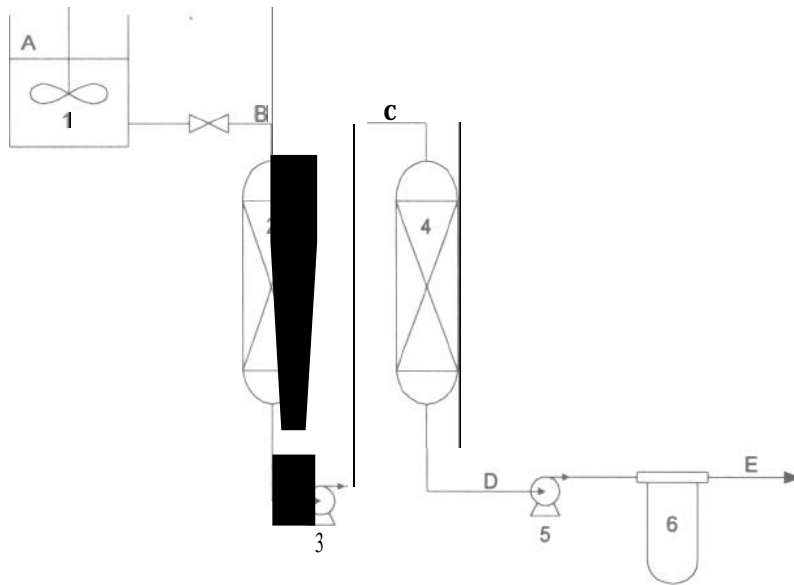
2. วัตถุประสงค์

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของน้ำทะเลที่มีผลต่อสมรรถนะของเยื่อแผ่นออสโมซิสผันกลับ ศึกษาและเปรียบเทียบระบบบำบัดน้ำทะเลที่เหมาะสมก่อนนำเข้าสู่กระบวนการออสโมซิสผันกลับ และทดสอบน้ำทะเลที่ผ่านระบบบำบัดเบื้องต้นด้วยเยื่อแผ่นออสโมซิสผันกลับ แล้วประเมินสมรรถนะของกระบวนการ

3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง

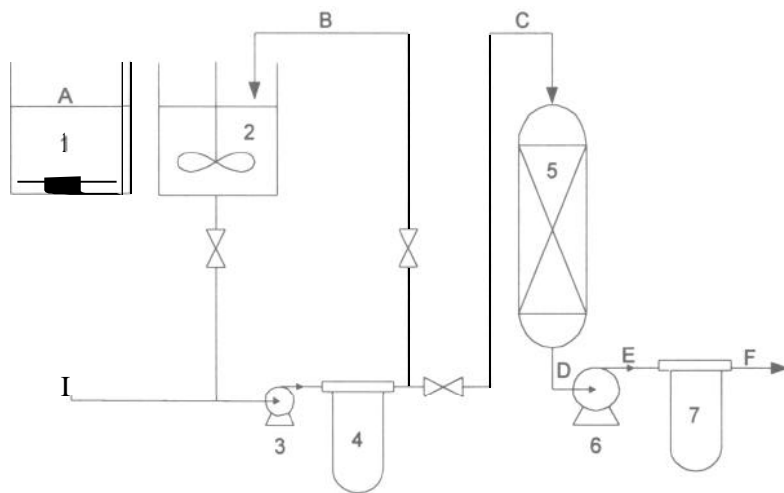
3.1 อุปกรณ์

ระบบบำบัดเบื้องต้นที่ได้ศึกษามี 3 ระบบ ดังรูปที่ 1-3 การเลือกหน่วยย่อยต่างๆ ในระบบบำบัดพิจารณาจากข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำทะเลและใช้หลักการว่าควรมีหน่วยบำบัดน้อยที่สุด หรือเท่าที่จำเป็นและได้สรุปไว้ในตารางที่ 2



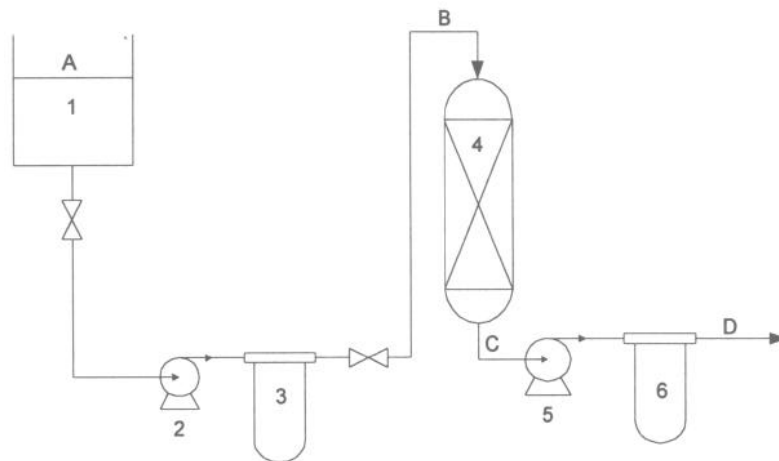
รูปที่ 1 ระบบบำบัดน้ำทะเลเบื้องต้นวิธีที่ 1

1. ถังกวน 2. เครื่องกรองแบบสามชั้นกรอง (กรวด, ทราย และถ่าน) 3. ปั๊มลอยโซ่ง
4. เครื่องกรองถ่าน 5. ปั๊มลอยโซ่ง 6. Cartridge Filter 5 μm



รูปที่ 2 ระบบบำบัดน้ำทะเลเบื้องต้นวิธีที่ 2

1. ถังป้อน 2. ถังกวน 3. ปั๊มลอยโซ่ง 4. Cartridge Filter 5 μm
5. เครื่องกรองถ่าน 6. ปั๊มลอยโซ่ง 7. Cartridge Filter 1 μm



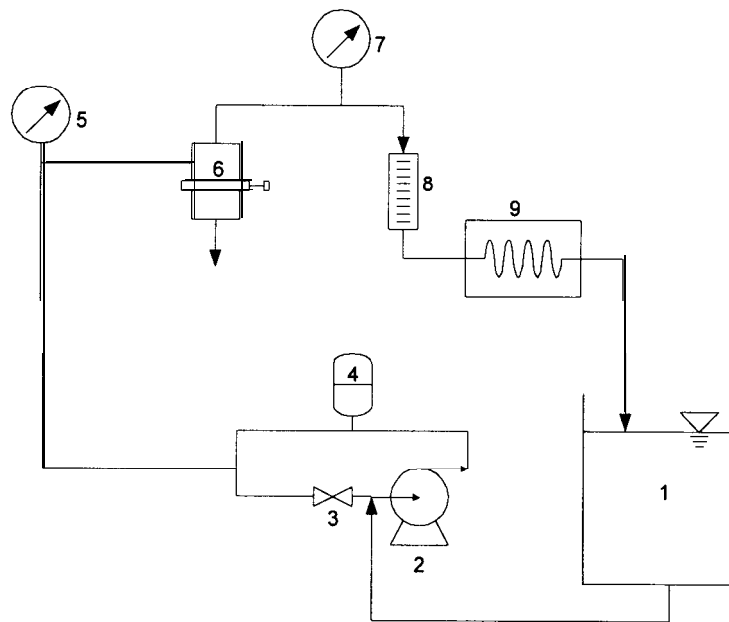
รูปที่ 3 ระบบบำบัดน้ำทะเลเบื้องต้นวิธีที่ 3

1. ถังกวน 2. ปั๊มทอยโซ่ง 3. Cartridge Filter 5 μm
4. เครื่องกรองถ่าน 5. ปั๊มทอยโซ่ง 6. Cartridge Filter 1 μm

ตารางที่ 2 วัตถุประสงค์ของการบำบัดแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอนการบำบัด	ระบบบำบัดเบื้องต้น			จุดมุ่งหมาย
	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3	
การเติมโคแอกกูแลนต์ (ในถังกวน) 1. สารส้ม 2. เฟอร์ริกคลอไรด์ 3. เฟอร์รัสซัลเฟต สารส้มให้ผลดีกว่าอีก 2 ชนิด	✓	✗	✗	ใช้ในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและคอลลอยด์ โดยการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และทำให้คอลลอยด์รวมตัวกันเป็นฟlocs ง่ายต่อการกรอง
การเติมสารเคมี (ในถังกวน) 1. กรดซัลฟูริก 2. โซเดียมไฮโปคลอไรต์ 3. โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต 4. โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (ใส่ทั้ง 4 ชนิด)	✗	✓	✗	1. ปรับ pH และป้องกันการเกิดตะกอนของเกลือคาร์บอเนต 2.ฆ่าเชื้อโรค 3. ป้องกันการเกิดตะกอนของเกลือซัลเฟต 4. ทำลายคลอรีน
เครื่องกรองถ่าน	✓	✓	✓	ดูดซับคลอรีน
เครื่องกรองแบบสามชั้นกรอง เครื่องกรอง Cartridge 5 μm เครื่องกรอง Cartridge 1 μm	✓ ✓ ✗	✗ ✓ ✓	✗ ✓ ✓	ใช้สำหรับกรองอนุภาคแขวนลอยและคอลลอยด์ เช่น ตะกอนดิน

ระบบออสโมซิสผันทกลับ เป็นอุปกรณ์ของบริษัท Schleicher Schull สามารถให้ความดันสูงถึง 1.57×10^4 kPa ประกอบด้วยเซลล์ออสโมซิสผันทกลับซึ่งบรรจุเยื่อแผ่นขนาดพื้นที่ 20 cm^2 ดังรูปที่ 4 ซึ่งมีลักษณะการทำงาน คือ บั้มความดันสูง (2) บ้อนตัวอย่างจากถังบ้อน (1) ผ่านเกจความดันขาเข้า (5) ก่อนเข้าสู่เซลล์ออสโมซิสผันทกลับซึ่งบรรจุเยื่อแผ่น (6) รีเทนเตตจะไหลผ่านเกจความดันขาออก (7) ก่อนจะไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล (8) และเข้าสู่ถังบ้อนต่อไป ส่วนเพอมีเอทที่ผ่านเยื่อแผ่นจะไหลออกทางท่อเพอมีเอท แล้วนำไปซึ่งน้ำหนักเก็บรวบรวมไว้เพื่อวิเคราะห์ การปรับอัตราการไหลของสารบ้อนและการปรับความดันในการบ้อนทำได้โดยการปรับ By-Pass Valve (3) เยื่อแผ่นที่ใช้เป็นแบบ composite ผลิตจาก polyamide มีความทนทานต่อคลอรีนจำกัด ($< 0.05 \text{ ppm}$) และได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Toray Industries ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 4 ระบบออสโมซิสผันทกลับ

1. ถังบ้อน 2. บั้มความดันสูง 3. วาล์ว By-Pass 4. Pulsation Damper 5. เกจความดันขาเข้า
6. RO Test Cell 7. เกจความดันขาออก 8. มาตรวัดอัตราการไหล 9. เครื่องระบายความร้อน

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำทะเล

วิเคราะห์หาค่า pH ความเป็นนำไฟฟ้า ความขุ่น ความเป็นด่าง ความกระด้าง ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS) โซเดียม แมกนีเซียม แคลเซียมคลอไรด์ ซัลเฟต คลอรีน ซิลิกาและแบคทีเรีย ของน้ำทะเลจาก 3 แหล่ง คือ สัตหีบ บางแสน และพัทยา

3.2.2 วิธีการบำบัดเบื้องต้น

นำน้ำทะเลมาศึกษากระบวนการบำบัดเบื้องต้น โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระบบบำบัดเบื้องต้น 3 ระบบ

3.2.3 การแยกเกลือจากน้ำทะเลโดยออสโมซิสผันกลับ

โดยศึกษาผลของสภาวะการทำงานที่มีต่อเพอเมอเมทริกซ์ อัตราการสะสมบนผิวเยื่อแผ่น และรีเจคชัน โดยทดลองที่ %Recovery ที่ 50, 70 และ 90 % ความดัน 4000, 5000 และ 6000 kPa และที่อัตราการไหล 4, 5 และ 6 LPM (ลิตร/นาที)

3.2.4 การศึกษาองค์ประกอบที่มีผลต่อสมรรถนะของเยื่อแผ่นโดยการใช้สารละลายสังเคราะห์

ทำการศึกษาโดยใช้สารละลายสังเคราะห์โซเดียมคลอไรด์ แมกนีเซียมซัลเฟต แคลเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นเท่ากับน้ำทะเลที่ผ่านระบบบำบัดเบื้องต้น คือ 0.2485, 0.0220 และ 0.0112 mol/l ตามลำดับ และสารละลายผสมของสารละลายทั้ง 3 ชนิดข้างต้น

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำทะเล

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบขององค์ประกอบของน้ำทะเลในประเทศไทยกับประเทศซาอุดีอาระเบีย

องค์ประกอบ	น้ำทะเลประเทศไทย			น้ำทะเลประเทศซาอุดีอาระเบีย [15]	
	สัตหีบ	บางแสน	พัทยา	Al-Birk Plant	Umm Lujj Plant
pH	8.57	7.73	7.34	8.0	8.2
ความขุ่น (NTU)	2.3	41.58	3.3	0.250	0.3
ความนำไฟฟ้า (ms/cm)	32.0	32.6	36.0	60.0	59.0
ความเป็นด่างในรูป HCO_3^- (ppm)	106	116	116	124	128
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ppm)	3581	29590	33260	-	-
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (ppm)	33420	28440	32250	39000	37890
ความกระด้างในรูป CaCO_3 (ppm)	5600	4900	5550	7700	7894
โซเดียม (ppm)	9793	7561	12777	12126	13957
แมกนีเซียม (ppm)	1277	996	832	1591	1598
แคลเซียม (ppm)	357	304	543	473	526
คลอไรด์ (ppm)	10144	8234	10055	22400	22941
ซัลเฟต (ppm)	3268	1862	2180	2250	2874
ซิลิกา (ppm)	0.63	1.41	2.73	0.1	
คลอรีน (ppm)	0	0.3	0.321		
แบคทีเรีย (coloni /cm ³)	8600	14000	2560		

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบน้ำทะเลในประเทศไทยเปรียบเทียบกับน้ำทะเลประเทศซาอุดีอาระเบีย ความแตกต่างที่ค่อนข้างชัดเจนได้แก่ ความขุ่นและน้ำทะเลในแถบประเทศซาอุดีอาระเบียมีความเค็มสูงกว่า สังเกตจากค่าความนำไฟฟ้า หรือปริมาณเกลืออนินทรีย์หรือของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ดังนั้นการบำบัดต้องระวังการเกิดตะกอนอย่างมาก ขณะที่น้ำทะเลจาก 3 แหล่งของประเทศไทยต้องเน้นการกำจัดสารแขวนลอย ของแข็งทั้งหมด และแบคทีเรีย

4.2 ระบบบำบัดที่เหมาะสม

จากการทดสอบพบว่า ระบบบำบัดที่ 2 ให้สมรรถนะในการบำบัดดีกว่าอีก 2 ระบบ โดยพิจารณาจากความสามารถในการลดองค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ คือ ความขุ่น ความเป็นด่าง และแบคทีเรีย เป็นต้น (ดูตัวอย่างจากตารางที่ 4) แต่ถ้าพิจารณาด้านปฏิบัติการระบบที่ 3 เป็นระบบบำบัดที่ง่ายที่สุด

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของน้ำทะเลล้นที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

องค์ประกอบ	น้ำดิบ	น้ำที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น		
		วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3
pH	8.57	7.25	7.37	7.46
ความขุ่น (NTU)	2.3	0.34	0.45	1.28
ความนำไฟฟ้า (ms/cm)	32.0	35.0	32.7	34.5
ความเป็นด่างในรูป HCO_3^- (ppm)	106	96	54	86
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ppm)	35810	32870	31480	31517
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (ppm)	33420	32033	30957	31024
ความกระด้างในรูป CaCO_3 (ppm)	5600	5000	5300	5400
โซเดียม (ppm)	9793	10070	8101	8505
แมกนีเซียม (ppm)	1277	1486	1101	1185
แคลเซียม (ppm)	357	437	320	410
คลอไรด์ (ppm)	10144	9783	8889	9520
ซัลเฟต (ppm)	3268	3018	3123	3031
ซิลิกา (ppm)	0.63	1.61	3.26	3.63
คลอรีน (ppm)	0	0	0	0
แบคทีเรีย (coloni/cm ³)	8600	9000	2000	11300

4.3 ผลของสภาวะการทำงานต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์ อัตราการสะสมบนผิวหน้าของเยื่อแผ่นและรีเจกชัน

4.3.1 ผลของ %Recovery

รูปที่ 5 แสดงผลของเพอมีเอทฟลักซ์ที่ %Recovery ต่างๆ เห็นได้ว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม %Recovery เนื่องจากว่าการเพิ่ม %Recovery เป็นการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเพอมีเอทต่อปริมาตรของน้ำป้อน หรือกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มความเข้มข้นด้านน้ำป้อน จึงเป็นการเพิ่มความดันออสโมติก ($\Delta\pi$) [12] เมื่อความดันออสโมติกสูงขึ้น ในขณะที่ความดันในการป้อน (ΔP) คงที่ ทำให้ความดันที่เป็นแรงขับเคลื่อน ($\Delta P - \Delta\pi$) ลดลง เพอมีเอทฟลักซ์จึงลดลง ตามสมการที่ 1

$$J_1 = \frac{\bar{P}_1(\Delta P - \Delta\pi)}{T_m} \quad (1)$$

เมื่อ J_1 = ฟลักซ์ของตัวทำละลาย

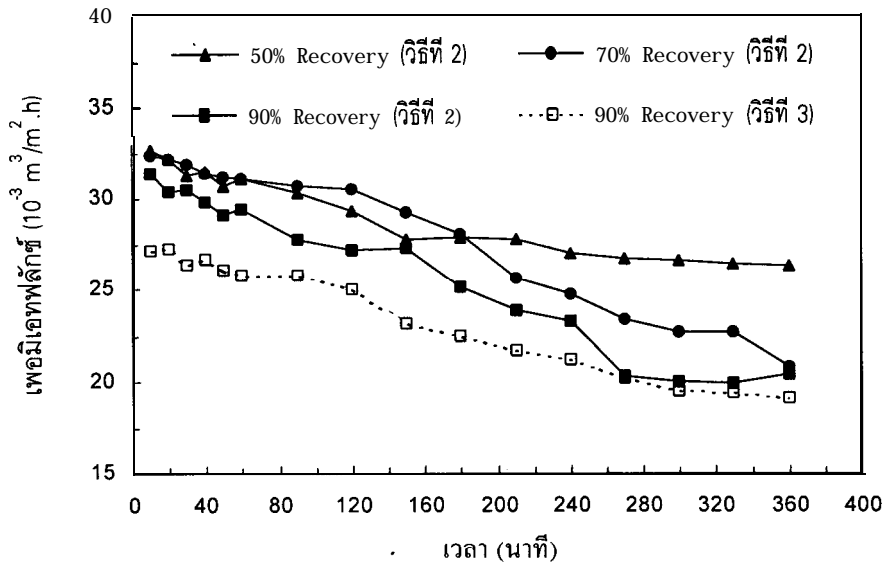
\bar{P}_1 = ค่าจำเพาะของเยื่อแผ่นที่ยอมให้ตัวทำละลายซึมผ่านไปได้

T_m = ความหนาของเยื่อแผ่น

ΔP = ความแตกต่างของความดันระหว่างผิวหน้าทั้งสองของเยื่อแผ่น

$\Delta\pi$ = ความแตกต่างของความดันออสโมติกระหว่างสารละลายสองด้านของเยื่อแผ่น

และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือที่ความเข้มข้น หรือ %Recovery สูง สามารถเกิด Concentration Polarization (CP) ได้เร็วหรือมีการสะสมของโมเลกุลบนผิวเยื่อแผ่นสูง และเมื่อทำการเปรียบเทียบเพอมีเอทฟลักซ์ของน้ำทะเลที่ผ่านระบบบำบัดวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ที่ 90 %Recovery พบว่า เพอมีเอทฟลักซ์ของน้ำทะเลที่ผ่านระบบบำบัดวิธีที่ 2 สูงกว่าเพอมีเอทฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านระบบบำบัดวิธีที่ 3 จึงเป็นการยืนยันความเหมาะสมของระบบบำบัดที่ 2



รูปที่ 5 เอมิเอทฟลักซ์ของน้ำทะเลที่หีบที่ %Recovery ต่างๆ
สภาวะการทดลอง : ความดัน 5000 kPa, อัตราการไหล 5 LPM, อุณหภูมิ 30 °C

นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่ม % Recovery ทำให้รีเจคชันลดลงเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 0.5%) (คำนวณค่ารีเจคชันจากค่าความนำไฟฟ้า)

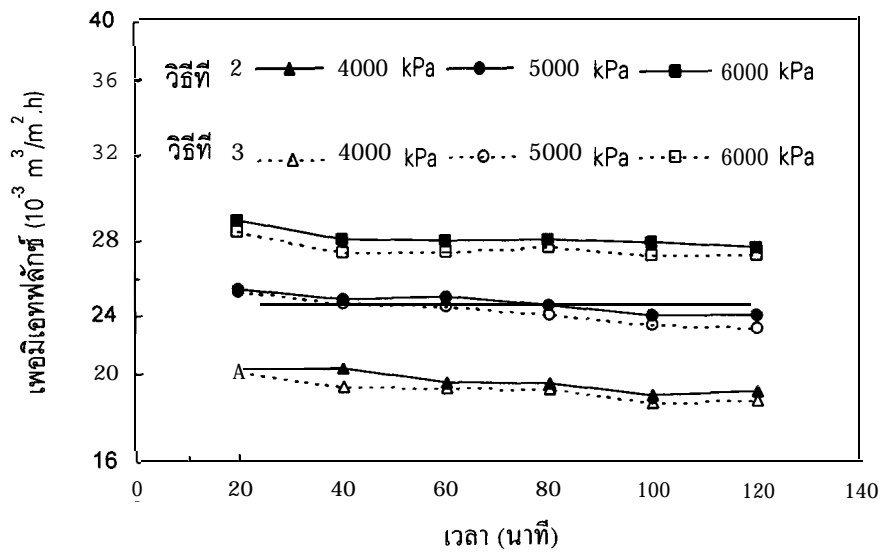
$$\% \text{ รีเจคชัน} = \left(1 - \frac{C_p}{C_b} \right) \times 100 \tag{2}$$

C_b = ความเข้มข้นของรีเทนเทด

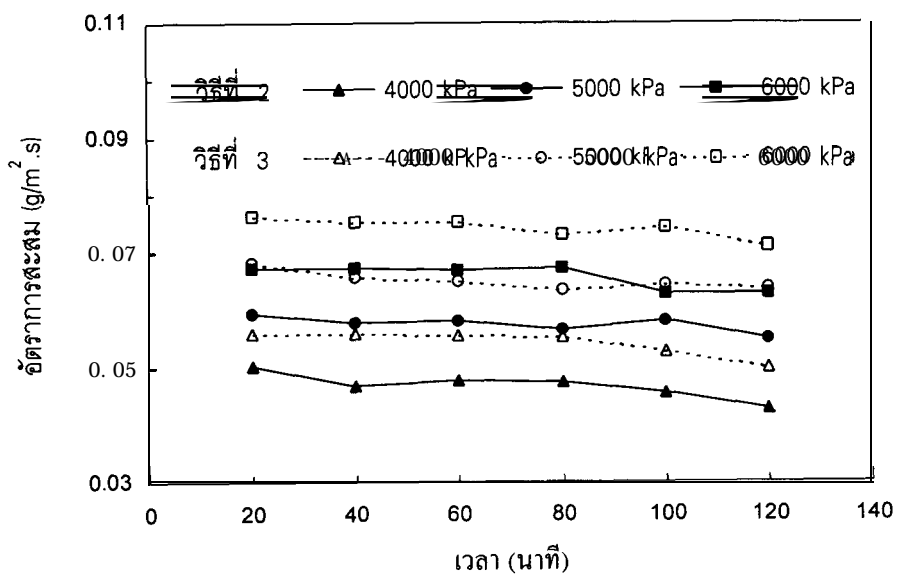
C_p = ความเข้มข้นของเอมิเอท

4.3.2 ผลของความดัน

รูปที่ 6 แสดงผลของเอมิเอทฟลักซ์ของน้ำทะเลที่หีบที่ความดันต่างๆ ผ่านระบบบำบัดเบื้องต้นวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ซึ่งจะลดลงเล็กน้อยเทียบกับเวลาเอมิเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 4000, 5000 และ 6000 kPa ตามลำดับ เพราะการเพิ่มความดันจะเป็นการเพิ่มแรงขับดันให้ตัวทำละลายผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นได้มากขึ้นตามสมการที่ 1 ขณะเดียวกันตัวถูกละลายก็ถูกพามาสูผิวของเยื่อแผ่นได้มากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 7 ซึ่งแสดงอัตราการสะสมของโซเดียมบนผิวเยื่อแผ่นของน้ำทะเลที่หีบที่ความดันต่างๆ ลดลงกับเวลาและเพิ่มขึ้นกับความดัน เอมิเอทฟลักซ์และรีเจคชันของน้ำทะเลที่ผ่านระบบบำบัดวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ต่างกันเพียงเล็กน้อย



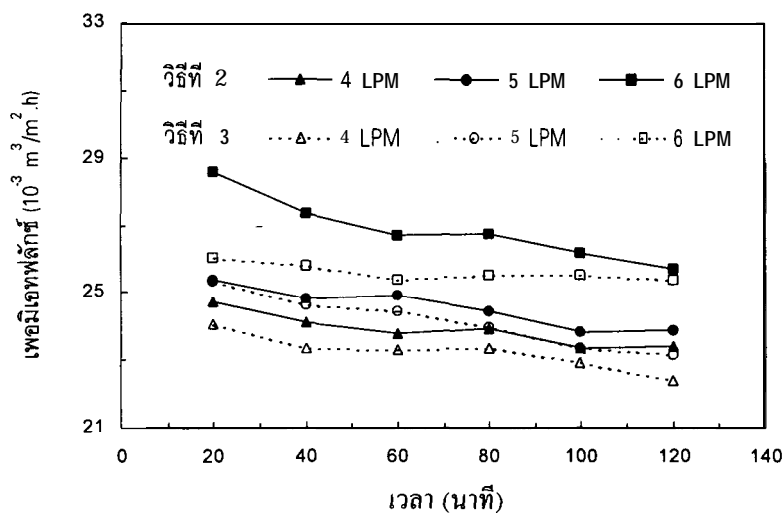
รูปที่ 6 เพอเมอทิฟลิกซ์ของน้ำทะเลที่ความดันต่างๆ สภาวะการทดลอง : อัตราการไหล 5 LPM, อุณหภูมิ 30 °C



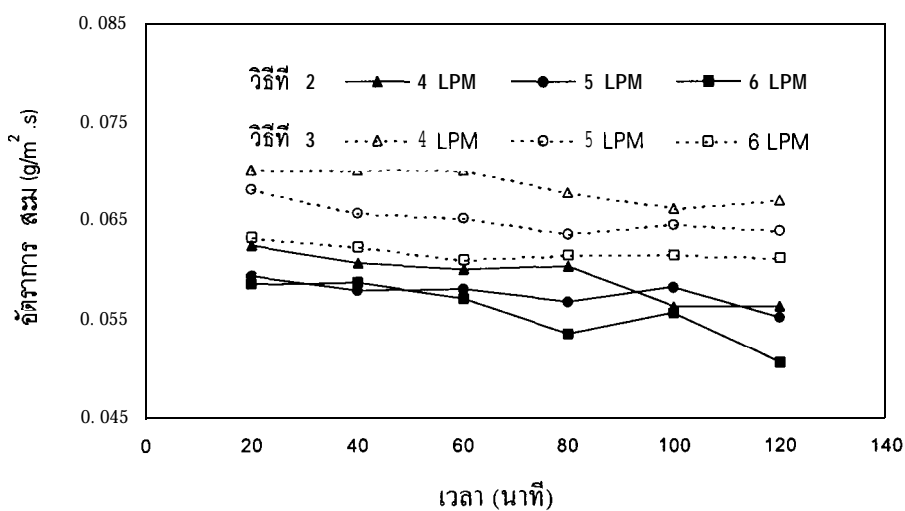
รูปที่ 7 อัตราการสะสมของโซเดียมบนผิวเยื่อแผ่นของน้ำทะเลที่ความดันต่างๆ สภาวะการทดลอง : อัตราการไหล 5 LPM, อุณหภูมิ 30 °C

4.3.3 ผลของอัตราการไหล

รูปที่ 8 แสดงเพอมีเอทฟลักซ์ของน้ำทะเลพื้ที่อัตรการไหลต่าง ๆ ผ่านระบบบำบัดเบื้องต้นวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ซึ่งจะลดลงกับเวลา และเพิ่มขึ้นเมื่ออัตรการไหลเพิ่มขึ้นจาก 4, 5 และ 6 LPM ในขณะที่รูป 9 อัตรการสะสมของโซเดียมบนผิวเยื่อแผ่นที่อัตรการไหลต่าง ๆ (ผ่านระบบบำบัดเบื้องต้นวิธีที่ 2 และ 3) ซึ่งลดลงกับเวลาเช่นกัน เมื่ออัตรการไหลเพิ่มขึ้น อัตรการสะสมของโซเดียมลดลง เพราะการเพิ่มอัตรการไหลจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงขึ้น (มี turbulence มากขึ้น) [12] ตัวถูกละลายที่ถูกกักไว้ที่ผิวของเยื่อแผ่นจึงแพร่กลับเข้าสู่ Bulk ได้ดีขึ้น ความต้านทานเนื่องจากการเกิด CP และ Fouling จึงลดลง



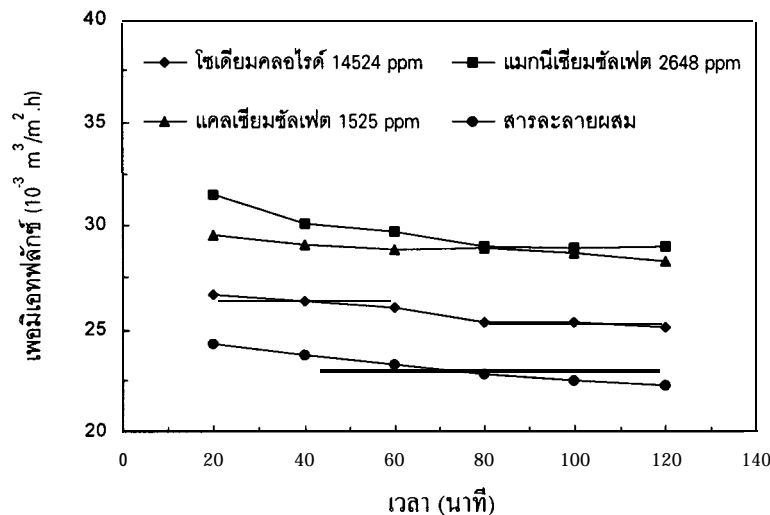
รูปที่ 8 เพอมีเอทฟลักซ์ของน้ำทะเลพื้ที่อัตรการไหลต่าง ๆ สภาวะการทดลอง : ความดัน 5000 kPa, อุณหภูมิ 30 °C



รูปที่ 9 อัตรการสะสมของโซเดียมบนผิวเยื่อแผ่นของน้ำทะเลพื้ที่อัตรการไหลต่าง ๆ สภาวะการทดลอง : ความดัน 5000 kPa, อุณหภูมิ 30 °C

4.4 การใช้สารละลายสังเคราะห์เพื่อทดสอบฟลักซ์และการสะสมบนเยื่อแผ่น

จากรูปที่ 10 แสดงผลของเพอมีเอทฟลักซ์ของสารละลายต่างๆ ที่แรงขับดัน 3750 kPa และอัตราการไหล 5 LPM เห็นได้ว่าเพอมีเอทฟลักซ์มีแนวโน้มลดลงและสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจะมีค่าเพอมีเอทฟลักซ์ต่ำ เนื่องจากว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจะสามารถเกิด CP ได้เร็วและมีการสะสมของโมเลกุลบนผิวเยื่อแผ่นสูงกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ เมื่อเปรียบเทียบที่เวลา 120 นาที จะสังเกตเห็นว่าอัตราการลดลงของเพอมีเอทฟลักซ์ของสารละลายแต่ละตัวจะไม่เท่ากัน คือสารละลายผสมจะมีอัตราการลดลง 8.29% ในขณะที่สารละลาย โซเดียมคลอไรด์ แมกนีเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟต มีอัตราการลดลง 5.88, 8.06 และ 4.00% ตามลำดับ แสดงว่าองค์ประกอบแต่ละตัวส่งผลกระทบต่อเยื่อแผ่นไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) ของเกลือคลอไรด์และเกลือซัลเฟตพบว่า เกลือคลอไรด์มีค่าคงที่ของการละลายสูงกว่าเกลือซัลเฟต [14] โอกาสในการตกตะกอนจึงมีต่ำกว่า ดังนั้นจึงทำให้การอุดตันบนผิวเยื่อแผ่นเกิดขึ้นได้น้อย อัตราการลดลงของเพอมีเอทฟลักซ์จึงน้อยกว่าของเกลือซัลเฟต



รูปที่ 10 ผลของเพอมีเอทฟลักซ์ของสารละลายต่างๆ ที่แรงขับดัน 3750 kPa และอัตราการไหล 5 LPM

5. สรุป

ระบบบำบัดน้ำทะเลเบื้องต้นที่เหมาะสมกับน้ำทะเลประเทศไทยประกอบด้วย Cartridge Filter 5 μm , ถังเติมสารเคมี (กรดซัลฟูริก โซเดียมไฮโปคลอไรด์ โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต), เครื่องกรองถ่านและ Cartridge Filter 1 μm

ในการแยกน้ำที่ผ่านระบบบำบัดเบื้องต้นด้วยเยื่อแผ่น RO พบว่าการเพิ่ม %Recovery ทำให้เพอมีเอทฟลักซ์ที่ได้ต่ำลง เนื่องจากที่ %Recovery สูง สามารถเกิด CP ได้เร็วและมีการสะสมของโมเลกุลบนผิวเยื่อแผ่นสูงกว่าที่ %Recovery ต่ำ การเพิ่มความดันจะทำให้เพอมีเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มแรงขับดัน ($\Delta P - \Delta \pi$) ให้ตัวทำละลายผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่น

ได้มากขึ้นและจะทำให้ตัวถูกละลายถูกพามาสู่วิวของเยื่อแผ่นได้มากขึ้นด้วย การเพิ่มอัตราการไหล ทำให้เพอมีเอทพลักซ์เพิ่มขึ้น เพราะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกกักไว้ที่ผิวของเยื่อแผ่นจึงแพร่กลับเข้าสู่ Bulk ได้ดีขึ้น ยังเป็นการเพิ่มแรงเฉือนลดการสะสมของตัวถูกละลาย

และในทุกๆ กรณีที่ศึกษาพบว่า การเปลี่ยนตัวแปรในการดำเนินการไม่มีผลต่อรีเจคชัน และค่ารีเจคชันอยู่ระหว่าง 98.6-99% โดยทั่วไปเยื่อแผ่นที่ใช้สำหรับแยกเกลือจากน้ำทะเลที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจะมีค่ารีเจคชันสูงกว่า 99.5% สำหรับเยื่อแผ่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากห้องวิจัยของบริษัท Toray Industries เมื่อนำไปใช้แยกเกลือจากน้ำกร่อย (ของแข็งละลายได้ทั้งหมด ~2000 ppm) จะได้ค่ารีเจคชันสูงกว่า คือ 99.2-99.7%

เอกสารอ้างอิง

1. Sackinger, C., 1982, "Energy Advantages of Reverse Osmosis in Seawater Desalination," *Desalination*, Vol. 40, No. 1, p. 271.
2. Glueckstern, P. and Kantor, Y., 1983, "Seawater vs. Brackish Water Desalting : Technology, Operating Problems and Overall Economics," *Desalination*, Vol. 44, No. 1, p. 5 1.
3. Soo - Hoo, R., Awerbuch, L., Mattson, M. and Kremen, S., 1983, "Parametric Study on Seawater Reverse Osmosis Desalting Plants," *Desalination*, Vol. 46, No. 1, p. 3.
4. Akashah, S., Abdel-Jawad, M., Abdelhalim, M. and Dahdah, J., 1987, "Cost Economic Analysis of Doha Reverse Osmosis Plant (Kuwait)," *Desalination*, Vol. 64, Nos. 1/2/3, p. 65.
5. Darwish, M., 1987, "Critical Comparison between Energy Consumption in Large Capacity Reverse Osmosis (RO) and Multistage Flash (MSF) Seawater Desalting Plants," *Desalination*, Vol. 63, No. 1, pp. 143-161.
6. Winston HO W.S. and Kamallesh, K.S. (Eds.), 1992, *Membrane Handbook*, New York, Van Nostrand Reinhold, pp. 265-311.
7. Al-Rqoba, H., Abdel-Jawad, M., Qamhiyah, Z. and Aly, G., 1978, "Optimization of Chemical Pretreatment for Reverse Osmosis (RO) Seawater Desalination," *Desalination*, Vol. 66, Nos. 1/2/3, pp. 423-430.
8. Ebrahim, S. and Malik, M., 1987, "Pretreatment of Surface Seawater Feed at DROP," *Desalination*, Vol. 63, No. 1, pp. 95-107.

9. Grigolit, J. and Schottler, B., 1987, "Experience on the Operation of the Corn-mon Pretreatment at DROP," *Desalination*, Vol. 63, No. 1, pp. 209-215.
10. The Dow Chemical Company, 1993, "Introduction to Reverse Osmosis : Membrane Specifications," ***Technical manual of FILMTEC FT30 membrane elements***, p. 150
11. Fountoukidis, E., Maroulis, Z.B. and Marinos-Kouris, D., 1989, "Modeling of Calcium Sulfate Fouling of Reverse Osmosis Membrane," *Desalination*, Vol. 72, No. 3, pp. 293-318.
12. จุริรัตน์ พุดตาลเล็ก, 2529, การศึกษาการนำน้ำทิ้งจากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง มาทำให้เข้มข้นโดยกระบวนการออสโมซิสผันกลับเพื่อใช้เป็นอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 28-36.
13. ทบวงมหาวิทยาลัย, 2531, *เคมีเล่ม 1*, สำนักพิมพ์อักษรเจริญทัศน์, หน้า 439-452.