



การปรับปรุงประสิทธิภาพแผ่นเยื่อเลือกเซลล์โลหะซีเตต
เพื่อปรับสภาพน้ำเค็ม

โดย

นางสาวนิตยา ตันเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การปรับปรุงประสิทธิภาพแผ่นเยื่อเลือกเซลล์โลหะซีเตต
เพื่อปรับสภาพน้ำเค็ม

โดย

นางสาวนิตยา ตันเจริญ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



IMPROVEMRNT OF CA MEMBRANE FOR DESALINATION
OF SEAWATER

BY

MISS NITTAYA TANCHAROEN



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER DEGREE OF ENGINEERING
CHEMICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวนิตยา ตันเจริญ

เรื่อง

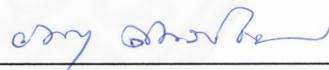
การปรับปรุงประสิทธิภาพแผ่นเยื่อเลือกเซลล์โลสอะซิเตตเพื่อปรับสภาพน้ำเค็ม

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 11 สิงหาคม พ.ศ. 2559

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



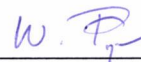
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ดำนวนิชกุล)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



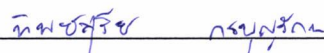
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพบุษย์ เอกแสงศรี)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



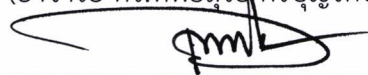
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณิ์ แพ่งจันทิก)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อาจารย์ ดร.ทิพย์สุรีย์ กรบุญรักษา)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ประภัสสร วังศกาญจน์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงประสิทธิภาพแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดเพื่อปรับสภาพน้ำเค็ม
ชื่อผู้เขียน	นางสาวนิตยา ตันเจริญ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพบุษย์ เอกแสงศรี
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการนำน้ำทะเล หรือน้ำเค็มมาเปลี่ยนเป็นน้ำจืดมากขึ้น เพื่อตอบสนองปัญหาการขาดแคลนการใช้น้ำจืด ด้วยกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับที่ใช้แผ่นเยื่อเลือกเป็นตัวเลือกผ่านในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาใน 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกและการนำแผ่นเยื่อเลือกสังเคราะห์ไปใช้กับกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ ในส่วนแรกนั้นได้ทำการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกชนิดเซลลูโลสอะซิเตด (CA) ด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase Inversion) โดยใช้อะซิโตนและน้ำเป็นตัวทำละลาย และปรับปรุงประสิทธิภาพแผ่นเยื่อเลือกชนิดเซลลูโลสอะซิเตด (CA) โดยใช้ Ethylene Glycol (EG) และ Polyethylene Glycol (PEG) เป็นสารเติมแต่งที่มีสัดส่วนตั้งแต่ 0-9%wt ที่ช่วงอุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ต่างกัน 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิสูง (20-23 องศาเซลเซียส) และช่วงอุณหภูมิต่ำ (5-7 องศาเซลเซียส) จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้ตามสูตรต่างๆ พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้นั้นมีความหนาประมาณ 90-150 ไมโครเมตร จากการวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ค่าความเป็นรูพรุน (Porosity) และค่าการกักเก็บน้ำ (Water Content) พบว่าการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกที่อุณหภูมิสูงกว่าจะให้ค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำมากกว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ และการใช้ EG เป็นสารเติมแต่งจะให้ค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำมากกว่าการใช้ PEG เป็นสารเติมแต่ง จะเห็นได้ว่าแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงและมีการใช้ EG เป็นสารเติมแต่ง มีโครงสร้างภายในที่มีความพรุนมากที่สุด และให้ค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำมากที่สุดเช่นกัน โดยเฉพาะแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดที่มีสัดส่วนของสารเติมแต่ง EG ที่สูงถึง 9%wt จะให้ค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 92.30%

และ 74.66% ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยในส่วนที่สองจึงเลือกใช้แผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพด้วย EG เป็นสารเติมแต่ง และทำการสังเคราะห์ที่ช่วงอุณหภูมิสูง และนำไปทำการศึกษาประสิทธิภาพในการนำไปใช้แยกเกลือจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.5%wt เพื่อวิเคราะห์หาค่าฟลักซ์ของน้ำ (Water Flux) และค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (Salt Rejection) พบว่า แผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่ไม่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพมีค่าฟลักซ์น้อยกว่าแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพด้วย EG และค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเติมแต่ง EG ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่มีสัดส่วนของสารเติมแต่ง EG 6%wt จะมีประสิทธิภาพในการแยกดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แผ่นเยื่อเลือกสูตรอื่นๆ โดยมีค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นและค่าฟลักซ์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0.9336 และ $0.5310 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มสัดส่วนของสารเติมแต่ง โดยในสัดส่วนสารเติมแต่ง 9%wt จะให้ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือถึง 14.29% นอกจากนี้เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นในช่วง 2.0-3.5%wt กลับพบว่าค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นลดลง โดยจะให้ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือสูงถึง 30.00% เมื่อใช้สารละลายเริ่มต้นที่มีความเข้มข้น 2%wt

คำสำคัญ: แผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตต, กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ, น้ำเค็ม, โซเดียมคลอไรด์, ประสิทธิภาพในการแยกเกลือ

Thesis Title	IMPROVEMENT OF CA MEMBRANE FOR DESALINATION OF SEAWATER
Author	Miss Nittaya Tancharoen
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Chemical Engineering Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assistant Professor Tippabust Eksangsri, D.Eng.
Academic Years	2015

ABSTRACT

At present, there are many methods to desalinate seawater or saltwater to potable water for solving the shortage of freshwater by the process of reverse osmosis using membrane as filter. This research was conducted in two main parts, including the synthesis of membrane and the use of membrane in the reverse osmosis process. The first part, the synthesized membrane is cellulose acetate (CA) type prepared by phase inversion method, using acetone and DI water as solvent and improving its performance by using Ethylene Glycol (EG) and Polyethylene Glycol (PEG) about 0-9%wt as additives. There are two different ranges of synthesis temperature, which are high temperatures (20-23°C) and low temperatures (5-7°C), follow by comparing their physical properties via equations. It was observed that the thickness of synthesized membranes ranged about 90-150 microns. From an analysis of morphology via Scanning Electron Microscope (SEM), a high-temperature synthesized membrane will provided porosity more than low-temperature synthesized membrane, and if EG provided the more porosity and water content than PEG in the use of additives. It can be seen that the morphology of EG-added CA membranes synthesized at high temperatures contained more pores and gave higher water content comparing to the membranes synthesized at low temperatures. The CA membranes which is EG-added up to 9%wt provided the highest porosity and

water content of 92.30% and 74.66%, respectively. Therefore, this research decided to use a membrane which is improved its performance by using EG as an additive and synthesis at high temperature to study the effectiveness its by measuring water flux and salt rejection in the separation of 3.5%wt sodium chloride solution. From the result, it was found that unimproved CA membrane less water flux than that of improved CA membrane which is enhancing its performance and water flux respect to the increase of EG. The CA membranes with 6%wt EG is the most effective in water flux compared to other EG-added, the pure water flux and solution flux value were 0.9336 and 0.5310 m³/m².hr, respectively. Salt rejection performance increased by the increase of additive content, 14.29% of salt rejection obtained by adding 9%wt of EG. Salt rejection increases when initial concentration of sodium chloride decrease by varying the initial concentration of sodium chloride in the range of 2.0-3.5%wt. The salt rejection performance is up to 30% when the initial concentration of sodium chloride is 2%wt.

Keywords: Cellulose acetate membrane, Reverse osmosis, Seawater, Sodium Chloride, Salt rejection

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพแผ่นเยื่อเลือกเซลล์โลสอะซิเตต เพื่อปรับสภาพน้ำเค็ม สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพบุษย์ เอกแสงศรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำในแนวทางรวมทั้งข้อคิดเห็นต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำโครงการวิจัยนี้ และช่วยตรวจสอบแก้ไขรายงานวิจัยจนกระทั่งรายงานวิจัยนี้สำเร็จเป็นฉบับสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุ ด่านวานิชกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรณี แผงจันทิก และอาจารย์ ดร. ทิพย์สุรีย์ กรบุญรักษา ที่ได้แนะนำ ชี้แนะแนวทางการดำเนินการงานวิทยานิพนธ์เรื่องนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบุคลากรฝ่ายต่างๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือทั้งเรื่องสถานที่ในการทำวิจัย อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยเรื่องนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ทุกคนในครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือ คอยห่วงใย และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดระยะเวลาในการศึกษาระดับปริญญาโท

ผู้วิจัยขอขอบคุณประโยชน์และความสำเร็จอันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แต่ทุกๆ ท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องและมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

นางสาวนิตยา ตันเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(4)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การแยกสารออกจากน้ำด้วยแผ่นเยื่อเลือก	5
2.1.1 กลไกการซึมแพร่ผ่าน	6
2.1.2 กลไกการไหลผ่านรูพรุน	7
2.2 กระบวนการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือก	8
2.2.1 Microfiltration: MF	8
2.2.2 Ultrafiltration: UF	8
2.2.3 Nanofiltration: NF	9
2.2.4 Reverse Osmosis: RO	9

2.3 กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ	10
2.4 ทิศทางการไหลของน้ำในการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือก	11
2.5 ประเภทของแผ่นเยื่อเลือก	12
2.5.1 Isotropic Membranes	12
2.5.1.1 Microporous Membranes	12
2.5.1.2 Nonporous Dense Membranes	13
2.5.1.3 Electrically Charge Membranes	13
2.5.2 Anisotropic Membranes	13
2.5.3 Ceramic Metal and liquid Membranes	13
2.6 แผ่นเยื่อเลือกที่นิยมใช้ในกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ	14
2.6.1 Cellulose Acetate (CA)	14
2.6.2 Thin Film Composite Polyamide	14
2.7 วัสดุและการผลิตแผ่นเยื่อเลือกสังเคราะห์	15
2.8 วิธีการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกโดยวิธีการเปลี่ยนเฟส	16
2.8.1 การเตรียมชั้นที่หนึ่ง	16
2.8.2 การเตรียมชั้นที่สอง	16
2.8.3 การเตรียมชั้นที่สาม	16
2.8.4 การเตรียมชั้นที่สี่	16
2.9 ผลของตัวแปรที่มีต่อการเตรียมแผ่นเยื่อเลือก	18
2.9.1 ตัวแปรที่มีผลต่อส่วนประกอบของสารละลายโพลิเมอร์	18
2.9.1.1 โพลิเมอร์	18
2.9.1.2 ตัวทำละลาย	18
2.9.1.3 ตัวไม่ทำละลาย	19
2.9.1.4 สารเติมแต่ง	19
2.9.1.5 ความเข้มข้นของสารละลาย	19
2.9.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเตรียมและการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือก	19
2.9.2.1 วิธีการเตรียมสารละลายโพลิเมอร์	19
2.9.2.2 ช่วงเวลาการปรับตัวของสารละลาย	19
2.9.2.3 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ	20
2.9.2.4 เวลาในการระเหย	20
2.9.2.5 อุณหภูมิของอ่างน้ำ	20

2.9.2.6 การปรับสภาพแผ่นเยื่อเลือกด้วยความร้อน	20
2.10 ผลของตัวแปรที่มีต่อฟลักซ์และการแยกสารละลาย	21
2.10.1 ความดัน	21
2.10.2 ความเข้มข้นของสารละลาย	21
2.10.3 อุณหภูมิ	21
2.10.4 ความเร็วในการไหล	21
2.10.5 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน	21
2.11 ลักษณะการอุดตันบนแผ่นเยื่อเลือก	21
2.11.1 ลักษณะการเกิดการอุดตันบนแผ่นเยื่อเลือก	22
2.11.1.1 ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน	22
2.11.1.2 การเกิดขึ้นเจล	22
2.11.1.3 การเกิดขึ้นเค้ก	22
2.11.1.4 การอุดตันรูพรุน	22
2.11.2 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนแผ่นเยื่อเลือก	23
2.11.2.1 ขนาดของรูพรุน	23
2.11.2.2 ประจุหรือความมีขั้วของแผ่นเยื่อเลือก	23
2.11.2.3 ความดัน	23
2.11.2.4 ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ	23
2.11.2.5 ความเข้มข้นของสารละลาย	24
2.11.2.6 ค่า pH และอุณหภูมิของสารละลาย	24
2.11.2.7 ค่าน้ำหนักโมเลกุล	24
2.12 คุณลักษณะและประสิทธิภาพการแยกสารของแผ่นเยื่อเลือก	25
2.12.1 การพิจารณาคุณลักษณะของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตต	25
2.12.2 การพิจารณาประสิทธิภาพการแยกของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตต	25
2.12.2.1 ค่าฟลักซ์ของน้ำที่กรองได้	25
2.12.2.2 ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ	26
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	31
3.1 วิธีการดำเนินการศึกษา	31

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	32
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์	32
3.2.2 สารเคมี	33
3.3 การสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือก	33
3.3.1 ส่วนประกอบในการเตรียมสารละลายโพลิเมอร์	33
3.3.2 การเตรียมสารละลายโพลิเมอร์	34
3.3.3 การขึ้นรูปแผ่นเยื่อเลือก	35
3.3.4 การปรับสภาพแผ่นเยื่อเลือกด้วยความร้อน	37
3.3.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือก	38
3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	39
3.4.1 ลักษณะภายนอกของแผ่นเยื่อเลือก	39
3.4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นเยื่อเลือก	39
3.4.2.1 การเตรียมตัวอย่างแผ่นเยื่อเลือก	39
3.4.2.2 การทำแผ่นเยื่อเลือกให้แห้ง	39
3.4.2.3 การเคลือบผิวแผ่นเยื่อเลือกด้วยโลหะ	40
3.4.3 การทดสอบค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำ	40
3.4.3.1 แช่แผ่นเยื่อเลือกในน้ำกลั่น	40
3.4.3.2 การเตรียมแผ่นเยื่อเลือกสำหรับทดสอบ	41
3.4.3.3 การชั่งน้ำหนักเปียกของแผ่นเยื่อเลือก	41
3.4.3.4 การระเหยน้ำออกจากแผ่นเยื่อเลือก	41
3.4.3.5 การชั่งน้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือก	41
3.4.3.6 การคำนวณค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำ	41
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อเลือก	42
3.5.1 การทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำ	42
3.5.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการแยกเกลือ	43
3.5.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นกับแผ่นเยื่อเลือกสำเร็จรูป	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	45
4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ	45

4.1.1 ผลของลักษณะภายนอกของแผ่นเยื่อเลือก	45
4.1.2 ผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นเยื่อเลือก	45
4.1.3 ผลของค่าความเป็นรูปพรุนและค่าการกักเก็บน้ำ	51
4.1.4 ผลของการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลส อะซิเตตแบบสังเคราะห์กับแบบสำเร็จรูป	54
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อเลือก	55
4.2.1 ผลของค่าฟลักซ์ของน้ำ	55
4.2.2 ผลของประสิทธิภาพในการแยกเกลือ	56
4.2.3 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้น กับแผ่นเยื่อเลือกสำเร็จรูป	60
4.2.4 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมแพร่ผ่าน	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
รายการอ้างอิง	64
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การคำนวณผลการทดลอง	68
ประวัติผู้เขียน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงส่วนประกอบในการเตรียมสารละลายโพลิเมอร์ของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ	34
3.2 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกเกลือ	44
4.1 แสดงค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน	52
4.2 แสดงค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำ ของแผ่นเยื่อเลือกแบบสำเร็จรูปกับแบบสังเคราะห์ขึ้น	55
4.3 แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำ และค่าฟลักซ์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	56
4.4 แสดงสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ	58
4.5 แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ต่างกันที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ	59
ก.1 แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ EG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 5-7 องศาเซลเซียส	69
ก.2 แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ EG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส	70
ก.3 แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส	71
ก.4 แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกแบบสำเร็จรูป	71
ก.5 แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ EG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 5-7 องศาเซลเซียส	73
ก.6 แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ EG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส	74
ก.7 แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส	75
ก.8 แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกแบบสำเร็จรูป	75

- ก.9 แสดงข้อมูลของปริมาตรน้ำกลั่นที่ผ่านแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ ที่ทำการสังเคราะห์
ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส และค่าฟลักซ์ของน้ำ 77
- ก.10 แสดงข้อมูลของปริมาตรน้ำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผ่านแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ
ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส และค่าฟลักซ์ของสารละลาย 78
- ก.11 แสดงผลของสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ
และข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นเยื่อเลือก
ชนิดต่างๆ ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส 80
- ก.12 แสดงผลของความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่แตกต่างกันที่มีผลต่อ
ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ และข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้า
และด้านหลังของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA และ CAEG9 ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ
20-23 องศาเซลเซียส 81
- ก.13 แสดงข้อมูลการในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมแพร่ผ่านของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ 84

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงความสามารถในการแยกของกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ	2
2.1 การทำงานของแผ่นเยื่อเลือก (Membrane Separation)	5
2.2 การถ่ายโอนมวลของความเข้มข้นของ CA1 ตามกฎของฟิค	6
2.3 การแบ่งกระบวนการแยกตัวถูกละลายในน้ำตามขนาดของตัวถูกละลาย	8
2.4 แสดงความสามารถในการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือกของกระบวนการต่างๆ	9
2.5 การเปรียบเทียบกระบวนการออสโมซิสกับกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ	10
2.6 ความดันออสโมซิส (Osmotic Pressure) ของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ	11
2.7 แสดงการเปรียบเทียบของการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือกแบบ Dead End Filtration และ Crossflow Filtration	12
2.8 สูตรโครงสร้างของ Cellulose Acetate	14
2.9 โครงสร้างภายในของ Cellulose acetate membrane	15
2.10 การเกิดรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกโดยวิธีการเปลี่ยนเฟส	17
2.11 การเกิดชั้นผิวและการเกิดรูพรุนในชั้นรองรับของแผ่นเยื่อเลือกที่ผลิตโดยวิธีการ เปลี่ยนเฟส	18
3.1 การกวนสารละลายโพลิเมอร์	35
3.2 การขึ้นรูปแผ่นเยื่อเลือกบนแผ่นกระจก	36
3.3 การทำให้แผ่นเยื่อเลือกแข็งตัวในอ่างน้ำเย็น	36
3.4 แผ่นเยื่อเลือกที่ตัดให้พอดีสำหรับการนำไปทดสอบประสิทธิภาพ	36
3.5 การปรับสภาพแผ่นเยื่อเลือกด้วยความร้อน	37
3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	40
3.7 แสดงกระบวนการที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพต่างๆของแผ่นเยื่อเลือก	43
4.1 แสดงภาพจาก SEM โดยที่ ภาพที่ขึ้นด้วย ก คือภาพพื้นผิว และภาพที่ขึ้นด้วย ข คือภาพตัดขวาง และ 1, 2, 3 และ 4 คือแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA, CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 ตามลำดับ (ทำการสังเคราะห์ที่ 5-7 องศาเซลเซียส)	46
4.2 แสดงภาพจาก SEM โดยที่ ภาพที่ขึ้นด้วย ค คือภาพพื้นผิว และภาพที่ขึ้นด้วย ง คือภาพตัดขวาง และ 1, 2, 3 และ 4 คือแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA, CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 ตามลำดับ (ทำการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส)	47

4.3	แสดงภาพจาก SEM โดยที่ ภาพที่ขึ้นด้วย จ คือภาพพื้นผิว และภาพที่ขึ้นด้วย ฉ คือภาพตัดขวาง และ 1, 2 และ 3 คือแผ่นเยื่อเลือกชนิด CAPEG3, CAPEG6 และ CAPEG9 ตามลำดับ (ทำการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส)	48
4.4	แสดงภาพขนาดของรูพรุนที่ภาพพื้นผิวของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA, CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 ที่มีการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส	49
4.5	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นเยื่อเลือกที่มีการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิที่ 5-7 องศาเซลเซียสคือภาพ ข1, ข2 และ ข3 กับการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิที่ 20-23 องศาเซลเซียสคือภาพ ง1, ง2 และ ง3 ที่มีสารเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่ง	50
4.6	แสดงการเปรียบเทียบชนิดของแผ่นเยื่อเลือกที่มีสารเติมแต่งเป็นเอทิลีนไกลคอล คือ CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 กับโพลีเอทิลีนไกลคอลคือ CAPEG3, CAPEG6 และ CAPEG9 ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส	51
4.7	กราฟแสดงค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ	53
4.8	กราฟแสดงค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ	53
4.9	แสดงภาพพื้นผิว และภาพตัดขวางของแผ่นเยื่อเลือกแบบสำเร็จรูป (CACOM) และแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นชนิด CA	54
4.10	กราฟแสดงค่าพลั๊กของน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ	56
4.11	แสดงการโพลาริเซชันของแผ่นเยื่อเลือก	57
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือกับสัดส่วนของสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน	59
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA และ CAEG9 กับค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่แตกต่างกัน	60
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permeability กับสัดส่วนของสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน	61

บทที่ 1

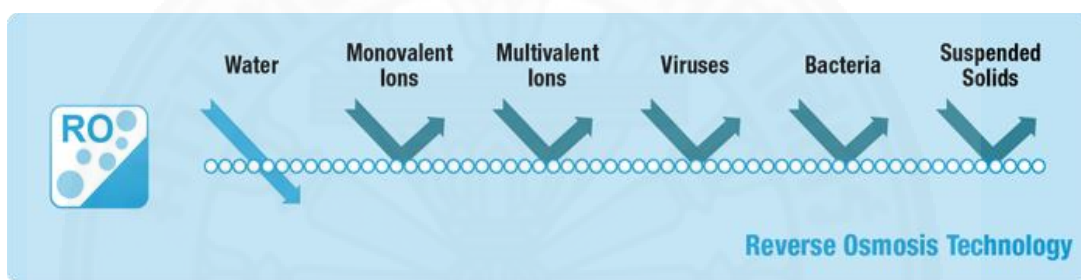
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำจืด หรือน้ำที่มีความเค็มไม่เกินร้อยละ 0.05 โดยมีมวลนั้นมีความสำคัญมากในการดำรงชีวิตประจำวันทั้งในภาคครัวเรือน การเกษตร และองค์กรต่างๆ รวมทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม การผลิต โดยที่ประโยชน์ของน้ำจืดคือ การอุปโภคบริโภค การเพาะปลูก การประมง และกระบวนการผลิตต่างๆ เนื่องจากน้ำจืดของโลกมีอย่างจำกัดโดยประมาณ 97% ของน้ำบนโลกเป็นน้ำเค็มหรือน้ำทะเล และ 3% ของน้ำบนโลกเป็นน้ำจืด แต่มีเพียงประมาณ 30% ของน้ำจืดที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (U.S. Geological Survey, 2016) และความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมที่กำลังพัฒนา หรือการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก รวมทั้งสิ่งมีชีวิตต่างๆ ล้วนมีความต้องการในการใช้น้ำจืด และมีความต้องการเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี จึงทำให้หลายประเทศประสบกับปัญหาการขาดแคลนน้ำจืด โดยปัจจุบันพบว่าการนำน้ำทะเลหรือน้ำเค็มมาเปลี่ยนเป็นน้ำจืดมากขึ้นด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการกรองความขุ่นและดูดซับ กระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมี กระบวนการกรองโดยการแลกเปลี่ยนไอออน และหนึ่งในกระบวนการสำคัญคือ กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับโดยใช้แผ่นเยื่อเลือก

นอกจากนี้ยังพบว่าประเทศส่วนใหญ่มีพื้นที่อยู่ติดทะเล และแม่น้ำลำคลอง จึงทำให้การเปลี่ยนน้ำเค็มมาเป็นน้ำจืดเป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เพราะน้ำทะเลเป็นน้ำที่มีปริมาณมากที่สุดของโลกซึ่งสามารถนำมาทดแทนการใช้น้ำจืดจากน้ำจืดได้อย่างดี โดยเฉพาะพื้นที่ที่อยู่บริเวณใกล้ทะเล และน้ำในแม่น้ำลำคลองที่อยู่ในช่วงน้ำจืดก็จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เลย เช่น รดน้ำต้นไม้ หรือพืชผักสวนครัว และใช้ทำความสะอาดสิ่งต่างๆ เป็นต้น แต่ก็ยังมีบางช่วงเวลาที่น้ำในลำคลองเปลี่ยนจากน้ำจืดเป็นน้ำเค็ม หรือเรียกว่าน้ำกร่อย ซึ่งจะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในทันที จากข้อมูลในปี 2004 ของสภาการวิจัยของอเมริกา (Sorek Project, 2016) พบว่าประมาณ 1,500 โรงงานมีการนำน้ำทะเลมาผลิตเป็นน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภคซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า Desalination เพื่อตอบสนองปัญหาการขาดแคลนน้ำจืด เช่น Sorek Desalination Plant ในประเทศอิสราเอลที่เป็นโรงงาน Desalination ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลกที่ใช้กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับโดยใช้แผ่นเยื่อเลือก ซึ่งมีกำลังการผลิตถึง 624,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และบริษัท ยูนิเวอร์แซล ยูทิลิตี้ส์ จำกัด เป็นรายแรกและรายใหญ่ที่สุดของประเทศไทยที่มีการทำกิจการเปลี่ยนน้ำทะเลมาเป็นเป็นน้ำประปาเพื่อใช้ในการอุปโภค และบริโภคในพื้นที่ที่ใกล้ทะเลคือ เกาะสมุย

จังหวัดสุราษฎร์ธานี และเกาะลัน จังหวัดชลบุรี ซึ่งมีขนาดกำลังผลิตน้ำทะเลเป็นน้ำจืดรวมกัน 3,300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Universal Utilities, 2015) เป็นต้น แผ่นเยื่อเลือกที่นิยมใช้ใน Desalination ได้แก่ Thin Film Composite Polyamide และ Cellulose Acetate (CA) (ประกร รามกุล และอัญชลี มูลคลิ่น, 2011) ซึ่งพบว่าเยื่อเลือกแผ่นชนิดเซลลูโลสอะซิเตต (CA Membrane) นั้นมีความสามารถในการกรองเกลือสูง ขึ้นรูปง่าย และราคาถูก แต่ยังมีข้อเสียอยู่คือมีค่าฟลักซ์ต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตต เพื่อให้ค่าฟลักซ์ในการแยกโซเดียมคลอไรด์ออกจากน้ำเค็มมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยใช้กระบวนการออสโมซิสแบบ ผันกลับแสดงดังภาพที่ 1.1 ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถแยกสิ่งเจือปนต่างๆได้ดี และทำให้น้ำทะเล น้ำกร่อย และน้ำเค็ม กลายเป็นน้ำจืดที่เพียงพอต่อความต้องการต่อไปในอนาคต



ภาพที่ 1.1 แสดงความสามารถในการแยกของกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ. จาก Reverse Osmosis Technology, โดย <http://www.kochmembrane.com/Learning-Center/Technologies.aspx>

เนื่องจากแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตสามารถสังเคราะห์ขึ้นมาเองได้ และมีราคาถูกกว่าแผ่นเยื่อเลือกชนิดอื่น ทำให้มีการนำแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะกับกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อเลือกชนิดนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้ในการแยกเกลือออกจากน้ำเค็ม ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกนั้นสามารถพิจารณาได้จากปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อกระบวนการแยก เพื่อให้ได้น้ำในการอุปโภค บริโภคที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น และมีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสม เช่น อัตราการไหล อุณหภูมิ ความดัน และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) หรืออาจใช้วิธีปรับสภาพสารป้อนก่อนนำเข้าระบบการกรอง หรือปรับสภาพผิวแผ่นเยื่อเลือกด้วยการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับแผ่นเยื่อเลือก ซึ่งในการวิจัยนี้จะพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพคือ ชนิดของสารเติมแต่ง สัดส่วนของสารเติมแต่ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ เพื่อให้ได้แผ่นเยื่อเลือกที่เหมาะสมไปใช้ในการทดสอบพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการแยกคือ สัดส่วนของสารเติมแต่ง และค่าความเข้มข้นของ

น้ำเค็มเข้าที่ต่างกัน โดยใช้สารเติมแต่งเป็นโพลีเมอร์ชนิดเอทิลีนไกลคอล และโพลีเอทิลีนไกลคอล ที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวทำละลายและตัวไม่ละลาย ซึ่งจะทำให้แผ่นเยื่อเลือกมีรูพรุนเพิ่มขึ้น และมีความสามารถในการยอมให้น้ำผ่าน หรือสามารถทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มมากขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตต และผลของชนิดของสารเติมแต่ง และสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อเลือกชนิดเซลลูโลสอะซิเตต โดยพิจารณาจากสัญญาณวิทยา ค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำ

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกเกลือ จากค่าที่แตกต่างกันของสัดส่วนของสารเติมแต่ง และค่าความเข้มข้นเริ่มต้น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

จากการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ และแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเติมแต่ง 2 ชนิด คือ เอทิลีนไกลคอล และโพลีเอทิลีนไกลคอล ที่มีสัดส่วนแตกต่างกันที่ 0-9%wt โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์คืออุณหภูมิช่วงต่ำ (5-7 องศาเซลเซียส) กับอุณหภูมิช่วงสูง (20-23 องศาเซลเซียส) ของอ่างน้ำ (ในขั้นตอนที่ต้องแช่แผ่นเยื่อเลือกในอ่างน้ำหลังจากปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยออก) แล้วทำการเปรียบเทียบจากลักษณะทางกายภาพ จากนั้นจึงเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมมาทำการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกที่มีโพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่งอีกหนึ่งชนิด แล้วนำไปทดสอบเปรียบเทียบลักษณะทางสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, ค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำ จากนั้นจึงนำแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่เหมาะสมไปทดสอบการใช้งานโดยการหาค่าฟลักซ์ จากค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นและค่าฟลักซ์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ที่ 3.5 %wt ซึ่งเป็นค่าความเค็มที่เทียบเท่ากับค่าความเค็มของน้ำทะเล (การวัดความเค็มของน้ำ (Salinity), 2010-2015) และค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ โดยทำการศึกษาผลของสัดส่วนของสารเติมแต่งที่ต่างกันในช่วง 0-9%wt และศึกษาผลของความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ต่างกันในช่วง 2.0-3.5%wt

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 การเติมสารเติมแต่งตระกูลไกลคอลจะทำให้แผ่นเยื่อเลือกมีความพรุน และความชอบน้ำมากขึ้น

1.4.2 เป็นการพัฒนาแผ่นเยื่อเลือกชนิดเซลลูโลสอะซิเตตให้มีค่าฟลักซ์ที่เพิ่มมากขึ้น และเหมาะสำหรับการแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ออกจากน้ำเค็มมากขึ้น

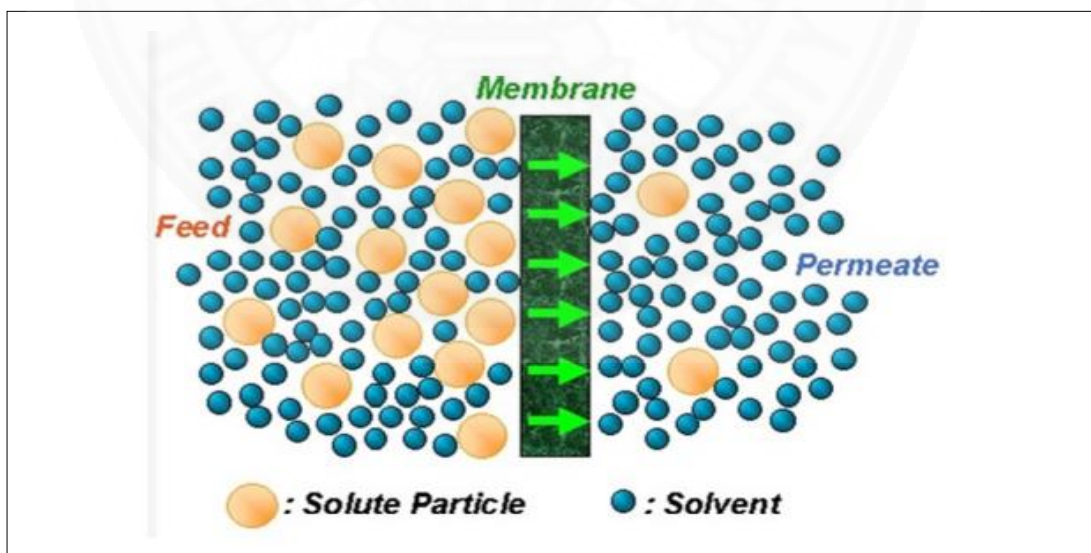


บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแยกสารออกจากน้ำด้วยแผ่นเยื่อเลือก

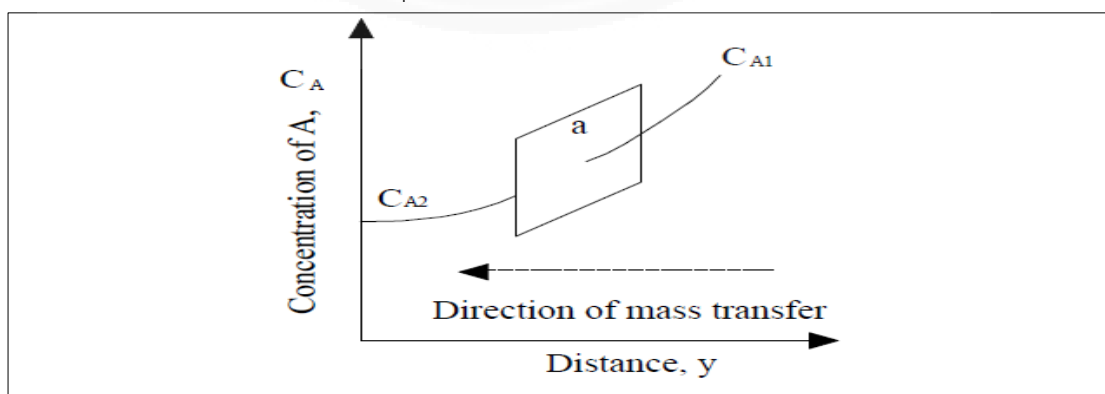
เนื่องจากกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับนั้นจะใช้แผ่นเยื่อเลือกในการแยกสาร จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาหลักการทำงานของการทำงานของการแยกสารออกจากน้ำด้วยแผ่นเยื่อเลือก โดยการแยกสารออกจากน้ำด้วยแผ่นเยื่อเลือก หมายถึง การแยกสารเจือปนหรือตัวถูกละลาย (Solute Particle) ที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำหรือตัวทำละลาย (Solvent) ด้วยการใช้แผ่นเยื่อเลือก โดยแผ่นเยื่อเลือกจะทำหน้าที่เป็นตัวกั้นสารให้ผ่านเข้าไปได้ และเลือกที่จะแยกอนุภาคขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุล สารที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุนแผ่นเยื่อเลือกจะสามารถผ่านรูพรุนแผ่นเยื่อเลือกโดยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ในขณะที่อัตราการซึมผ่านของของเหลวที่มีอนุภาคหรือโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนแผ่นเยื่อเลือกจะยังคงอยู่ที่แผ่นเยื่อเลือกแสดงดังภาพที่ 2.1 (รัตนา จิระรัตนานนท์, 1988) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการแยกมากขึ้นจึงต้องทำการพิจารณาถึงกลไกในการกรอง และการซึมผ่านแผ่นเยื่อเลือกของสารที่ต้องการกรอง หรืออาจอธิบายได้ใน 2 ลักษณะคือ กลไกการซึมแพร่ผ่าน และกลไกการไหลผ่านรูพรุน



ภาพที่ 2.1 การทำงานของแผ่นเยื่อเลือก (Membrane Separation). จาก *Filtration and Membrane Separation for Water Purification*. โดย Bright Hub Engineering, 2012, สืบค้นจาก <http://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/54360-filtration-and-membrane-separation-for-water-purification/#>

2.1.1 กลไกการซึมแพร่ผ่าน (Solution Diffusion Model)

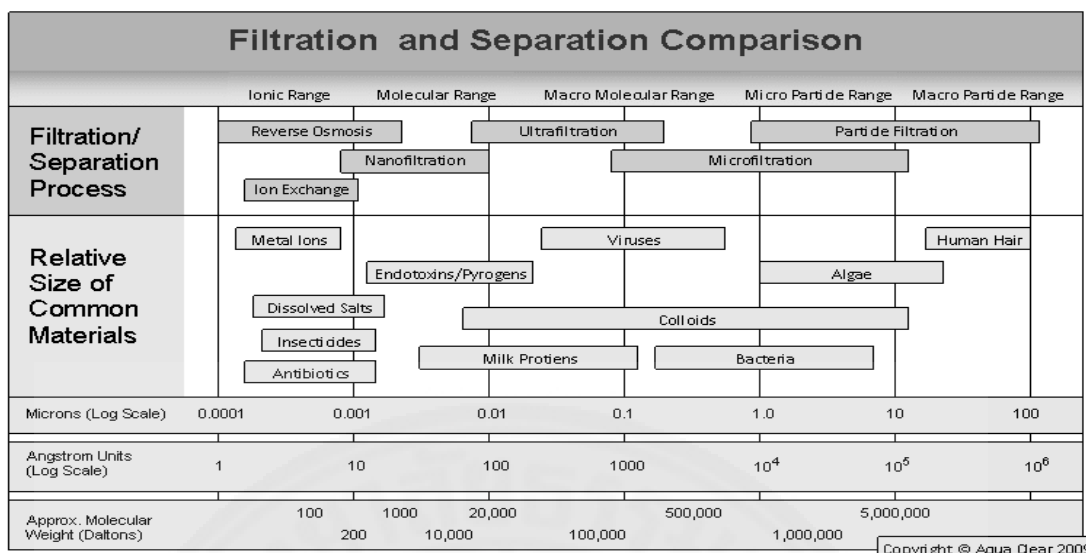
กลไกการซึมแพร่ผ่านมีหลักการทำงานคือ สารที่จะซึมแพร่ผ่านแผ่นเยื่อเลือก เช่น น้ำจะต้องละลายเข้าไปในเนื้อแผ่นเยื่อเลือกก่อนแล้วจึงซึมแพร่ผ่านแผ่นเยื่อเลือก โดยใช้ความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร (Concentration Gradient) โดยที่สารที่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อเยื่อได้จะแพร่จากตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า หรือจากบริเวณที่มีน้ำมากกว่าไปยังบริเวณที่มีน้ำน้อยกว่า ซึ่งความสามารถในการกรองแยกสารหรือค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ สารจะเกิดจากความแตกต่างของความสามารถในการละลายของสาร และความเร็วในการซึมแพร่ผ่านในเนื้อแผ่นเยื่อเลือกของสารเข้าไปในเนื้อแผ่นเยื่อเลือกแต่ละชนิด ทำให้สารแต่ละชนิดมีการซึมแพร่ผ่านแผ่นเยื่อเลือกได้ต่างกัน ซึ่งอัตราการซึมแพร่ผ่านจะเป็นไปตามกฎของฟิค (Fick Law) ทฤษฎีว่าด้วยการซึมแพร่ผ่านแผ่นเยื่อเลือกที่ส่วนใหญ่จะใช้กับแผ่นเยื่อเลือกที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากๆ หรือมีลักษณะเป็นแผ่นเยื่อเลือกเนื้อแน่น (Dense Membrane) ดังนั้นอัตราการซึมแพร่ผ่านแผ่นเยื่อเลือกจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้น และความหนาของแผ่นเยื่อเลือก กฎของฟิค (Fick Law of Diffusion) : $J_A = \frac{N_A}{a} = -D_A \left(\frac{dC_A}{dy} \right) = \frac{D}{l_M} (C_{A1} - C_{A2})$ โดยที่ J_A คือ ค่าฟลักซ์ของสารละลาย ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$), D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมแพร่ผ่าน หรือ Permeability ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ต้องการคัดกรองด้วยแผ่นเยื่อเลือก (Permeability of specie A through membrane) (cm^2/s), C_{A1} , C_{A2} คือความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้า (Feed) และด้านหลัง (Permeate) ของแผ่นเยื่อเลือก (kmol/m^3) และ l_M คือความหนาของแผ่นเยื่อเลือก (แสงเกิดประทุม, 2540) แสดงดังภาพที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารอะไรก็ตามที่ต้องการให้มีการซึมผ่านแผ่นเยื่อเลือกไปได้นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า Permeability และความหนาของแผ่นเยื่อเลือก ตัวอย่างเช่น ถ้าแอฟฟิเคชั่นนั้นต้องการที่จะแยกน้ำออกจากเกลือด้วยกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ ก็จะต้องการให้น้ำไหลผ่านแผ่นเยื่อเลือกได้มากที่สุด จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการศึกษาการเติมสารเติมแต่งที่เป็นไฮโดรฟิลิกที่ชอบน้ำลงไป เพื่อเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อเลือก



ภาพที่ 2.2 การถ่ายโอนมวลของความเข้มข้นของ CA_1 ตามกฎของฟิค. จาก ทฤษฎีการกรองด้วยเมมเบรน. โดย แสง เกิดประทุม, 2540, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.).

2.1.2 กลไกการไหลผ่านรูพรุน (Pore-flow Module)

กลไกการไหลผ่านรูพรุน (แสง เกิดประทุม, 2540) จะใช้หลักการของอนุภาคขนาดเล็กของสารที่ต้องการคัดกรองเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกแล้วเกิดการชนปะทะกับผนังของรูพรุนเกิดเป็นความเสียดทานต้านทานการไหลของอนุภาคผ่านรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือก ดังนั้นการจะทำให้อนุภาคเคลื่อนผ่านแผ่นเยื่อเลือก จึงต้องใช้แรงดันเป็นตัวขับเคลื่อนให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านรูพรุน ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านรูพรุนจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันกลไกนี้มักใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลผ่านตัวกลางที่มีลักษณะเป็นรูพรุน การไหลแบบนี้จะเป็นไปตามกฎความสัมพันธ์ของอัตราการไหล หรือฟลักซ์ (Flux) ของสารที่ไหลผ่านแผ่นเยื่อเลือกเป็นไปตามกฎของดาร์ซี $J_i = K' C_i \left(\frac{dP}{dx} \right) = K_W (\Delta P - \Delta \pi)$ โดยที่ J_i คือ ค่าฟลักซ์ของน้ำ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$), K_W คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านแผ่นเยื่อเลือกของน้ำ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{psi}$), ΔP คือ ความแตกต่างของความดันระหว่างผิวหน้าแผ่นเยื่อเลือกทั้งสองด้าน และ $\Delta \pi$ คือ ความแตกต่างของความดันออสโมติกของสารละลายที่อยู่ทั้งสองด้านของแผ่นเยื่อเลือก (ทฤษฎีว่าด้วยการไหลผ่านแผ่นเยื่อเลือกแบบ (Pores Flow) ใช้อธิบายปรากฏการณ์การไหลผ่านในแผ่นเยื่อเลือกแบบมีรูพรุนขนาดเล็กที่เป็นรูพรุนแบบถาวรขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 5-10 Å (Angstrom) (0.0005-0.001 ไมครอน) ใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้สารที่ต้องการคัดกรองไหลผ่านแผ่นเยื่อเลือก ดังนั้นอัตราการไหลผ่านของสารจึงขึ้นอยู่กับความดัน และค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านแผ่นเยื่อเลือกของน้ำ นอกจากนี้จะขึ้นกับแรงดันแล้วยังต้องพิจารณาถึงขนาดอนุภาคของสาร และกระบวนการที่ใช้ในการกรองให้เหมาะสมกันเพื่อที่จะช่วยให้ช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงานในการกรองมากขึ้น เช่น ถ้าตัวถูกละลายมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 100,000 กรัมต่อโมล หรือมีขนาดของอนุภาคมากกว่า 0.1 ไมครอน ได้แก่ พวกแบคทีเรีย และสารแขวนลอย จะแยกด้วยกระบวนการไมโครฟิวเตรชัน (Microfiltration) และถ้าตัวถูกละลายมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 20,000-100,000 กรัมต่อโมล หรือมีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.01-0.1 ไมครอน ได้แก่ พวกโปรตีน ไวรัส หรือเป็นสารโมเลกุลเล็ก จะแยกด้วยกระบวนการอัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) ในขณะที่ตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 200 กรัมต่อโมล หรือมีขนาดของอนุภาคน้อยกว่า 0.001 ได้แก่ ไอออนโลหะ แลไอออนเกลือ จะใช้กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse Osmosis) ในการแยก (แสง เกิดประทุม, 2540) แสดงดังภาพที่ 2.3 ซึ่งจะพบว่ากระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับมีประสิทธิภาพในการแยกสารสูงสุดแต่ในขณะเดียวกันก็เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานมากที่สุดเช่นกันซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 2.3 การแบ่งกระบวนการแยกตัวถูกละลายในน้ำตามขนาดของตัวถูกละลาย. จาก *Reverse Osmosis vs. Nanofiltration and Other Filtration Technologies*. โดย Aqua Clear Water Treatment Specialists, 2015, สืบค้นจาก <http://www.aquaclearllc.com/technical-info/reverse-osmosis-vs-nanofiltration-and-other-filtration-technologies/>

2.2 กระบวนการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือก (Membrane Separation Process)

กระบวนการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือก หมายถึง กระบวนการแยกสารหรือสิ่งเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำโดยอาศัยแผ่นเยื่อเลือกในการเลือกผ่าน ซึ่งกระบวนการต่างๆแตกต่างกันไปตามขนาดอนุภาคของสาร และแรงดันที่ให้แก่ระบบในการแยกสารออกจากน้ำ โดยแบ่งได้ 4 กระบวนการ คือ ไมโครฟิวเตรชัน (Microfiltration: MF) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration: UF) นาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration: NF) และออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse Osmosis: RO) แสดงดังภาพที่ 2.4 ที่แสดงถึงความแตกต่างกระบวนการต่างๆตามลักษณะของการนำไปใช้งาน (Colour Way, 2006) ได้แก่

2.2.1 Microfiltration: MF

เป็นกระบวนการที่สามารถแยกอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 100,000 กรัมต่อโมล เช่น อนุภาคของแข็งแขวนลอย และพวกแบคทีเรียได้ดี โดยจะใช้แผ่นเยื่อเลือกที่มีขนาดของรูพรุนประมาณ 0.03-10 ไมครอน และเป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันต่ำที่สุดในการแยกอยู่ที่ประมาณ 15-60 psi

2.2.2 Ultrafiltration: UF

เป็นกระบวนการที่จะใช้ในการแยกสารอนุภาคขนาดเท่าไมครอน เช่น ของแข็ง

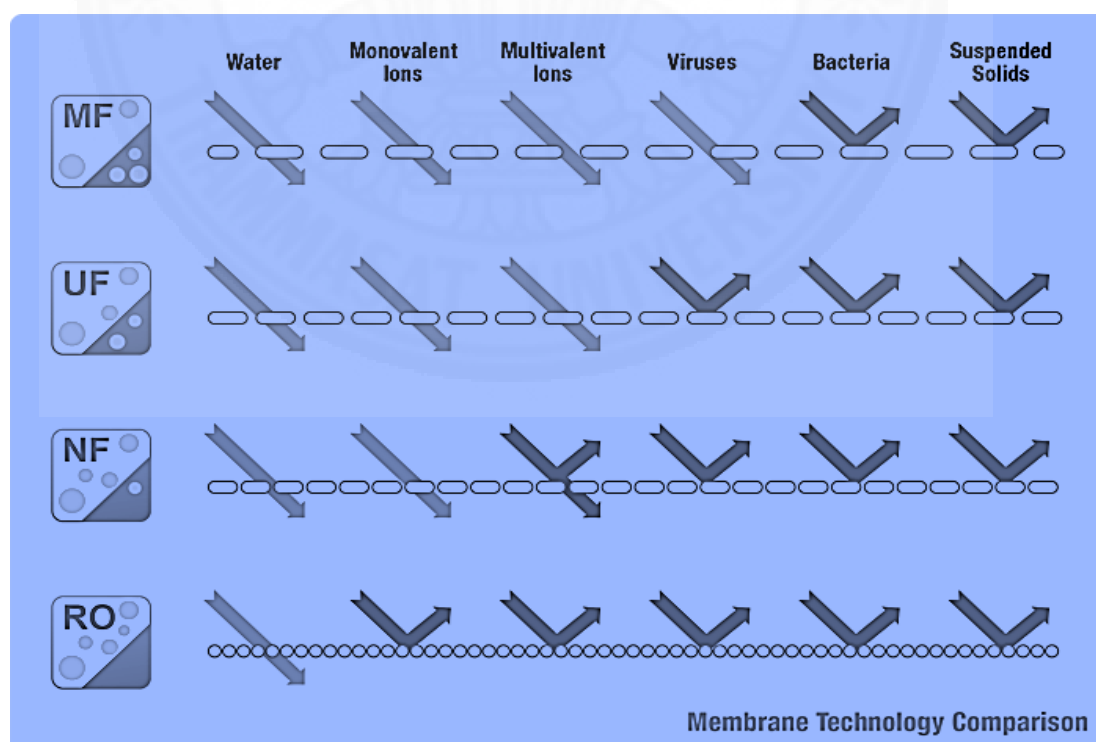
แขวนลอย แบคทีเรีย และพวกโปรตีน ไวรัส ที่เป็นสารอนุภาคขนาดต่ำกว่าระดับไมครอน และมีน้ำหนักโมเลกุลสูงตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปสารที่ไม่มีประจุจะถูกแยกไว้ และสารที่มีประจุจะผ่านแผ่นเยื่อเลือกไปได้ ที่มีขนาดของรูพรุนประมาณ 0.002-0.1 ไมครอน และเป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันต่ำอยู่ที่ประมาณ 30-100 psi

2.2.3 Nanofiltration: NF

เป็นกระบวนการแยกที่ยอมให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตร ผ่านไปได้เท่านั้น ซึ่งมีขนาดของรูพรุนประมาณ 0.001 ไมครอน และเป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันสูงกว่ากระบวนการแบบ MF และ UF อยู่ที่ประมาณ 90 psi และอาจจะสูงถึง 150 psi

2.2.3 Reverse Osmosis: RO

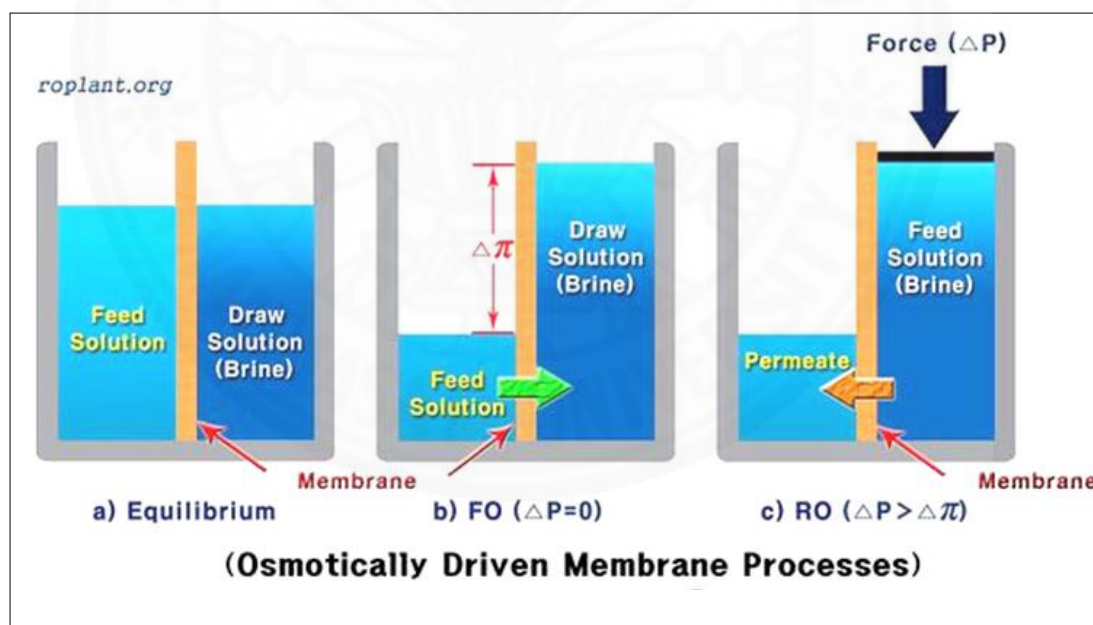
เป็นกระบวนการที่ต้องใช้แรงดันสูงๆ ให้แก่สารละลายเข้มข้น และแรงดันนั้นต้องสูงกว่าแรงดันออสโมซิสของสารละลาย (ตัวอย่างแรงดันออสโมซิสที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2.4) ซึ่งแรงดันที่ใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 200-1,000 psi จึงจะทำให้ น้ำบริสุทธิ์ไหลผ่านแผ่นเยื่อเลือกไปได้เพียงอย่างเดียว โดยจะทิ้งไอออนต่างๆ และสิ่งเจือปนเอาไว้ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 100 และในปัจจุบันกระบวนการนี้ยังเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้ในการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง



ภาพที่ 2.4 แสดงความสามารถในการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือกของกระบวนการต่างๆ. จาก <http://www.kochmembrane.com/Learning-Center/Technologies.aspx>

2.3 กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse Osmosis, RO)

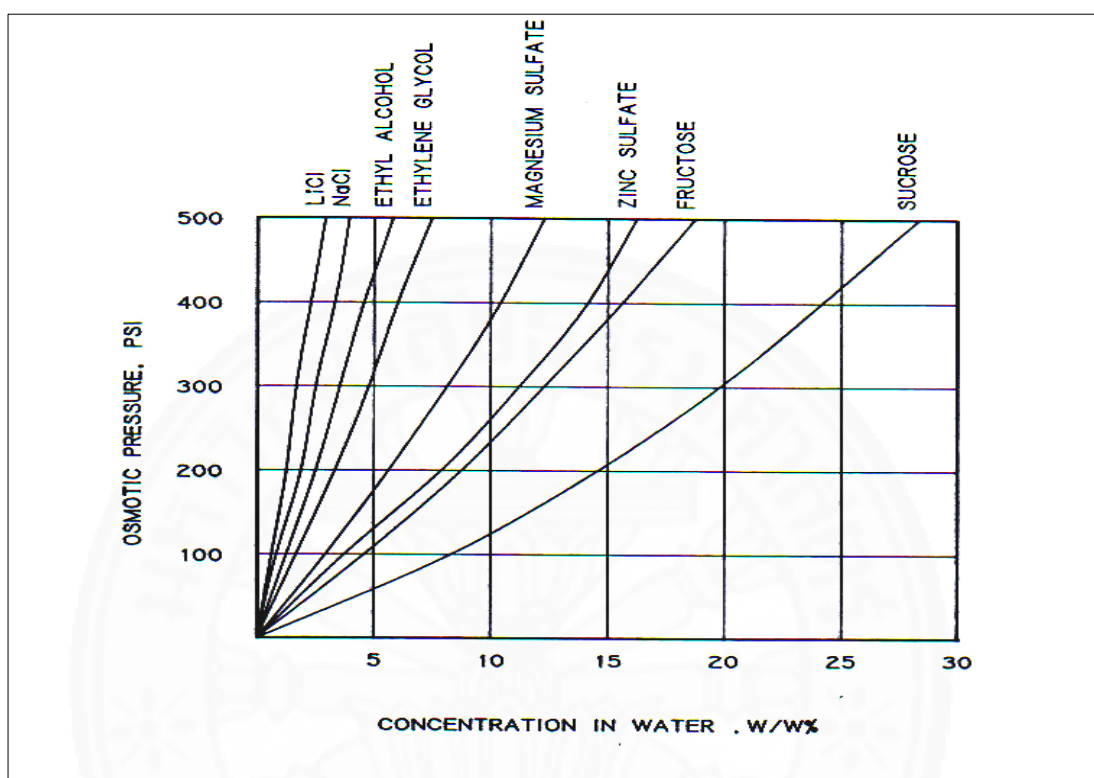
จากกระบวนการออสโมซิส (Osmosis) ที่สภาวะปกติจะมีของเหลวที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันอยู่ระหว่างแผ่นเยื่อเลือกตามภาพ A จากนั้นจะเป็นการแพร่ของน้ำผ่านเนื้อเยื่อของแผ่นเยื่อเลือกจากบริเวณที่มีน้ำมากไปยังบริเวณที่มีน้ำน้อย จนกระทั่งเกิดความสมดุลของความเข้มข้นของสารละลาย แต่ระดับของเหลวจะต่างกันตามภาพ B ซึ่งทำให้เกิด $\Delta\pi$ หรือความดันออสโมติก และเมื่อมีการให้แรงดันที่มากกว่าความดันออสโมติกในด้านสารป้อนที่เป็นบริเวณที่มีน้ำน้อย จะทำให้น้ำเปลี่ยนทิศทางไปยังบริเวณที่มีน้ำมากตามภาพ C ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า กระบวนการออสโมซิสที่แสดงดังภาพที่ 2.5 (ประกร รามกุล และอัญชลี มูลคลี, 2011) ซึ่งแผ่นเยื่อเลือกจะต้องมีคุณสมบัติในการกรองแร่ธาตุต่างๆ ได้ เช่น คลอไรด์ ฟลูออไรด์ ไนเตรต และปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ออกจากน้ำแสดงดังภาพที่ 2.4 ของกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ แต่มีข้อจำกัดในการใช้กระบวนการนี้ คือก่อนนำน้ำเข้ากระบวนการจะต้องทำการกำจัดความขุ่น และสารแขวนลอยออกจากน้ำ เพื่อลดเรื่องปัญหาการอุดตันที่พื้นผิวแผ่นเยื่อเลือก



ภาพที่ 2.5 การเปรียบเทียบกระบวนการออสโมซิสกับกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ. จาก การประยุกต์ใช้กระบวนการออสโมซิสผันกลับในอุตสาหกรรมปัจจุบัน, โดย ประกร รามกุล และอัญชลี มูลคลี, 2011, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม.

โดยความดันออสโมติกสามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) กับความเข้มข้นของสารละลายชนิดต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่าความ

เข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่อยู่ในช่วง 2.0-3.5%wt จะได้ค่าความดันออสโมติกเท่ากับ 200-400 psi ที่แสดงดังภาพที่ 2.6 (แสง เกิดประทุม, 2540)

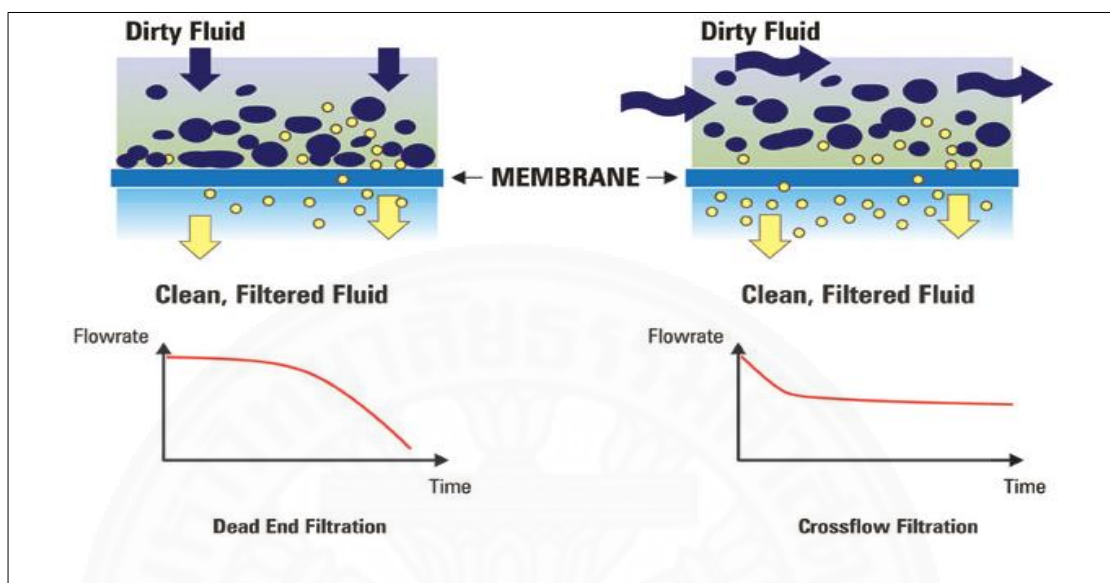


ภาพที่ 2.6 ความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ของสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ. จาก ทฤษฎีการกรองด้วยเมมเบรน. โดย แสง เกิดประทุม, 2540, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งประเทศไทย (วว.).

2.4 ทิศทางการไหลของน้ำในการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือก

แผ่นเยื่อเลือก (Membrane) หมายถึง แผ่นเยื่อเลือกสังเคราะห์บางๆ ของสารอินทรีย์ หรือสารอินทรีย์ ที่สามารถนำมาใช้ในการแยกสารออกจากกันหรือทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นที่อาจอยู่ในรูปของของแข็งกับของเหลว ของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับก๊าซ ซึ่งส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้ในการอุตสาหกรรมที่ต้องการเพิ่มหรือลดความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม เป็นต้น โดยในการแยกสารที่ใช้แผ่นเยื่อเลือกที่ทำหน้าที่เป็นตัวเลือกผ่านของสารแล้ว เพื่อให้ความสามารถในการแยกสารมีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงต้องทำการพิจารณาทั้งกลไกในการซึมแพร่ผ่านที่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นของสารระหว่างแผ่นเยื่อเลือกและความหนาของแผ่นเยื่อเลือก และกลไกการไหลผ่านรูพรุนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุน

ขนาดของอนุภาคสาร และความแตกต่างของแรงดันที่ใช้ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 1988) ซึ่งการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือกมี 2 ลักษณะคือ Dead End Filtration และ Crossflow Filtration แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบของการแยกสารโดยใช้แผ่นเยื่อเลือกแบบ Dead End Filtration และ Crossflow Filtration. จาก Cross-flow Filtration โดย <http://highlandfluid.com/cross-flow-filtration>

จากภาพดังกล่าวจะเห็นได้ว่าทั้งสองลักษณะนี้จะมีทิศทางในการไหลแตกต่างกัน ซึ่งทิศทางการกรองแบบ Crossflow Filtration จะทำให้เกิดการอุดตันของสารที่บริเวณหน้าแผ่นเยื่อเลือกช้ากว่าการกรองแบบ Dead End Filtration แต่ต้องใช้แรงดันสูงกว่าในการกรอง

2.5 ประเภทของแผ่นเยื่อเลือก (ชั้นทอง สุนทรภา, 2004)

ปัจจุบันได้มีการผลิตแผ่นเยื่อเลือกขึ้นมาหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ โดยเราสามารถแบ่งประเภทของแผ่นเยื่อเลือกได้ดังนี้

2.5.1 Isotropic Membranes

เป็นแผ่นเยื่อเลือกที่มีส่วนประกอบโครงสร้างสม่ำเสมอสามารถแบ่งได้อีก 3 ประเภทได้แก่

2.5.1.1 Microporous Membranes

เป็นแผ่นเยื่อเลือกประเภทนี้จะมีรูพรุนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นแยกสารโดยอาศัยการกรองติดค้างเช่นเดียวกับการกรองด้วยทราย แต่รูพรุนมีขนาดเล็กกว่าถึงกรองทรายมากคือ

จะอยู่ที่ 0.01 – 10 ไมครอน หลักการทำงานคือ การกรองดักสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวแผ่นเยื่อเลือก แผ่นเยื่อเลือกชนิดนี้จะใช้ในกระบวนการ ไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน และนาโนฟิลเตรชัน

2.5.1.2 Nonporous Dense Membranes

เป็นแผ่นเยื่อเลือกที่มีเนื้อแน่นและไม่มีรูพรุน หลักการทำงานของแผ่นเยื่อเลือกชนิดนี้คือ อาศัยความสามารถในการแพร่ผ่านแผ่นเยื่อเลือกของสารละลาย 2 ชนิด ที่อยู่แต่ละด้านของแผ่นเยื่อเลือก แผ่นเยื่อเลือกประเภทนี้จะมีความแน่นสูง ซึ่งจะถูกนำไปใช้กับกระบวนการออสโมซิสผันกลับ หรือใช้สำหรับแยกก๊าซ

2.5.1.3 Electrically Charge Membranes

เป็นแผ่นเยื่อเลือกประเภทที่อาจจะมีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุนก็ได้ แต่โดยทั่วไปจะมีรูพรุนขนาดเล็กมาก โดยที่ผนังของรูพรุนจะมีไอออนที่มีประจุลบหรือบวกติดแน่นอยู่ แผ่นเยื่อเลือกที่มีประจุบวกติดอยู่เรียกว่า Anion Exchange Membranes เพราะว่าไอออนลบในน้ำจะเข้ามาจับ ส่วนแผ่นเยื่อเลือกที่มีประจุลบเรียกว่า Cation Exchange Membrane ซึ่งในการแยกสารจะต้องอาศัยความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดประจุของไอออนที่อยู่ในน้ำเป็นหลัก โดยจะใช้ในการกำจัดไอออนเป็นหลัก แผ่นเยื่อเลือกประเภทนี้จะใช้กับอิเล็กโตรไดอะไลซิส

2.5.2 Anisotropic Membranes

อัตราการถ่ายเทมวลสารต่างๆผ่านแผ่นเยื่อเลือกนั้น จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของแผ่นเยื่อเลือก และสำหรับการกรองน้ำเพื่อให้ได้น้ำที่ผลิตมีปริมาณมากพอสมควรนั้น ความหนาแน่นของชั้นแผ่นเยื่อเลือกที่มีประสิทธิภาพไม่ควรเกิน 20 ไมครอน การพัฒนาระบบการประกอบแผ่นเยื่อเลือกต่างๆเข้าด้วยกันช่วยให้สามารถบรรลุเป้าหมายในการนำมาใช้งานจริงได้มากขึ้น โดยใช้เทคนิคของโครงสร้างแบบ Anisotropic ซึ่งวางแผ่นฟิล์มแผ่นเยื่อเลือกขนาดที่บางมากบนแผ่นฟิล์มรองรับ ซึ่งมีรูพรุนและความหนามากกว่า ที่เรียกว่า แผ่นเยื่อเลือกประกอบ (Thin Film Composite: TFC) ซึ่งแผ่นฟิล์มทั้งสองชั้นทำมาจากวัสดุโพลีเมอร์คนละชนิดกัน ประโยชน์ที่ได้จากแผ่นเยื่อเลือกประเภทนี้คือ ได้อัตราการกรองน้ำสูงขึ้นซึ่งในเชิงธุรกิจมักจะผลิตแผ่นเยื่อเลือกประเภทนี้

2.5.3 Ceramic Metal and liquid Membranes

โดยปกติแล้ววัสดุที่ใช้ผลิตแผ่นเยื่อเลือกส่วนใหญ่จะเป็นโพลีเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ แต่ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาการผลิตแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้วัสดุอย่างอื่น เช่น เซรามิก โดยใช้เป็นแผ่นเยื่อเลือกที่มีรูพรุนที่ใช้กับกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อให้ทนทานต่อสารตัวทำละลาย และมีความเสถียรภาพต่อความร้อนโลหะ เช่น พัลลาเดียม สามารถที่จะใช้ผลิต

แผ่นเยื่อเลือกเนื้อแน่นสำหรับแยกก๊าซไฮโดรเจนเพื่อทำให้บริสุทธิ์ได้ พิล์มชั้นของเหลวก็สามารถที่จะนำมาผลิตเป็นแผ่นเยื่อเลือกเหลว (Liquid Membranes) ได้เช่นกัน

2.6 แผ่นเยื่อเลือกที่นิยมใช้ในกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ

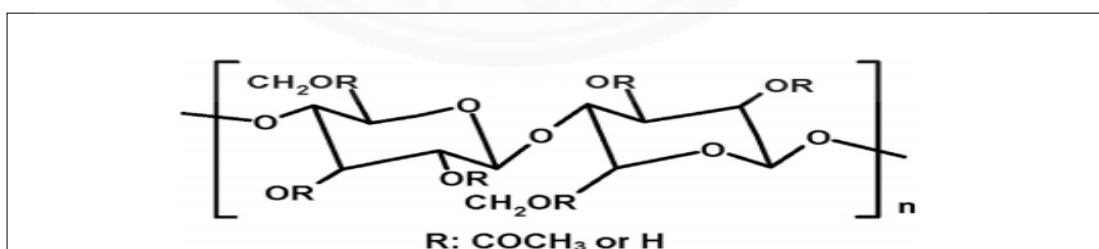
แผ่นเยื่อเลือกที่นิยมใช้ในกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ มี 2 ชนิด (แสงเกิดประทุม, 2540) คือ

2.6.1 Cellulose Acetate (CA)

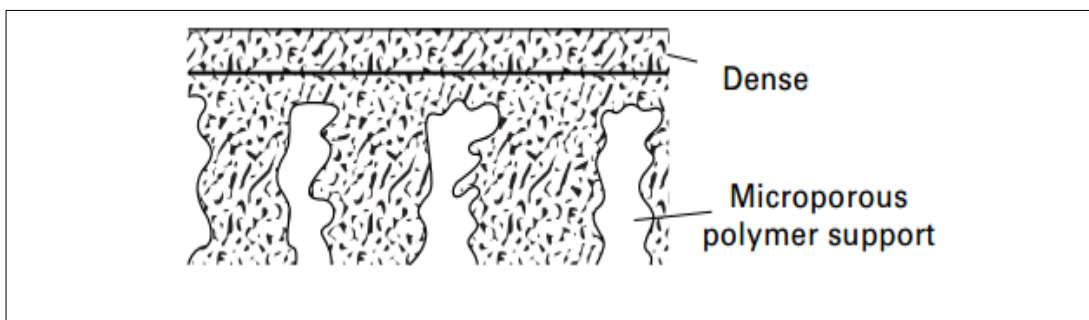
เป็นแผ่นเยื่อเลือกที่มีการนำมาใช้ขึ้นรูปประมาณ 70 ปีมาแล้ว เนื่องจากมีการขึ้นรูปง่าย และมีความสามารถในการแยกสารละลายในน้ำได้ดี มีสูตรโครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือกแสดงดังภาพที่ 2.8 และในปัจจุบันเป็นแผ่นเยื่อเลือกที่มีความนิยมอย่างมากสำหรับใช้ในกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ เพราะมีข้อดีหลายด้านดังนี้คือ ทนต่อการทำลายจากพวกแบคทีเรีย (Bacteria) ทนต่อสารพวก Oxidizing Agent เช่น Cl_2 ได้สูงถึง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และราคาค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นเยื่อเลือกชนิดอื่นๆ และที่สำคัญมีความสามารถในการแยกเกลือสูง แต่ยังคงมีข้อเสีย คือ มีค่าฟลักซ์ของน้ำต่ำ เนื่องจากมีความพรุนในส่วนของ Dense ต่ำแสดงดังภาพที่ 2.9 ทำให้ต้องใช้พื้นที่หรือปริมาณของแผ่นเยื่อเลือกในการแยกค่อนข้างมาก

2.6.2 Thin Film Composite Polyamide

เป็นแผ่นเยื่อเลือกที่มีการพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาในเรื่องของการเกิดตระกานจากสารอินทรีย์ และสามารถทำงานในช่วง pH ที่กว้าง ซึ่งถือว่าเป็นข้อดี แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่หลายประการ เช่น สามารถทนทานต่อการทำลายจากพวกแบคทีเรียได้น้อย ไม่ทนต่อสาร Oxidizing Agent เช่น Cl_2 และที่สำคัญคือมีราคาสูงกว่าแผ่นเยื่อเลือกชนิดอื่น



ภาพที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของ Cellulose Acetate. จาก “Water vapor permeation through cellulose acetate membranes and its impact upon membrane separation performance for natural gas purification,” by George Q. Chen, Shinji Kanehashi, Cara M. Doherty, Anita J. Hill, & Sandra E. Kentish, 2015, *Journal of Membrane Science*, 487, 249-255.



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างภายในของ Cellulose acetate membrane. จาก *Membrane separation*. โดย J.D. Seader, Ernest J. Henley, & D. Keith Roper, 2011, United States: John Wiley & Sons.

2.7 วัสดุและการผลิตแผ่นเยื่อเลือกสังเคราะห์

แผ่นเยื่อเลือกสังเคราะห์อาจจะผลิตจากวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ โดยแผ่นเยื่อเลือกส่วนใหญ่จะถูกผลิตจากวัสดุอินทรีย์ที่เป็นโพลิเมอร์ โดยวิธีการผลิตแผ่นเยื่อเลือกนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้ และคุณสมบัติของแผ่นเยื่อเลือกที่ต้องการ ณ ที่นี้จะเป็นการกล่าวถึงการแบ่งชนิดลักษณะ และคุณสมบัติของแผ่นเยื่อเลือก กรรมวิธีการผลิตแผ่นเยื่อเลือกที่สำคัญตลอดจนรูปแบบแผ่นเยื่อเลือกและการเลือกใช้งาน

การแบ่งชนิดของแผ่นเยื่อเลือกสามารถแบ่งได้จากที่มาหรือวัสดุที่ใช้ในการผลิตว่ามาจากธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ขึ้น (ณ ที่นี้จะกล่าวถึงแผ่นเยื่อเลือกที่ได้จากการสังเคราะห์เท่านั้น) หรืออาจแบ่งตามโครงสร้างคือ แผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีรูพรุนหรือแผ่นเยื่อเลือกแบบแน่น และแผ่นเยื่อเลือกที่มีรูพรุน บางกรณีอาจแบ่งตามการใช้งาน เช่น แผ่นเยื่อเลือกสำหรับการแยกของแข็งกับของเหลว ของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับก๊าซ นอกจากนี้อาจแบ่งตามกลไกการทำงานของแผ่นเยื่อเลือก เช่น ถ้ากลไกการแยกเป็นการแพร่เรียกว่า Diffusive Membrane และถ้ากลไกการแยกเป็นการแลกเปลี่ยนประจุเรียกว่า แผ่นเยื่อเลือกแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-Exchange Membranes) เป็นต้น

Kesting (1971) กล่าวว่า โพลิเมอร์สำหรับผลิตแผ่นเยื่อเลือกส่วนใหญ่อาจจะสามารถนำมาผลิตเป็นแผ่นเยื่อเลือกได้ แต่เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโพลิเมอร์นั้นแตกต่างกันมาก จึงทำให้ในทางปฏิบัติมีโพลิเมอร์ที่สามารถนำมาผลิตเป็นแผ่นเยื่อเลือกได้จำนวนจำกัด การแบ่งชนิดของแผ่นเยื่อเลือกแบบหยาบๆตามโครงสร้างรูพรุน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แผ่นเยื่อเลือกแบบมีรูพรุน และแผ่นเยื่อเลือกแบบแน่น การแบ่งประเภทแผ่นเยื่อเลือกในแบบนี้จะมีผลในการเลือกชนิดวัสดุที่นำมาใช้

2.8 วิธีการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกโดยวิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase Inversion)

วิธีการเปลี่ยนเฟส (รัตนา จิระรัตนานนท์, 1988) ยังมีการแบ่งออกได้อีก 4 วิธีคือ Dry Process, Wet Process, Thermal Process และ Polymer Assisted Process แต่วิธีที่ง่ายและนิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ Wet Process โดยเป็นการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกจากสารละลายโพลิเมอร์ (Polymer Solution) เกิดการรวมตัวกับน้ำในระหว่างการขึ้นรูป หลังจากนั้นเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างร่างแห และเกิดโครงสร้างรูพรุน โดยการเกิดเจลแผ่นเยื่อเลือกที่ได้จะมีปริมาตรช่องว่างสูง กลไกของเฟสอินเวอร์ชัน เกิดขึ้นเมื่อสารละลายโพลิเมอร์ถูกนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม หลังจากนั้นทิ้งไว้ในอากาศปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยออกจากฟิล์มบางส่วน จึงเกิดการแข็งตัวของสารละลายโพลิเมอร์ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.8.1 การเตรียมขั้นที่หนึ่ง

เมื่อผสมสารละลายโพลิเมอร์และทำการกวน จะได้สารละลายโพลิเมอร์ที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Sol) แสดงดังภาพที่ 2.10(a)

2.8.2 การเตรียมขั้นที่สอง

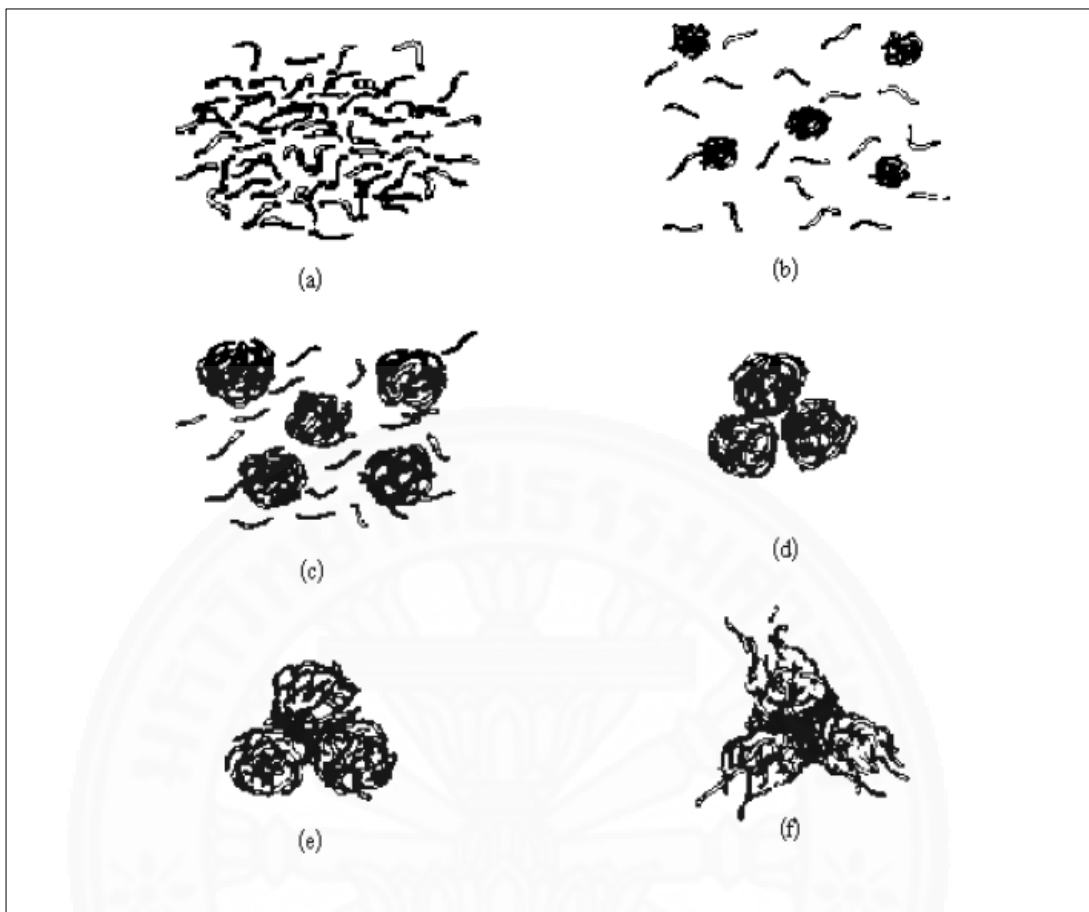
เมื่อเริ่มมีการระเหยของตัวทำละลายจะเกิดการแยกเฟสเกิดเป็น Sol 2 โดยสายโซ่สั้นๆของโพลิเมอร์ส่วนใหญ่เคลื่อนที่เข้าหากันเกิดเป็นหยด (Micelle) และเมื่อปริมาณของตัวทำละลายลดน้อยลงเรื่อยๆจะทำให้หยดของของเหลวเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้นแสดงดังภาพที่ 2.10(b)

2.8.3 การเตรียมขั้นที่สาม

เมื่อเกิดกระบวนการแบบเปียกหลังจากการขึ้นรูปบนแผ่นกระจก และการระเหยของตัวทำละลายแล้วนำแผ่นเยื่อเลือกไปจุ่มในอ่างน้ำ ตัวทำละลายจะแพร่เข้าไปในตัวไม่ละลาย (น้ำ) ระหว่างเกิด Coagulation น้ำบางส่วนก็แพร่เข้าไปในแผ่นเยื่อเลือกได้เช่นเดียวกันแสดงดังภาพที่ 2.10(c)

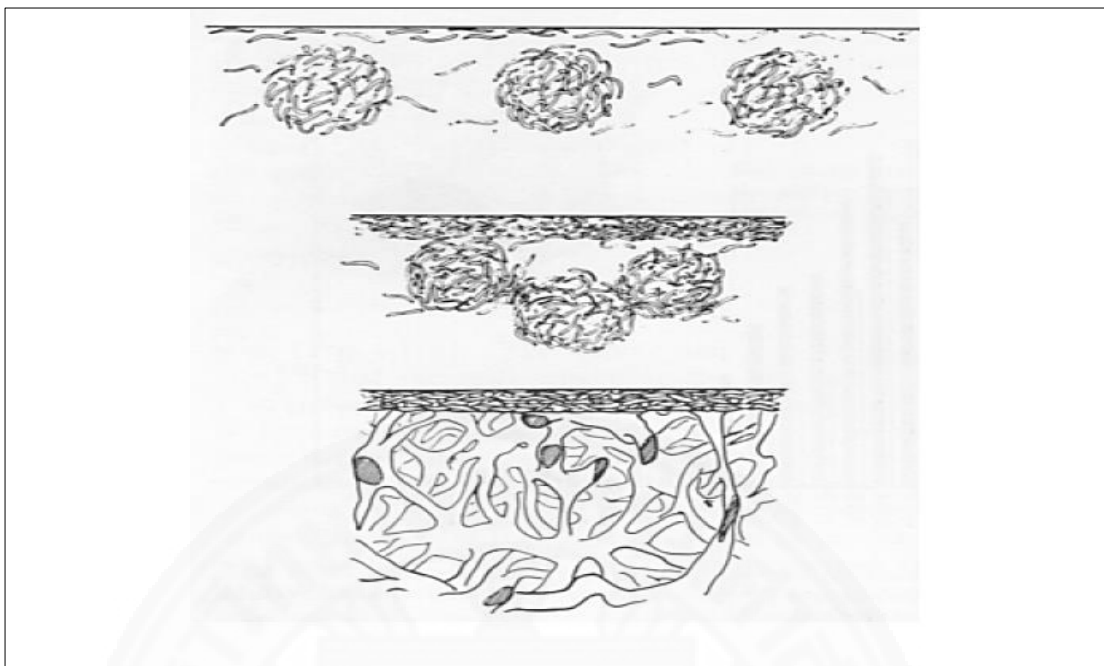
2.8.4 การเตรียมขั้นที่สี่

โมเลกุลของโพลิเมอร์จะแพร่หรือแลกเปลี่ยนกันระหว่างหยด ถ้าผนังของหยดบางจะทำให้เกิดการหดตัวของหยดของเหลว ซึ่งขณะนี้อยู่ในสภาพของเจล (หยดของเหลวที่ต่อกันเป็นร่างแห) อาจทำให้ผนังของหยดฉีกขาดแล้วเกิดช่องว่างที่มีลักษณะคล้ายท่อต่อถึงกัน ซึ่งก็คือรูพรุนเปิดในแผ่นเยื่อเลือก ในทางตรงกันข้ามถ้าผนังของหยดมีโพลิเมอร์เคลือบอยู่มาก ผนังจะฉีกขาดยาก ทำให้ได้รูพรุนปิดแสดงดังภาพที่ 2.10(d) และ 2.10(f)



ภาพที่ 2.10 การเกิดรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกโดยวิธีการเปลี่ยนเฟส. จาก กระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อเลือก. โดย รัตนา จิระรัตนานนท์, 1988, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

แผ่นเยื่อเลือกที่ผลิตโดยกระบวนการแบบเปียกนั้นส่วนใหญ่จะมีลักษณะไม่สมมาตร เนื่องจากการระเหยของตัวทำละลายเร็วกว่าส่วนล่าง (ก่อนจุ่มแผ่นเยื่อเลือกในตัวไม่ละลาย) ทำให้โมเลกุลของโพลิเมอร์เข้าใกล้ชิดกันอย่างรวดเร็วทำให้เกิดชั้นผิวแสดงดังภาพที่ 2.11 ถ้ายังระเหยนาน ชั้นผิวก็จะหนาขึ้น แผ่นเยื่อเลือกที่ได้จะมีความต้านทานต่อการไหลสูง ชั้นผิวมีโครงสร้างแน่นหรือไม่มีรูพรุน ความหนาประมาณ 0.1-1.0 ไมครอน ส่วนชั้นรองรับซึ่งมีกลไกการเกิดรูพรุนมีความหนา 100-200 ไมครอน แผ่นเยื่อเลือกที่ได้จากกระบวนการนี้นำไปใช้ในกระบวนการกรองระดับออสโมซิสแบบผันกลับ หรืออัลตราฟิเตรชัน



ภาพที่ 2.11 การเกิดขึ้นผิวและการเกิดรูพุนในชั้นรองรับของแผ่นเยื่อเลือกที่ผลิตโดยวิธีการเปลี่ยนเฟส. จาก กระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อเลือก. โดย รัตนา จิระรัตนานนท์, 1988, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

2.9 ผลของตัวแปรที่มีต่อการเตรียมแผ่นเยื่อเลือก (รัตนา จิระรัตนานนท์, 1988)

2.9.1 ตัวแปรที่มีผลต่อส่วนประกอบของสารละลายโพลิเมอร์

ความสามารถในการแยกสารละลายของแผ่นเยื่อเลือกขึ้นกับชนิดของโพลิเมอร์ ในขณะที่ลักษณะโครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือกขึ้นอยู่กับตัวทำละลาย ตัวไม่ทำละลาย สารพองตัว และความเข้มข้นของโพลิเมอร์ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

2.9.1.1 โพลิเมอร์

จะต้องละลายในตัวทำละลายได้ดี หรือละลายได้ดีในตัวทำละลายชนิดหนึ่งมากกว่าชนิดอื่นๆ (ในกรณีที่มีตัวทำละลายมากกว่า 1 ชนิด) เพื่อให้ได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันไม่เกิดการแยกเฟส และโพลิเมอร์ที่นำมาขึ้นรูปแผ่นเยื่อเลือกควรมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) เพื่อจะทำให้ฟลักซ์สูงขึ้น ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตต หรือโพลิเอไมด์ เป็นต้น

2.9.1.2 ตัวทำละลาย

ควรมี Polarity ต่ำๆ หรือมี Surface activity ต่ำๆ เพื่อที่จะได้ไม่เกิดการแยกเฟสก่อนขั้นตอนการระเหยตัวทำละลาย เช่น อะซิโตน เอ็น เอ็น-ไดเมทิล ฟอร์มาลไมด์ (N-Dimethyl Formamide) เมทิลฟอร์มาไมด์ และโพรพิลีนออกไซด์ เป็นต้น

2.9.1.3 ตัวไม่ทำละลาย

ต้องใส่ในปริมาณที่พอเหมาะจะทำให้ช่องว่างในโครงสร้างของเจลเพิ่มขึ้น เช่น น้ำ แอลกอฮอล์บางชนิดที่เป็นสารโพลาร์ และมีความเป็น Non-solvent น้อยกว่าน้ำ (ค่อนข้างสารพองตัว) ได้แก่ เมทานอล เอทานอล กลีเซอรอล กรดฟอร์มิก เป็นต้น

2.9.1.4 สารเติมแต่ง

เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อให้แผ่นเยื่อเลือกเกิดการเปลี่ยนเฟสและมีโครงสร้างเป็นเซลล์เปิด ทำให้แผ่นเยื่อเลือกที่ได้มีความต้านทานในการไหลต่ำ และสารเติมแต่งควรเป็นสารที่มีคุณลักษณะ ไม่ระเหยง่ายและละลายในน้ำได้ดี ได้แก่ แมกนีเซียมเปอร์คลอเรต ลิเทียม คลอไรด์ เตตระไฮโดรฟิวแรน เอทิลีนไกลคอล และโพลีเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น ในกรณีที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง จะไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส แผ่นเยื่อเลือกจะมีลักษณะแน่น มีความต้านทานการไหลสูง เมื่อมีปริมาณสารเติมแต่งค่อนข้างสูง เซลล์ปิดจะถูกแทนด้วยเซลล์เปิดทำให้ความสามารถในการไหลผ่านสูงขึ้น

2.9.1.5 ความเข้มข้นของสารละลาย

จะขึ้นอยู่กับปริมาณโพลิเมอร์ และตัวทำละลาย ซึ่งทำหน้าที่ละลายโพลิเมอร์ และสารพองตัวให้เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายความหนืดสูงขึ้น มีผลทำให้ขนาดรูพรุน และฟลักซ์ผ่านแผ่นเยื่อเลือกที่ผลิตได้ลดลง แสดงว่ามีตัวทำละลายไม่เพียงพอที่จะใช้ทำละลายพันธะสายโซ่ของโพลิเมอร์ เมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ตัวทำละลายเริ่มระเหยจะเกิดเป็นหยดกลมได้ยากขึ้น การที่รูพรุนจะติดต่อกันเป็นไปได้อย่างขึ้น ความต้านทานการไหลผ่านสูงขึ้น ทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และฟลักซ์ลดลง

2.9.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเตรียมและการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือก

2.9.2.1 วิธีการเตรียมสารละลายโพลิเมอร์

การเตรียมสารละลายสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีผสม (Mixing Method) ซึ่งหมายถึงการนำองค์ประกอบมาผสมกันแล้วกวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และวิธีละลาย (Dissolving Method) ซึ่งหมายถึงการปล่อยสารละลายไว้ให้เกิดการละลายอย่างช้าๆจนเป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปขึ้นรูปแผ่นเยื่อเลือก สำหรับแผ่นเยื่อเลือกที่ผลิตจากสารละลายที่เตรียมโดยวิธีผสมนั้นจะทำให้สายโซ่ของโพลิเมอร์สั้นลงมากกว่า และมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นหยดกลมเล็กๆได้ง่ายกว่า และเกิดเป็นโครงสร้างเซลล์เปิดจำนวนมากในชั้นรองรับโครงสร้างจึงแข็งแรงกว่าการเตรียมโดยวิธีการละลาย (ความแข็งแรงของโครงสร้างขึ้นกับเซลล์เปิดที่เกิดขึ้นในชั้นรองรับ) ที่จะให้มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าและฟลักซ์สูงขึ้น

2.9.2.2 ช่วงเวลาการปรับตัวของสารละลาย (Maturation Time)

ช่วงเวลาของการปรับตัวของสารละลาย หมายถึง ช่วงเวลาที่ปล่อยสารละลายไว้หลังจากได้ผสมสารละลายโดยวิธีใดวิธีหนึ่งแล้ว ในช่วงดังกล่าวตัวทำละลายก็จะละลาย

โพลิเมอร์ ดังนั้น ถ้ามีการปรับตัวนาน ตัวทำละลายจะทำให้สายโซ่ของโพลิเมอร์มีขนาดสั้นลงและ
 แนวนุ่มทำให้เกิดการรวมตัวของโพลิเมอร์ให้เป็นหยดกลมเล็กๆได้ง่ายกว่า และทำให้แผ่นเยื่อเลือกมี
 เซลเปิดมากขึ้น รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นฟลักซ์ก็จะเพิ่มขึ้น ถ้าเวลาในการปรับตัวนานเกินไปสายโซ่โพลิ
 เมอร์จะสั้นมากก็พบว่าทำให้ฟลักซ์ลดลงได้

2.9.2.3 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity)

อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น มีผลทำให้การระเหยของตัวทำละลาย
 จากแผ่นเยื่อเลือกช้าลงชั้นผิวบางและทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และความสามารถในการไหลผ่านแผ่น
 เยื่อเลือกเพิ่มขึ้น

2.9.2.4 เวลาในการระเหย (Evaporation Time)

จากการศึกษากลไกการเกิดรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกที่เตรียมจาก
 เซลลูโลสอะซิเตต พบว่าเมื่อทำการขึ้นรูปสารละลายโพลิเมอร์บนแผ่นแก้วแล้วทิ้งให้ตัวทำละลาย
 ระเหยไปบางส่วนจากแผ่นฟิล์มก่อนที่จะแช่ลงในน้ำ เมื่อปล่อยให้เวลาในการระเหยนานขึ้น ความ
 หนาจะเพิ่มขึ้น แต่ค่าฟลักซ์จะมีค่าลดลง อธิบายได้ว่าเมื่อตัวทำละลายระเหยออกไปมากขึ้นจะเกิดชั้น
 ผิว (Dense) หนามากขึ้น ทำให้ความต้านทานในการไหลสูงขึ้น และขณะเกิดรูพรุนหยดของเหลวจะมี
 ขนาดเล็กมาก รูพรุนมีขนาดเล็ก ความสามารถในการไหลผ่านจึงต่ำลง แผ่นเยื่อเลือกที่ได้จึงมีลักษณะ
 โปร่งแสงมากขึ้น

2.9.2.5 อุณหภูมิของอ่างน้ำ

ขณะที่ฟิล์มของสารละลายโพลิเมอร์ที่จุ่มในอ่างน้ำจะเกิด gelation เป็น
 Double-diffusion process โดยตัวทำละลายและสารพองตัวจะแพร่ออกจากแผ่นเยื่อเลือก
 ขณะเดียวกันน้ำก็จะแพร่เข้าไปในแผ่นเยื่อเลือก เมื่ออุณหภูมิของอ่างน้ำสูงขึ้น การเกิด gelation ก็
 จะเร็วขึ้นทำให้ขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้น และเกิดการบวมน้ำ (Water Swollen) ทำให้ความสามารถในการ
 ไหลผ่านเพิ่มขึ้น การแยกส่วนมากจะลดลง

2.9.2.6 การปรับสภาพแผ่นเยื่อเลือกด้วยความร้อน (Annealing)

เป็นการนำแผ่นเยื่อเลือกมาผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อน ทำให้
 ขนาดของรูพรุนในแผ่นเยื่อเลือกเล็กลง เนื่องจากหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl Group) ในเซลลูโลสอะซิ
 เตตแตกออกเกิดพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสอะซิเตตเข้าใกล้กันมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้รู
 พรุนของแผ่นเยื่อเลือกเล็กลง ฟลักซ์จึงลดลง และเมื่อมีการใช้อุณหภูมิปรับสภาพแผ่นเยื่อเลือกสูงขึ้น
 ความเป็นรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกลดลง ในขณะที่ร้อยละการแยกสูงขึ้น

2.10 ผลของตัวแปรที่มีต่อฟลักซ์และการแยกสารละลาย

ตัวแปรที่มีต่อฟลักซ์และการแยกสารละลายของแผ่นเยื่อเลือก (รัตนา จิระรัตนานนท์, 1988) ประกอบด้วย

2.10.1 ความดัน

เมื่อความดันที่ให้แก่ระบบสูงขึ้น จะทำให้ค่าฟลักซ์ของตัวทำละลายสูงขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการแยกสารมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความดันที่สูงขึ้นจะทำให้ตัวถูกละลายผ่านแผ่นเยื่อเลือกได้มากขึ้นและหลังจากเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน การเพิ่มความดันจะไม่มีผลต่อฟลักซ์ของตัวทำละลายอีกต่อไป

2.10.2 ความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น ฟลักซ์และการแยกสารจะลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ความแตกต่างของความดันออสโมซิสสารละลายเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแตกต่างของความดัน ที่ให้แก่สารละลายนั้นยังคงที่

2.10.3 อุณหภูมิ

จะมีผลต่อพลังงานจลน์ของโมเลกุลสารละลาย ถ้าอุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลายจะสูงขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ฟลักซ์ของตัวทำละลายสูงขึ้นแต่ความสามารถในการแยกสารอาจจะลดลง

2.10.4 ความเร็วในการไหล

การไหลของสารละลายที่เร็วขึ้นจะก่อให้เกิดแรงเฉือนที่มากขึ้นซึ่ง เป็นการลดการสะสมของตัวถูกละลายบนผิวแผ่นเยื่อเลือกให้น้อยลงทำให้ฟลักซ์ของตัวทำละลายจึงสูงขึ้น

2.10.5 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ทำให้เกิดขึ้นของตัวถูกละลายบนผิวแผ่นเยื่อเลือก มีผลทำให้ฟลักซ์ของตัวทำละลายลดลง ส่วนการแยกอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นตัวถูกละลายว่ามีลักษณะที่จะทำให้ตัวถูกละลายผ่านไปได้หรือไม่

2.11 ลักษณะการอุดตันบนแผ่นเยื่อเลือก

การอุดตันบนแผ่นเยื่อเลือก (โกวิท คะลา, 1996) มีผลต่อการกรองเป็นอย่างมากหากเกิดการอุดตันแล้วจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกรองบนแผ่นเยื่อเลือกจะทำให้ฟลักซ์ที่ผ่านแผ่นเยื่อเลือกมีค่าลดลงซึ่งนำไปสู่การอุดตันได้มีดังนี้

2.11.1 ลักษณะการเกิดการอุดตันบนแผ่นเยื่อเลือก

2.11.1.1 ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization: CP)

เป็นปรากฏการณ์ที่พบโดยทั่วไปบนแผ่นเยื่อเลือกคือ การสะสมของอนุภาคหรือโมเลกุลของตัวถูกละลายที่บริเวณผิวของแผ่นเยื่อเลือกภายในชั้น Boundary Layer ซึ่งเป็นชั้นที่ใกล้ผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือกโดย CP จะเกิดในสารละลายไปสิ้นสุดที่ผิวหน้าแผ่นเยื่อเลือกซึ่งในชั้นนี้จะเป็นอิสระและขัดขวางการไหลผ่านแผ่นเยื่อเลือกความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าแผ่นเยื่อเลือกจะมีความเข้มข้นสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป

2.11.1.2 การเกิดชั้นเจล (Gel Layer)

การเกิดชั้นเจลเป็นชั้นของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ที่สะสมอยู่ในบริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือก จะพบมากในกระบวนการอัลตราฟิวเตรชันเมื่อความเข้มข้นของสารดังกล่าวที่ผิวหน้าแผ่นเยื่อเลือกสูงขึ้น จนถึงขีดจำกัดการละลายของตัวถูกละลายซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับเจลที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าแผ่นเยื่อเลือกทำให้ความต้านทานการไหลนั้นสูงมากขึ้นกว่าเดิมอัตราการไหลของสารละลายจะมีค่าลดลงจากค่าเดิม และยังทำให้ค่า Recovery สารของแผ่นเยื่อเลือกเปลี่ยนแปลงด้วยการเกิดชั้นเจลสามารถทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นได้โดยการเปลี่ยนสภาวะการทำงานหรือการล้างน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้นั่นเอง

2.11.1.3 การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation)

การเกิดชั้นเค้กเป็นกลไกที่มีความใกล้เคียงกันในการเกิดของชั้นเจลแต่มีความแตกต่างกันระหว่างชั้นเค้กและชั้นเจล คือชั้นเค้กจะเป็นการสะสมของอนุภาคของสารหรือสารแขวนลอย แต่ชั้นเจลจะเป็นการสะสมของสารโมเลกุลขนาดใหญ่ ถ้าในสารละลายนั้นประกอบด้วยสารที่มีอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปนกันอยู่ สารอนุภาคขนาดเล็กจะถูกสะสมในรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกจนแน่นต่อจากนั้นจะเกิดการสะสมของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ตามมาแล้วเกิดเป็นชั้นเค้กที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือก และเมื่อทำการเทียบในเรื่องของการวัดความหนาแล้วชั้นเจลจะมีความหนาในระดับไมครอนแต่ชั้นเค้กจะมีความหนาเป็นมิลลิเมตร

2.11.1.4 การอุดตันรูพรุน (Pore Blockage)

การอุดตันรูพรุนคือ การอุดตันรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกซึ่งลักษณะการเกิดการอุดตันของแผ่นเยื่อเลือกที่มีรูพรุนขนาดต่างๆเมื่อเทียบกับตัวถูกละลาย

1. ถ้าแผ่นเยื่อเลือกมีขนาดของรูพรุนที่แน่นและมีขนาดเล็กกว่าตัวถูกละลายเล็กน้อยจะทำให้เกิดการอุดตันที่ผิวของแผ่นเยื่อเลือก
2. ถ้าแผ่นเยื่อเลือกมีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายเล็กน้อยทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนก่อนต่อจากนั้นจะเริ่มสะสมที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือกส่วนมากจะมี

การอุดตันบนผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือกเป็นส่วนใหญ่

3. ถ้าแผ่นเยื่อเลือกมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายมากก็ที่จะทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนก่อนแล้วต่อจากนั้นจะเกิดการสะสมบริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือก

2.11.2 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนแผ่นเยื่อเลือก

สิ่งที่มีผลที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนแผ่นเยื่อเลือกและทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งปัจจัยเริ่มต้นมาจากคุณภาพของน้ำที่นำมาผ่านแผ่นเยื่อเลือก คุณลักษณะของแผ่นเยื่อเลือก ความดัน ความเข้มข้นของสารละลาย ความแรงประจุ (Ionic Strength) ค่า pH และอุณหภูมิของสารละลาย ขนาดน้ำหนัโมเลกุลของสาร ลักษณะการกรองผ่านแผ่นเยื่อเลือก เป็นต้น

2.11.2.1 ขนาดของรูพรุน

ขนาดของรูพรุน หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดความกว้างของรูพรุน ดังนั้นแผ่นเยื่อเลือกแบบไมโครฟิลเตรชันจะถูกจัดว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ และสำหรับอัลตราฟิลเตรชันนั้นเป็นขนาดกลาง และถ้าขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตรนิยมเรียกว่า แผ่นเยื่อเลือกแบบแน่นมากกว่าที่เรียกว่า แผ่นเยื่อเลือกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2.11.2.2 ประจุหรือความมีขั้วของแผ่นเยื่อเลือก

จากการที่อัตราการไหลและค่า Recovery ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างแผ่นเยื่อเลือกและตัวถูกละลายทำให้ผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจและสามารถที่จะเลือกแผ่นเยื่อเลือกให้เหมาะสมกับตัวถูกละลายที่ต้องการจะทำการแยกเช่น เซลลูโลสอะซิเตต และโพลิเอไมด์ จะแสดงความเป็นขั้วเล็กน้อยในขณะที่โพลิเมอร์อื่นๆอาจจะมีคุณสมบัติที่เป็นกลาง

2.11.2.3 ความดัน

สารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถเกิดเจลได้ที่มีความเข้มข้นสูงจะมีผลต่อความดันของฟลักซ์คือ ฟลักซ์กับความดันจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกหรือก่อนการเกิดเจล และในช่วงเกิดเจลความดันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ชั้นเจลอัดแน่น ฟลักซ์จึงไม่เพิ่มขึ้นแต่มีแนวโน้มคงที่ ส่วนของการแยกสารจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นเจลส่วนระบบที่ความเข้มข้นต่ำและตัวถูกละลายไม่สามารถเกิดเจลได้การเพิ่มความดันทำให้ ฟลักซ์เพิ่มขึ้นแต่อัตราการเพิ่มมักจะช้าลงในช่วงความดันสูงขึ้นเนื่องจากผลของความเข้มข้นด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (Cp)

2.11.2.4 ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (Hydrophilicity and Hydrophobicity)

แผ่นเยื่อเลือกที่มีคุณสมบัติชอบน้ำจะให้มุมสัมผัส (Contact Angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือกกับเส้นสัมผัสหยดน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0-90 องศาโดยค่ามุมสัมผัสที่ต่ำกว่าแสดงว่าสามารถทำให้แผ่นเยื่อเลือกเปียกน้ำได้มากขึ้นแผ่นเยื่อเลือกที่ชอบน้ำมากๆจะทำให้โมเลกุลน้ำมารวมกันเกิดเป็นชั้นน้ำบริสุทธิ์ที่ผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือก ในขณะที่เดียวกันจะผลัก

โมเลกุลของสารอื่นให้ห่างออกไปจากผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือกจึงเกิดการถ่ายโอนเฉพาะโมเลกุลน้ำผ่านแผ่นเยื่อเลือกออกไปทางรูพรุนหรือในกรณีของแผ่นเยื่อเลือกแบบเนื้อแน่นจะเกิดการดูดซับโมเลกุลน้ำเข้าไปในเนื้อแผ่นเยื่อเลือกและแพร่ผ่านแผ่นเยื่อเลือกออกไปอีกด้านหนึ่งส่วนอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำมักมีสมบัติไม่ชอบน้ำมีแนวโน้มชอบจับตัวกันเป็นอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particle) และชอบที่จะเข้าจับติดกับผิวของแผ่นเยื่อเลือกส่งผลให้คุณสมบัติความชอบน้ำของแผ่นเยื่อเลือกเสียไปทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุนบนแผ่นเยื่อเลือกเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ความสกปรกของผิว (Fouling)”

2.11.2.5 ความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นมีผลต่อการอุดตันของแผ่นเยื่อเลือกจากการเกิด Concentration polarization ชั้นของสารที่สัมผัสผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือกคือชั้น Boundary Layer หากสารละลายมีความเข้มข้นมากการสะสมตัวของสารละลายเช่นสารอินทรีย์จะไปตกอยู่ในชั้นนี้ทำให้ผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือกมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงกว่าบริเวณที่ห่างจากผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือกออกไป หากไม่มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อเลือกจะทำให้เกิด Concentration polarization ได้ดียิ่งขึ้นซึ่งส่งผลต่อการอุดตันตามมาต่อไป

2.11.2.6 ค่า pH และอุณหภูมิของสารละลาย

การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแต่ละองศาในช่วง 15-30 องศาเซลเซียสช่วยให้อัตราการซึมผ่านแผ่นเยื่อเลือกมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์เพราะอุณหภูมิมีผลต่อความหนืดของน้ำ ค่า pH ของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีผลต่อค่าฟลักซ์ที่ลดลงซึ่งจากการศึกษาของ Kilduff (2004) ทำการทดลองที่ค่า pH 4 7 และ 10 พบว่าค่าความดันออสโมติกที่ค่า pH 4 มีค่าต่ำกว่าที่ค่า pH 7 และ 10 จึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ด้วยอัตราที่สูงกว่า

2.11.2.7 ค่าน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Cutoff)

คือค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารที่ถูกทดสอบที่ถูกแผ่นเยื่อเลือกกักไม่ให้ผ่าน 90-95% ซึ่งขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะใช้ทำการศึกษถึงการอุดตันของแผ่นเยื่อเลือกโดยจะสังเกตการณ์ลดลงของค่าฟลักซ์ที่ผ่านแผ่นเยื่อเลือกหากสารที่นำมากรองผ่านแผ่นเยื่อเลือกมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนมากๆจะทำให้เกิดการอุดตันได้ ซึ่งจากการกรองผ่านแผ่นเยื่อเลือกแบบอัลตราฟิลเตรชันด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลช่วง 6.5-22.6 kDa พบว่าทำให้เกิดการอุดตันอย่างรุนแรง

2.12 คุณสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพการแยกสารของแผ่นเยื่อเลือก

2.12.1 การพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตต

การพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพที่นอกจากจะเป็นการพิจารณาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการประมาณค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกจากโปรแกรม SemAfore (Version 5.21) แล้วยังสามารถพิจารณาได้จากค่าความเป็นรูพรุน (Porosity) (J. Sikder and etc., 2009) ที่สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 หรือค่าการกักเก็บน้ำ (Water Content) (Reza Abedini and etc., 2011) ตามสมการที่ 2

$$\% \text{Porosity} = \frac{(W_w - W_d)}{d_{\text{water}}} \times \frac{100}{w \times l \times t} \quad (2.1)$$

$$\% \text{Water content} = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ	W_w	คือ	น้ำหนักเปียกของแผ่นเยื่อเลือก (g)
	W_d	คือ	น้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือก (g)
	d_{water}	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (g/cm^3)
	w	คือ	ความกว้างของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียก (cm)
	l	คือ	ความยาวของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียก (cm)
	t	คือ	ความหนาของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียก (cm)

2.12.2 การพิจารณาประสิทธิภาพการแยกของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตต

ประสิทธิภาพการแยกของแผ่นเยื่อเลือกเพื่อทดสอบในเรื่องของการนำไปใช้สามารถพิจารณาได้จากค่าฟลักซ์ และค่าประสิทธิภาพการแยกเกลือ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 ดังต่อไปนี้

2.12.2.1 ค่าฟลักซ์ของน้ำที่กรองได้ (Water Permeation Flux)

(Muhammad Zafar and etc., 2012)

$$J = \frac{Q}{A \times \Delta t} \quad (2.3)$$

เมื่อ	J	คือ	ฟลักซ์ของน้ำ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)
	Q	คือ	ปริมาตรของน้ำหรือสารละลายด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (m^3)

A	คือ	พื้นที่แผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ทดสอบ (m^2)
Δt	คือ	เวลาที่ใช้ทดสอบ (hr)

2.12.2.2 ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (Salt Rejection) (L. Zou and etc., 2011)

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2.4)$$

เมื่อ	R	คือ	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (%)
	C_p	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (%wt)
	C_f	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้าแผ่นเยื่อเลือก (%wt)

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sourirajan (1970) ได้เริ่มทำการศึกษาศึกษาการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตต โดยใช้เซลลูโลสอะซิเตตเป็นสารละลายโพลิเมอร์ อะซิโตน และน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย และใช้แมกนีเซียมเปอร์คลอเรตเป็นสารเติมแต่ง โดยนำแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบประสิทธิภาพค่าฟลักซ์ของน้ำ โดยพบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้มีค่าฟลักซ์เท่ากับ 270 ลิตรต่อตารางเมตรต่อวัน

Schwarz และ Hicke (1981) ได้ทำการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกจากเซลลูโลสอะซิเตต โดยเปลี่ยนสัดส่วนของเซลลูโลสอะซิเตต ระหว่างร้อยละ 17.5 ถึง 21.0 โดยมวล พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้สัดส่วนของเซลลูโลสอะซิเตตสูง มีความพรุนที่ผิวและจำนวนรูต่อพื้นที่แผ่นเยื่อเลือกต่ำกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้สัดส่วนของเซลลูโลสอะซิเตตต่ำ และมีค่าฟลักซ์ลดลง ในขณะที่ร้อยละการแยกสารละลายโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น

โกวิทย์ คะลา (1996) ได้ทำการศึกษาศึกษาการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase Inversion Method) โดยทำการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกที่มีการเติมสารเติมแต่ง และแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง โดยใช้เซลลูโลสอะซิเตตเป็นสารละลายโพลิเมอร์ อะซิโตน และน้ำเป็นตัวทำละลาย และแมกนีเซียมเปอร์คลอเรตเป็นสารเติมแต่ง โดยทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของแมกนีเซียมเปอร์คลอเรตในสารละลายโพลิเมอร์ร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 โดยน้ำหนักในขณะที่องค์ประกอบอื่นคงเดิมไว้ และมีการทดลองเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเซลลูโลสอะซิเตตในสารละลายเป็นร้อยละ 13.2, 15.0 และ 18.6 โดยมวล จากผลการ

ทดลองค่าฟลักซ์ของน้ำ พบว่าในสารละลายโพลิเมอร์ที่มีสัดส่วนของแมกนีเซียมเปอร์คลอเรตร้อยละ 1.0 โดยมีมวลให้ค่าฟลักซ์สูงสุดที่ 56.10 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง และค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดสัดส่วนของเซลลูโลสอะซิเตตในสารละลายโพลิเมอร์ลง และได้นำแผ่นเยื่อเลือกมาทดลองแยกสารละลายฟีนอล โดยพบว่าร้อยละการแยกสารละลายฟีนอลที่มีค่า pH 9 ให้ค่าสูงถึง 88.03 และค่าฟลักซ์ในการแยกสารละลายฟีนอลมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง

Jeong-Hoon Kim และ Kew-Ho Lee (1998) ได้ทำการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟสที่ประกอบด้วยโพลีซัลโฟน เอ็น-เมทิล-2-ไพโรลิโดน และโพลีเอทิลีนไกลคอลที่เป็นสารเติมแต่ง เพื่อใช้ในกระบวนการอัลตราฟิวเตรชัน เพื่อแยกสารละลายโพลีเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 12,000 และ 35,000 กรัมต่อโมล และทำการศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งโพลีเอทิลีนไกลคอลที่มีมวลโมเลกุลแตกต่างกันตั้งแต่ 600-6,000 กรัมต่อโมล โดยทำการวิเคราะห์ความแตกต่างกันด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่มวลโมเลกุลของสารเติมแต่งสูงๆ จะทำให้ขนาดของรูพรุนบนพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น และทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้น แต่ค่าประสิทธิภาพในการแยกของตัวถูกละลายลดน้อยลง

B.Chakrabarty และคณะ (2008) ได้ทำการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกจากโพลีซัลโฟนเป็นสารละลายโพลิเมอร์, เอ็น-เมทิล-2-ไพโรลิโดนเป็นตัวทำละลาย และโพลีเอทิลีนไกลคอลที่เป็นสารเติมแต่ง โดยทำการศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงของมวลโมเลกุลของสารเติมแต่งที่ 400-20,000 กรัมต่อโมล โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือกด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดมีโครงสร้างที่ไม่สมมาตร ส่วนแผ่นเยื่อเลือกที่มีการเติมสารเติมแต่งที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่าจะทำให้จำนวนรูพรุนต่อพื้นที่ผิวมากกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่มีการเติมสารเติมแต่งที่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่า แต่จะเห็นได้ว่าแผ่นเยื่อเลือกที่มีสารเติมแต่งที่มีมวลโมเลกุลสูงๆ จะมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยลดลงเล็กน้อย และที่สำคัญคือทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความดันที่ให้กับระบบเพิ่มมากขึ้น

Ehsan Saljoughi และคณะ (2009) ได้ทำการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตเพื่อใช้ในการแยกโปรตีนอัลบูมินในกระบวนการอัลตราฟิวเตรชัน โดยวิธีเฟสอินเวอร์ชันแล้วศึกษาผลของความเข้มข้นของเซลลูโลสอะซิเตต และโพลีเอทิลีนไกลคอล ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นเยื่อเลือก และศึกษาค่าฟลักซ์ของน้ำโดยพบว่าเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนไกลคอลในสารละลายโพลิเมอร์ที่ใช้เตรียมสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือก แล้วนำแผ่นเยื่อเลือกที่ได้มาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือกมีช่องว่างของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลสอะซิเตต จะทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าลดลง ดังนั้นจะสรุปได้ว่าค่าฟลักซ์ที่มากที่สุดจะได้จากการเตรียมที่มีการใช้ความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนไกลคอลมากที่สุดและใช้ความเข้มข้นของเซลลูโลสอะซิเตตน้อยที่สุด

J.Sikder และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกโดยใช้เซลลูโลสอะซิเตต และโพลีซัลโฟนเป็นสารละลายโพลิเมอร์เพื่อใช้ในการกระบวนการแยกจุลินทรีย์ออกจากกรดแลคติก และมีสารเติมแต่งเป็นโพลีเอทิลีนไกลคอล เพื่อเพิ่มโครงสร้างรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือก โดยใช้การสังเคราะห์แบบการเปลี่ยนเฟส พบว่าสัดส่วนระหว่างเซลลูโลสอะซิเตตและโพลีซัลโฟนที่เหมาะสมที่สุดคือ 25:75 ซึ่งสัดส่วนนี้ให้ค่าฟลักซ์ของน้ำมากถึง 1870 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และค่าฟลักซ์ในการแยกจุลินทรีย์ออกจากกรดแลคติกเท่ากับ 1430 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

Mou Sen, Ajoy Manna และ Parimal Pal (2010) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการแยกสารหนู (Arsenic) ออกจากน้ำบาดาลโดยอาศัยหลักการแยกด้วย Polyamide Nanofiltration Membrane เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าฟลักซ์ คือการแยกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความดัน (Pressure), ความเข้มข้นของเกลือในน้ำบาดาล และค่า pH ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงความดันที่อยู่ในช่วง 5-12 Kg/cm² นั้นพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ และค่าการแยกจะเพิ่มขึ้น และสำหรับค่าความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงเล็กน้อย แต่ค่าการแยกยังคงมากกว่าร้อยละ 90 และในการปรับค่า pH จาก 3 เป็น 10 พบว่าเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการแยกเพิ่มขึ้นเช่นกัน

L.Zou และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพแผ่นเยื่อเลือกโพลีเอไมด์ โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำคือ โพลีเอทิลีนไกลคอล โดยวิธีพลาสมาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Plasma Polymerization) เพื่อลดตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่มีการเติมสารเติมแต่งลงไปจะมีคุณสมบัติชอบน้ำมากขึ้น และให้ค่าฟลักซ์เพิ่มมากขึ้นกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง และยังพบว่าหลังจากการกรองไปแล้ว 20 นาที แผ่นเยื่อเลือกที่มีการเติมสารเติมแต่งค่าฟลักซ์ไม่ลดลงแต่แผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งค่าฟลักซ์ลดลงถึงร้อยละ 27 กล่าวได้ว่าแผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับสภาพผิวให้มีความชอบน้ำมากขึ้นสามารถลดตะกอนที่เกิดขึ้นได้

Muhammad Zar และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งที่เติมลงไปในการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกชนิดเซลลูโลสอะซิเตตด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase Inversion) โดยทำการศึกษารวมทั้ง 3 ชนิด คือ Polyethylene Glycol-600 (PEG), Propylene Glycol (PG) และ Ethylene Glycol (EG) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกรอง โดยพบว่าเมื่อทำการเติมสารเติมแต่ง แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือก จะเห็นได้ว่าแผ่นเยื่อเลือกมีช่องว่างของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแผ่นเยื่อเลือกที่เติมสารเติมแต่งชนิด EG และ PG จะมีค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน และมีย่านค่ามากกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่เติมสารเติมแต่งชนิด PEG และยิ่งใช้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งเพิ่มมากขึ้นก็ยิ่งทำให้ค่าฟลักซ์มีค่ามากขึ้น

Thi Phuong Nga Nguyen และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกจากเซลลูโลสไตรอะซิเตต (Cellulose triacetate: CTA) กับเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate: CA) ด้วยวิธีอิมเมอร์ชันพรีซิพิตชัน (Immersion Precipitation) เพื่อใช้ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส (Forward Osmosis: FO, กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสคือการที่น้ำจากฝั่งด้าน feed มีการแพร่ผ่านไปยังด้าน permeate ที่มีการใช้สารละลายที่เข้มข้นกว่า ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันน้อยกว่ากระบวนการออสโมซิส แต่มีข้อเสียคือสารละลายที่ได้จะเป็นสารละลายอีกชนิดหนึ่งที่มีความเข้มข้นน้อยลง) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่าง CTA กับ CA และการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของตัวทำละลาย จากผลการทดลองที่ต้องการแผ่นเยื่อเลือกที่มีค่าฟลักซ์สูงและมีค่าฟลักซ์ของเกลือต่ำๆ พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ดีที่สุดมีส่วนประกอบดังนี้คือ 6.3%wt CTA, 12.6%wt CA, 49.9%wt 1,4-dioxane, 17.2%wt acetone, 3.7%wt maleic acid และ 10.3%wt methanol ที่มีความหนาของแผ่นเยื่อเลือกเท่ากับ 250 ไมโครเมตร และให้ค่าฟลักซ์สูงสุดเท่า 10.39 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และมีค่าฟลักซ์ของเกลือที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.084 โมลของ NaCl ต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

Bo Zhu และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาการแยกเกลือออกจากน้ำเสียที่มีเกลือเป็นองค์ประกอบด้วยแผ่นเยื่อเลือกซีโอไลต์ชนิด MFI เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกเกลือออกจากน้ำเสีย เช่น ความดันขาเข้าของน้ำเสีย และความเข้มข้นขาเข้าของน้ำเสีย แล้วทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ ค่าฟลักซ์ และประสิทธิภาพการลดลงของสารประกอบอินทรีย์ จากการทดลองที่ความดันขาเข้าของน้ำเสียแตกต่างกันตั้งแต่ 1-7 MPa และจากการทดสอบที่ความดันขาเข้าของน้ำเสีย 7 MPa พบว่าเมื่อพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า ประสิทธิภาพในการแยกเกลือเท่ากับร้อยละ 80 ค่าฟลักซ์มีค่าเท่ากับ 4 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพการลดลงของสารประกอบอินทรีย์มีค่ามากกว่าร้อยละ 90 โดยทดสอบจากเครื่องวัดการดูดกลืนแสง แต่เมื่อความดันขาเข้าของน้ำเสียลดลง จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกเกลือลดลงเช่นกัน สำหรับการทดสอบค่าความเข้มข้นขาเข้าของน้ำเสียที่แตกต่างกันโดยวัดจากค่าการนำไฟฟ้าตั้งแต่ 1,770-3,100 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร พบว่าถ้าความเข้มข้นของเกลือขาเข้ามากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกเกลือลดลงเล็กน้อย แต่โดยรวมประสิทธิภาพในการแยกเกลือยังมีค่ามากกว่าร้อยละ 70

Hossen Mahdavi และ Taieb Shahalizade (2015) ได้ทำการศึกษาการเตรียม, คุณสมบัติ และประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่มีการปรับปรุงด้วยแอลิฟาติกไฮเปอร์บรานด์โพลีเอสเตอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่มีส่วนประกอบแตกต่างกัน และเพื่อศึกษาฟลักซ์ และความต้านทานพาวลิงของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่มีส่วนประกอบแตกต่างกัน โดยทำการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตต และแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่มีการเติมสารเติมแต่งแอลิฟาติกไฮเปอร์

บรานซ์โพลิเอสเตอร์ที่ต่างชนิดกัน (PEG, HBPEG3 และHBPEG4) โดยมีสัดส่วนโดยมวลของสารเติมแต่งแต่ละชนิดแตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 2.5-10 โดยมวล แล้วนำไปทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM), เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) และเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนที่เข้าหรือออกจากชิ้นตัวอย่าง (DSC) แล้วทำการหาค่าฟลักซ์ และความต้านทาน ฟาวลิงของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดแต่ละชนิดที่ความดัน 500 MPa เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งพบว่าการถ่ายเทความร้อน และการยึดตัวของแผ่นเยื่อเลือกจะขึ้นกับชนิดของสารเติมแต่ง และจากภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด การเพิ่มสารเติมแต่งจะทำให้แผ่นเยื่อเลือกมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น และสำหรับค่าฟลักซ์ และความต้านทานฟาวลิงจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน และชนิดของสารเติมแต่ง ดังนั้นเมื่อนำแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดที่มีการเติมสารเติมแต่งไปประยุกต์ใช้งานจะทำให้มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มมากขึ้น

ณัฐนันท์ โปสรักษ์กะ และนิตยา ตันเจริญ (2013) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดเพื่อใช้ในการแยกแอมโมเนียซึมไอออนออกจากน้ำบาดาล โดยแผ่นเยื่อเลือกสามารถสังเคราะห์ได้จากเซลลูโลสอะซิเตด, อะซิโตนและน้ำกลั่น ซึ่งจะได้แผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดแบบที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณภาพ และจะใช้โพลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) เป็นสารเติมแต่งโดยจะใช้ในสัดส่วนที่ต่างกันในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกแต่ละชนิด จากนั้นจะทำการศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และค่าการกักเก็บน้ำ, ฟลักซ์ของน้ำที่ไหลผ่านแผ่นเยื่อเลือกแต่ละชนิด และค่าความสามารถในการแยกเกลือไอออน โดยจากผลการศึกษาผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบว่าแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดชนิดที่มีการเติมสารเติมแต่งจะมีจำนวนรูพรุนมากกว่าแบบไม่มีการเติมสารเติมแต่ง ซึ่งจะสอดคล้องกับการคำนวณค่าการกักเก็บน้ำ คือ 51.92%, 64.20%, 69.33% และ 75.88% ที่มีสัดส่วนของสารเติมแต่งเป็น 0%, 4%, 8%และ 12% โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่ในการศึกษานี้ยังไม่สามารถหาค่าฟลักซ์ของน้ำที่ไหลผ่านแผ่นเยื่อเลือกและค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือไอออนได้เนื่องจากแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้นั้นเกิดการฉีกขาดระหว่างการศึกษา

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการศึกษา

3.1.1 สถานที่ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

3.2.2 วิธีการศึกษาค้นคว้า

3.2.2.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการการแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ด้วยแผ่นเยื่อเลือก

3.2.2.2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการปรับสภาพน้ำเค็มด้วยแผ่นเยื่อเลือก

3.2.2.3 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชนิดของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ในกระบวนการปรับสภาพน้ำเค็ม และปัจจัยที่ส่งผลต่อการแยก

3.2.2.4 ศึกษาการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตด (CA Membrane) ที่ไม่มีการปรับปรุงและมีการปรับปรุงคุณภาพ

(1) ทำการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตด และแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดที่ปรับปรุงคุณภาพ

(2) ทำการศึกษาคุณสมบัติหลักของแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้ จากลักษณะทางกายภาพ, ขนาดของรูพรุน, ค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำ

3.2.2.5 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดด้วยการแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เพื่อปรับสภาพน้ำเค็ม

(1) ออกแบบ และจัดหาอุปกรณ์รวมถึงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

(2) ประกอบอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแยก

(3) ทำการทดลองหาค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น และค่าฟลักซ์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตดที่มีการปรับปรุงและไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ

(4) ทำการทดลองกระบวนการแยก โดยศึกษาผลของสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกเกลือ

(5) ทำการทดลองกระบวนการแยก โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกเกลือ

(6) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ (2) ของ 3.2.2.4, (3) และ (4) ของ 3.2.2.5 ด้วยแผ่นเยื่อเลือกเซลล์โลสอะซิเตดสำเร็จรูป

3.2.2.6 ทำการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นตามการทดลองต่างๆ ซึ่งพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพ ค่าความเป็นรุ่มพรุน ค่าการกักเก็บน้ำ ค่าฟลักซ์ และประสิทธิภาพในการแยกเกลือ

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

- (1) เครื่องกวนสาร (Stirred Machine)
- (2) แท่งแม่เหล็กกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer)
- (3) เครื่องวัดค่าความเค็ม (Reflecto-Salinometer)
- (4) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron

Microscopy: SEM)

- (5) หลอดหยดสาร (Dropper)
- (6) เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ (Vernier Slide Caliper)
- (7) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- (8) แผ่นกระจก
- (9) แท่งแก้ว
- (10) เทอร์โมมิเตอร์
- (11) อ่างน้ำ
- (12) เทปกาว
- (13) กรรไกร
- (14) นาฬิกาจับเวลา
- (15) แผ่นอะลูมิเนียม
- (16) ปุ่มทดสอบประสิทธิภาพ
- (17) สายยางซิลิโคน
- (18) ชุดอะคริลิคทดสอบประสิทธิภาพ
- (19) ที่คืบชิ้นงาน หรือแหวนปากแหลม
- (20) ปีกเกอร์

- (21) กระบอกตวง
- (22) เต้าไฟฟ้า
- (23) น้ำแข็ง
- (24) ตะแกรงอะลูมิเนียม
- (25) กรวยกรอกน้ำ
- (26) กระดาษกรอง (Filter Papers)
- (27) กระปุกเก็บชิ้นงาน

3.2.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

- (1) เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate: CA)
- (2) อะซิโตน (Acetone)
- (3) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol: EG)
- (4) โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol: PEG)
- (5) แผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตสำเร็จรูป (Cellulose Acetate Membrane)
- (6) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride: NaCl)
- (7) น้ำกลั่น (Distilled Water: DI water)

3.3 การสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือก

แผ่นเยื่อเลือกที่จะใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพทั้งหมดจะถูกสังเคราะห์ จากการเตรียมสารแบบสารละลายผสม โดยที่สารละลายโพลิเมอร์ที่ได้จะมีความหนืดและใส จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นเยื่อเลือกด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส หรือเฟสอินเวอร์ชัน ซึ่งวิธีการขึ้นรูปนี้จะทำให้แผ่นเยื่อเลือกที่ได้มีโอกาสที่จะเกิดหยดกลมขนาดเล็กๆของโครงสร้างได้ง่ายขึ้น และเกิดเป็นโครงสร้างเซลล์เปิดในชั้นรองรับ

3.3.1 ส่วนประกอบในการเตรียมสารละลายโพลิเมอร์

การเตรียมสารละลายโพลิเมอร์ตั้นจะประกอบด้วย เซลลูโลสอะซิเตต อะซิโตน น้ำกลั่น และสารเติมแต่งคือ เอทิลีนไกลคอล และโพลีเอทิลีนไกลคอล โดยการเตรียมสารละลายโพลิเมอร์จะแบ่งเป็นสองแบบหลักๆคือ แบบที่ไม่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพ ซึ่งจะไม่มีการเติมสารเติมแต่ง ส่วนอีกแบบหนึ่งจะเป็นแบบที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพ ซึ่งจะมีการเติมสารเติมแต่งโดยจะแบ่งเป็นแบบที่มีการเติมสารเติมแต่งด้วยเอทิลีนไกลคอล และแบบที่เติมสารเติมแต่งด้วยโพลีเอทิลีน

ไกลคอล ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจากการสุ่มสัดส่วนของปริมาณสารแต่ละชนิดในการผสมนั้นต้องทำให้สารละลายผสมเข้ากันดีและเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสัดส่วนที่ใช้ตลอดการทดลองจะแสดงดังตารางที่ 3.1

3.3.2 การเตรียมสารละลายโพลิเมอร์

การเตรียมสารละลายโพลิเมอร์มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้ เริ่มจากการชั่งน้ำหนักของสารเคมีตามปริมาณที่กำหนดในตารางที่ 3.1 จากนั้นให้นำส่วนประกอบทั้งหมดผสมกันในบีกเกอร์ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วทำให้สารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยการใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับคนสารละลายลงในบีกเกอร์แล้วปิดปากบีกเกอร์ด้วยแผ่นอลูมิเนียม เพื่อป้องกันอะซิโตนระเหยออก จากนั้นนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารโดยใช้ความเร็วรอบที่ประมาณ 150 รอบต่อนาที แสดงดังภาพที่ 3.1(ก) ในการกวนสารละลายนั้นจะใช้เวลา 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิและความดันปกติ เมื่อครบเวลาจะได้สารละลายโพลิเมอร์ที่เป็นเนื้อเดียวกันที่มีความหนืดค่อนข้างสูง ใส และโปร่งแสงแสดงดังภาพที่ 3.1(ข)

ตารางที่ 3.1

แสดงส่วนประกอบในการเตรียมสารละลายโพลิเมอร์ของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ

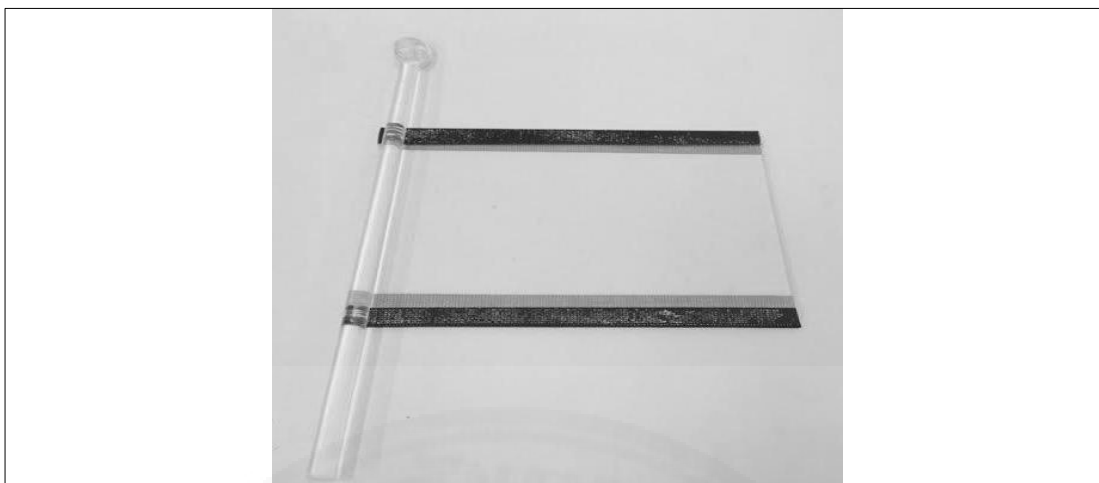
ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก	ส่วนประกอบของแผ่นเยื่อเลือกโดยน้ำหนัก (กรัม)					อุณหภูมิในการสังเคราะห์ (°C)
	เซลลูโลสอะซิเตต	อะซิโตน	น้ำกลั่น	เอทิลีนไกลคอล	โพลีเอทิลีนไกลคอล	
แผ่นเยื่อเลือกที่ไม่ได้ปรับปรุง (CA)	22	67	11	0	-	5-7 และ 20-23
แผ่นเยื่อเลือกที่ปรับปรุง (CAEG3)	21	65	11	3	-	
แผ่นเยื่อเลือกที่ปรับปรุง (CAEG6)	21	63	10	6	-	
แผ่นเยื่อเลือกที่ปรับปรุง (CAEG9)	20	61	10	9	-	
แผ่นเยื่อเลือกที่ปรับปรุง (CAPEG3)	21	65	11	-	3	20-23
แผ่นเยื่อเลือกที่ปรับปรุง (CAPEG6)	21	63	10	-	6	
แผ่นเยื่อเลือกที่ปรับปรุง (CAPEG9)	20	61	10	-	9	



ภาพที่ 3.1 การกวนสารละลายโพลิเมอร์

3.3.3 การขึ้นรูปแผ่นเยื่อเลือก

แผ่นเยื่อเลือกจะถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟส โดยเริ่มจากการนำสารละลายโพลิเมอร์ที่ผ่านการกวนแล้ว 12 ชั่วโมง มาขึ้นรูปเป็นแผ่นเยื่อเลือกที่อุณหภูมิและความดันปกติ โดยเทสารละลายโพลิเมอร์ลงบนแผ่นกระจกที่สะอาด และมีเทปกาวติดไว้ในบริเวณด้านข้างของแผ่นกระจกเพื่อควบคุมความหนาของแผ่นเยื่อเลือกให้สม่ำเสมอโดยจะมีความหนาประมาณ 150-200 ไมโครเมตร แล้วใช้แท่งแก้วกลมปาดสารละลายโพลิเมอร์ไปบนแผ่นกระจกแสดงดังภาพที่ 3.2 จากนั้นจะได้แผ่นฟิล์มบางๆบนแผ่นกระจกแล้วผึ่งไว้ในอากาศประมาณ 5 วินาที เพื่อให้มีการระเหยอะซิโตนออกไปบางส่วน จากนั้นนำแผ่นกระจกที่มีแผ่นฟิล์มบางๆอยู่ด้านบนแช่ลงในอ่างน้ำเย็นทันที โดยจะต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ 5-7 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้แผ่นเยื่อเลือกแข็งตัว ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที จะได้แผ่นเยื่อเลือกสีขาวทึบแสงที่แสดงดังภาพที่ 3.3 หลังจากนั้นนำแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้มาตัดให้มีขนาดพอดีสำหรับการนำไปทดสอบประสิทธิภาพแสดงดังภาพที่ 3.4 เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเย็นนั้นมีผลต่อการเกิดรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกจึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบโดยทำการขึ้นรูปตามขั้นตอนดังกล่าวแต่เปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำเย็นจาก 5-7 องศาเซลเซียส เป็น 20-23 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.2 การขึ้นรูปแผ่นเยื่อเลือกบนแผ่นกระจก



ภาพที่ 3.3 การทำให้แผ่นเยื่อเลือกแข็งตัวในอ่างน้ำเย็น



ภาพที่ 3.4 แผ่นเยื่อเลือกที่ตัดให้พอดีสำหรับการนำไปทดสอบประสิทธิภาพ

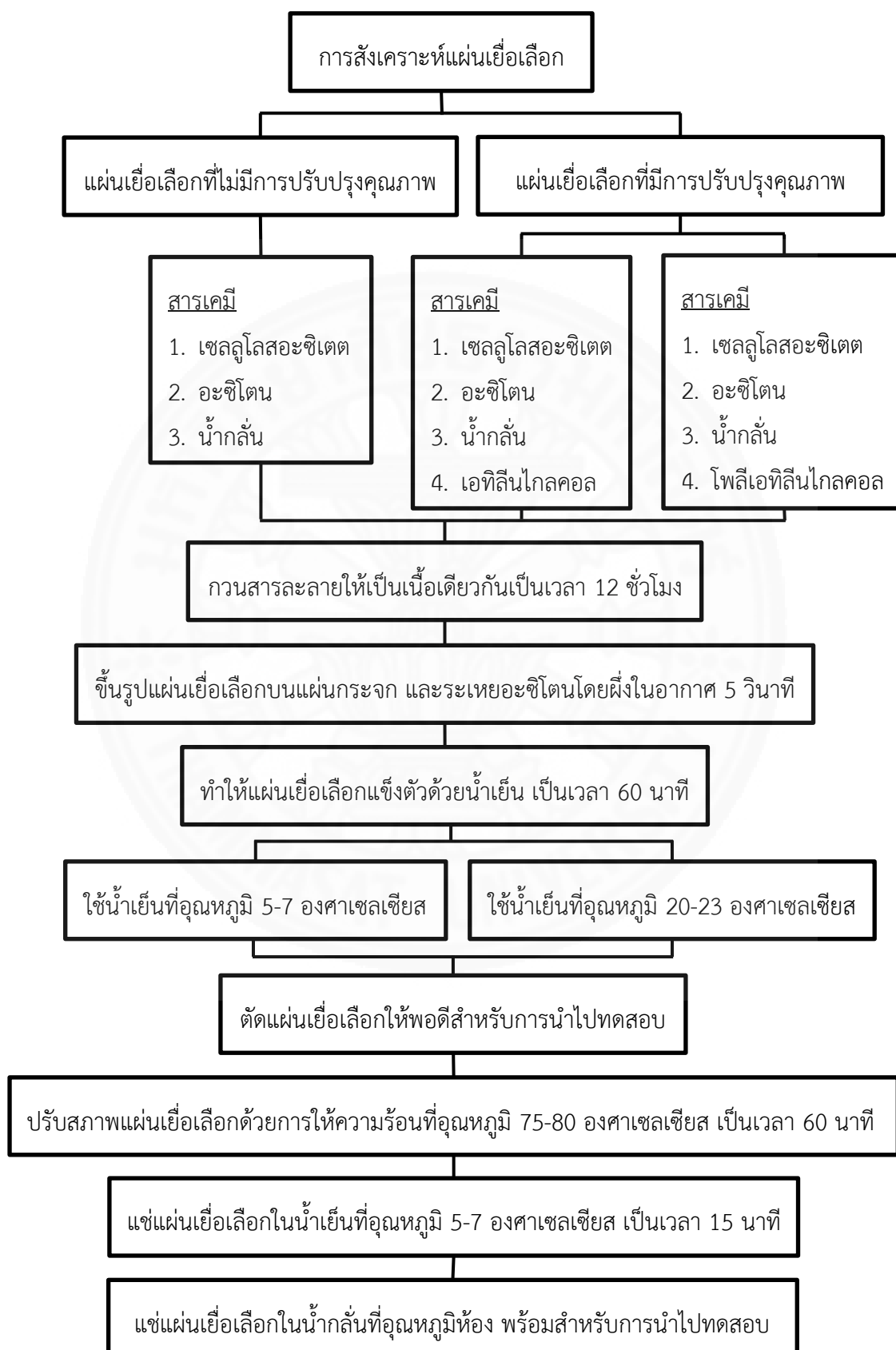
3.3.4 การปรับสภาพแผ่นเยื่อเลือกด้วยความร้อน

แผ่นเยื่อเลือกที่ถูกตัดเป็นแผ่นที่มีขนาดพอดีสำหรับการนำไปทดสอบประสิทธิภาพ จะถูกนำมาปรับสภาพด้วยการให้ความร้อน โดยทำการต้มน้ำในปิกเกอร์ที่มีแผ่นเยื่อเลือกแช่อยู่แล้วนำไปวางบนเตาไฟฟ้า และให้ความร้อนโดยจะควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 75-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที แสดงดังภาพที่ 3.5 จากนั้นนำแผ่นเยื่อเลือกขึ้นมาจากปิกเกอร์น้ำร้อนไปแช่ในน้ำเย็นทันที โดยอุณหภูมิของน้ำเย็นจะอยู่ที่ 5-7 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงนำแผ่นเยื่อเลือกที่ได้ไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องพร้อมสำหรับการนำไปทดสอบ



ภาพที่ 3.5 การปรับสภาพแผ่นเยื่อเลือกด้วยความร้อน

3.3.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือก



3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

เมื่อทำการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกที่ต้องการได้แล้วจะได้แผ่นเยื่อเลือกตามตารางที่ 3.1 ดังข้างต้น คือ แผ่นเยื่อเลือกชนิด CA ที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ, แผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 ที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่งที่มีการสังเคราะห์ที่ 5-7 องศาเซลเซียส และ 20-23 องศาเซลเซียส และได้แผ่นเยื่อเลือกชนิด CAPEG3, CAPEG6 และ CAPEG9 ที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยโพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่ง ที่มีการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส จากนั้นนำแผ่นเยื่อเลือกที่ได้มาทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เพื่อศึกษาผลของสารเติมแต่ง และอุณหภูมิของการสังเคราะห์ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อเลือก โดยทำการพิจารณาจากหัวข้อต่อไปนี้

3.4.1 ลักษณะภายนอกของแผ่นเยื่อเลือก

ลักษณะภายนอกของแผ่นเยื่อเลือก คือ ความเรียบหรือความขรุขระของพื้นผิว และสีของแผ่นเยื่อเลือกจะสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า และความหนาของแผ่นเยื่อเลือกที่สามารถวัดได้จากเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์

3.4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นเยื่อเลือก

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นเยื่อเลือกจะสามารถพิจารณาได้จากภาพพื้นผิว และภาพตัดขวางของแผ่นเยื่อเลือกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) แสดงดังภาพที่ 3.6 โดยจะเป็นการศึกษาและเปรียบเทียบขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในแผ่นเยื่อเลือกที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยขนาดของรูพรุนจะทำการวัดจากภาพพื้นผิวจากการส่อง SEM ด้วยโปรแกรม SemAfore (Version 5.21) ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมแผ่นเยื่อเลือกเพื่อนำไปศึกษาดังนี้

3.4.2.1 การเตรียมตัวอย่างแผ่นเยื่อเลือก

ตัดแผ่นเยื่อเลือกให้มีขนาด 1×1 เซนติเมตร ล้างด้วยน้ำกลั่นที่สะอาด โดยน้ำกลั่นจะต้องมีความบริสุทธิ์และมีความเป็นกลาง

3.4.2.2 การทำแผ่นเยื่อเลือกให้แห้ง

ทิ้งไว้ในอากาศประมาณ 60 นาที และก่อนทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะต้องทำให้แห้งโดยการนำไปประเหยน้ำออกด้วยการทำสุญญากาศ (Vacuum) เป็นเวลา 30 นาที จะได้แผ่นเยื่อเลือกที่แห้งสนิท

3.4.2.3 การเคลือบผิวแผ่นเยื่อเลือกด้วยโลหะ (Metal Coating)

นำแผ่นเยื่อเลือกที่แห้งสนิทแล้วมาเคลือบด้วยโลหะทองบางๆบนผิวของแผ่นเยื่อเลือกที่ต้องการทดสอบ ในการเคลือบด้วยโลหะทองจะช่วยเพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าของแผ่นเยื่อเลือก จากนั้นนำแผ่นเยื่อเลือกไปศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นเยื่อเลือกโดยการศึกษาจากพื้นผิว (Surface) และภาพตัดขวาง (Cross Section) ของแผ่นเยื่อเลือก เพื่อดูลักษณะของการเกิดรูพรุน และขนาดของรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้จากภาพขยาย



ภาพที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM). จาก Dosem24hr, โดย <http://www.dosem24hr.com/index.php>.

3.4.3 การทดสอบค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำ

การทดสอบค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำ (%Porosity และ %Water Content) ของแผ่นเยื่อเลือกเป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือก ซึ่งความเป็นรูพรุนคือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของรูของแผ่นเยื่อเลือกกับปริมาตรของแผ่นเยื่อเลือกทั้งหมดหรือมวลของแผ่นเยื่อเลือก โดยค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกจะพิจารณาจากปริมาณการดูดซึมน้ำของแผ่นเยื่อเลือก ในการทดลองจะทำการทดสอบแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆละ 3 ตัวอย่างแล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.4.3.1 แช่แผ่นเยื่อเลือกในน้ำกลั่น

นำแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ได้ไปแช่ในน้ำกลั่นเพื่อให้แผ่นเยื่อเลือกได้ดูดซึมน้ำอย่างเต็มที่ก่อนการทดสอบ โดยจะนำแผ่นเยื่อเลือกไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ

3.4.3.2 การเตรียมแผ่นเยื่อเลือกสำหรับทดสอบ

นำแผ่นเยื่อเลือกที่ผ่านการแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาตัดให้มีขนาดตามต้องการ โดยการทดลองครั้งนี้ แผ่นเยื่อเลือกจะถูกตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2×1 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก และทำการวัดความหนาของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียกด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความเป็นรูพรุน

3.4.3.3 การชั่งน้ำหนักเปียกของแผ่นเยื่อเลือก

หลังจากตัดแผ่นเยื่อเลือกแล้ว ให้ชั่งน้ำหนักถ้วยดินเผา (Crucible) ที่สามารถทนความร้อนสูงได้ ก่อนที่จะนำไปใส่แผ่นเยื่อเลือก (ก่อนการชั่งน้ำหนักควรนำถ้วยดินเผาไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อไม่ให้ถ้วยมีความชื้น และได้น้ำหนักของถ้วยที่แท้จริง) หลังจากนั้นใส่แผ่นเยื่อเลือกลงในถ้วยดินเผาแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่า เมื่อนำเอาน้ำหนักของถ้วยดินเผาที่มีแผ่นเยื่อเลือกมาหักลบกับถ้วยดินเผาที่ใส่แผ่นเยื่อเลือกก็จะได้น้ำหนักเปียกของแผ่นเยื่อเลือกแล้วจดบันทึกค่า

3.4.3.4 การระเหยนํ้าออกจากแผ่นเยื่อเลือก

จะใช้วิธีการอบโดยปรับอุณหภูมิของเตาอบไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำถ้วยดินเผาที่มี แผ่นเยื่อเลือกทั้งสามชุด ใส่เข้าไปอบเพื่อทำการระเหยนํ้าในแผ่นเยื่อเลือกออกให้หมดโดยจะใช้เวลาในการอบ 1 ชั่วโมง

3.4.3.5 การชั่งน้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือก

เมื่อระเหยนํ้าออกจากแผ่นเยื่อเลือกเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว ให้นำถ้วยดินเผาแต่ละใบที่มีแผ่นเยื่อเลือกอยู่ออกมาชั่งน้ำหนักทันที และบันทึกค่า เมื่อนำเอาน้ำหนักของถ้วยดินเผาที่มีแผ่นเยื่อเลือก(หลังอบ) มาหักลบกับถ้วยดินเผาที่ใส่แผ่นเยื่อเลือกก็จะได้น้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือกแล้วจดบันทึกค่า

3.4.3.6 การคำนวณค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำ (%Porosity และ %Water Content)

เมื่อทำการชั่งน้ำหนักเสร็จแล้วนำผลที่ได้จากการชั่งน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือกไปคำนวณหาค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\%Porosity = \frac{(W_w - W_d)}{d_{water}} \times \frac{100}{w \times l \times t} \quad (3.1)$$

$$\%Water\ content = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ	W_w	คือ	น้ำหนักเปียกของแผ่นเยื่อเลือก (g)
	W_d	คือ	น้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือก (g)
	d_{water}	คือ	ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (g/cm^3)
	w	คือ	ความกว้างของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียก (cm)
	l	คือ	ความยาวของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียก (cm)
	t	คือ	ความหนาของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียก (cm)

3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อเลือก

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพแล้ว จะเลือกนำชุดแผ่นเยื่อเลือกที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีความพรุนมากที่สุด และให้ค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำมากที่สุดมา ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานต่อไป เพื่อเป็นการศึกษาการพัฒนาแผ่นเยื่อเลือกชนิดเซลลูโลสอะซิเตดให้เหมาะสำหรับการแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ออกจากน้ำเค็มมากขึ้น และสามารถนำไปใช้เป็นตัวแบบในการบำบัดน้ำกร่อย หรือน้ำเค็ม เพื่อใช้ในการอุปโภค บริโภค และอื่นๆ ได้ดีขึ้น โดยจะทำการพิจารณาจากหัวข้อต่อไปนี้

3.5.1 การทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำ

เป็นการทดสอบเพื่อวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำผ่านแผ่นเยื่อเลือกต่อพื้นที่แผ่นเยื่อเลือก โดยใช้กระบวนการทดสอบที่แสดงดังภาพที่ 3.7 ซึ่งจะแยกเป็น 2 กรณี คือ ทดสอบโดยใช้น้ำกลั่น และทดสอบโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.5 %wt (3.5 g/100ml) เป็นสารละลายตัวอย่าง ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารละลายเทียบเท่าความเค็มระดับน้ำทะเลที่พิจารณาจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ (การวัดความเค็มของน้ำ (Salinity), 2010-2015) กำหนดให้พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 4.52 ตารางเซนติเมตร และอัตราการไหลของน้ำเข้าเท่ากับ 2.5 ลิตรต่อชั่วโมง และค่าฟลักซ์ของน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$J = \frac{Q}{A \times \Delta t} \quad (3.3)$$

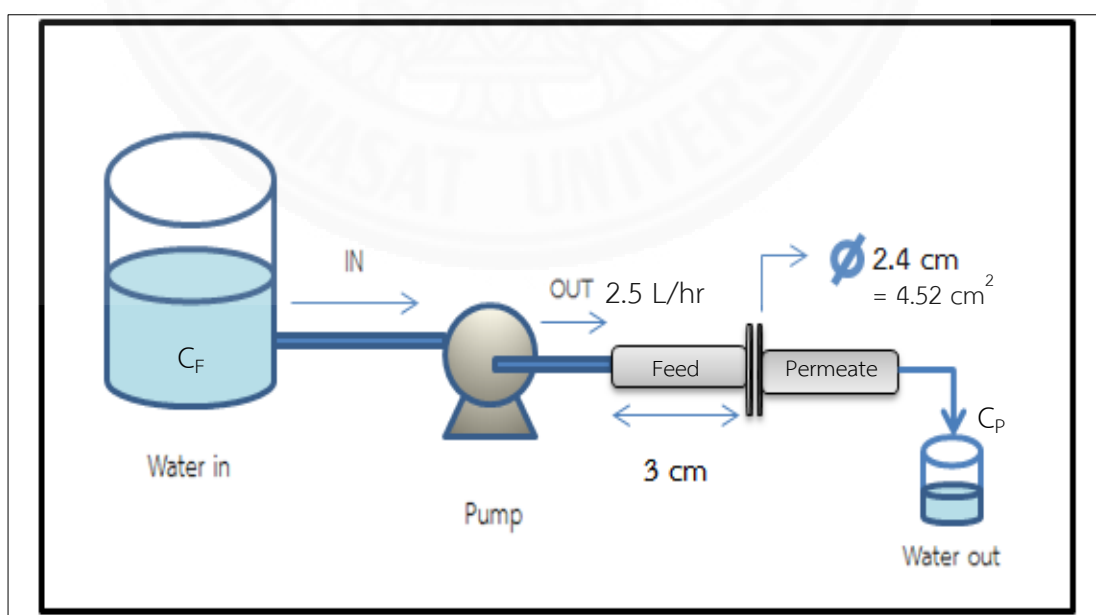
เมื่อ	J	คือ	ฟลักซ์ของน้ำ ($m^3/m^2 \cdot hr$)
	Q	คือ	ปริมาตรของน้ำหรือสารละลายด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (m^3)
	A	คือ	พื้นที่แผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ทดสอบ (m^2)
	Δt	คือ	เวลาที่ใช้ทดสอบ (hr)

3.5.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการแยกเกลือ

เป็นการทดสอบหาประสิทธิภาพ การแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ของแผ่นเยื่อเลือก โดยใช้กระบวนการทดสอบที่แสดงดังภาพที่ 3.7 ซึ่งจะแยกเป็น 2 กรณี คือ ทำการศึกษาผลของสัดส่วนของสารเดิมแต่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกเกลือ และทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกเกลือ โดยทำการทดสอบตามเงื่อนไขดังตารางที่ 3.2 กำหนดให้พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 4.52 ตารางเซนติเมตร และอัตราการไหลของน้ำเข้าเท่ากับ 2.5 ลิตรต่อชั่วโมง และทำการวัดความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ก่อนแผ่นเยื่อเลือกและหลังแผ่นเยื่อเลือก โดยอาศัยหลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความเค็ม (Reflecto-Salinometer) ซึ่งจะได้หน่วยที่ได้จากเครื่องวัดค่าความเค็มเป็น ‰ หรือ ppt และสามารถเปลี่ยนเป็น %wt ได้ด้วยการหารด้วย 10 ดังนั้นจะได้หน่วยของค่าความเค็มที่วัดได้เท่ากับ %wt เท่ากับ g/100ml และค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R = \left(1 - \frac{C_P}{C_F} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ	R	คือ	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (%)
	C_P	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (%wt, g/100ml)
	C_F	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้าแผ่นเยื่อเลือก (%wt, g/100ml)



ภาพที่ 3.7 แสดงกระบวนการที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพต่างๆของแผ่นเยื่อเลือก

ตารางที่ 3.2

แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกเกลือ

ลำดับที่	ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก	ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น (%wt, g/100ml)
1	CA	3.5
2	CAEG3	3.5
3	CAEG6	3.5
4	CAEG9	3.5
5	CA	3.0
6	CAEG9	3.0
7	CA	2.5
8	CAEG9	2.5
9	CA	2.0
10	CAEG9	2.0

3.5.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นกับแผ่นเยื่อเลือก

สำเร็จรูป

แผ่นเยื่อเลือกสำเร็จรูปที่ใช้ในการทดลองการเปรียบเทียบคือ แผ่นเยื่อเลือกชนิดเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate Membrane, CACOM) จาก Whatman, pore size 0.2 μm , 47 mm Dia. นำไปทดสอบเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำ โดยมีการคำนวณตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับข้างต้น จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้น และทำการเปรียบเทียบการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกด้วยการพิจารณาจากค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (3) และค่าการแยกเกลือจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ 3.5%wt ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (4) แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่สังเคราะห์ขึ้น

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

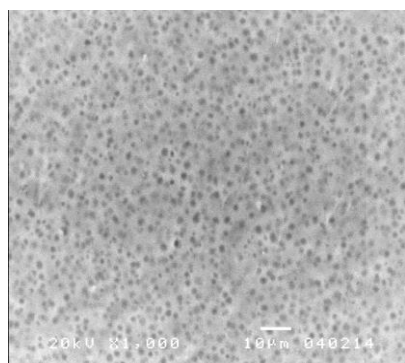
4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 ผลของลักษณะภายนอกของแผ่นเยื่อเลือก

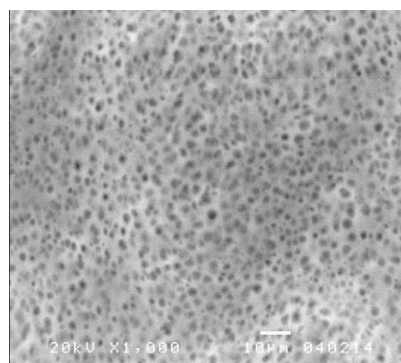
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพจะพบว่าเมื่อทำการสังเคราะห์เสร็จแล้วจะได้แผ่นเยื่อเลือกที่มีสีขาวขุ่น ทึบแสง และเมื่อสังเกตแผ่นเยื่อเลือกด้วยตาเปล่าที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ (ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง) จะมีลักษณะเป็นพื้นผิวแน่น มีความเรียบกว่าพื้นที่ผิวของแผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับปรุงคุณภาพ (มีการเติมสารเติมแต่ง) ซึ่งจะมีลักษณะของพื้นผิวที่มีความขรุขระ และหลังจากทำการวัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์พบว่ามีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 90-150 ไมโครเมตร โดยที่ความหนาจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งลงไป นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำการปล่อยให้แผ่นเยื่อเลือกแต่ละชนิดแห้ง ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพจะเกิดการเสียรูป และคงอได้ แต่การเสียรูปและคงอนี้จะเกิดน้อยลงตามสัดส่วนของสารเติมแต่งที่เพิ่มเข้ามา

4.1.2 ผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นเยื่อเลือก

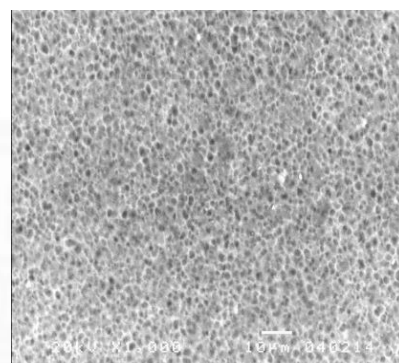
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆจากภาพพื้นผิว และภาพตัดขวางที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือเรียกว่าการส่อง SEM จะได้ภาพที่ 4.1 คือภาพพื้นผิว และภาพตัดขวางของแผ่นเยื่อเลือกที่มีสารเอทิลีนไกลคอล (EG) เป็นสารเติมแต่ง และทำการสังเคราะห์ที่ 5-7 องศาเซลเซียส และภาพที่ 4.2 คือภาพพื้นผิว และภาพตัดขวางของแผ่นเยื่อเลือกที่มีสารเอทิลีนไกลคอล (EG) เป็นสารเติมแต่ง และทำการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส เนื่องจากได้ทำการศึกษาแผ่นเยื่อเลือกที่มีการเติมเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่งก่อนจึงได้ทำการศึกษาทั้ง 2 อุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส ให้ผลที่ดีกว่าจึงได้ทำการศึกษาแผ่นเยื่อเลือกที่มีการเติมโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) เป็นสารเติมแต่งที่ 20-23 องศาเซลเซียส เพียงอุณหภูมิเดียว ทำให้ได้ภาพที่ 4.3 คือภาพพื้นผิว และภาพตัดขวางของแผ่นเยื่อเลือกที่มีสารโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) เป็นสารเติมแต่ง และทำการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดมีลักษณะไม่สมมาตร (Asymmetric) และพบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิด (EG และ PEG) มีความพรุนมากกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ และมีความพรุนเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของสารเติมแต่งนั้นๆ และจากภาพตัดขวางจะเห็นว่าการเติมสารเติมแต่งจะทำให้ส่วนที่เป็น Dense ลดลง และจากภาพตัดขวางชนิด CAEG6 (20-23°C) จะเหมาะกับการแยกสารที่ต้องการค่าฟลักซ์มากๆ



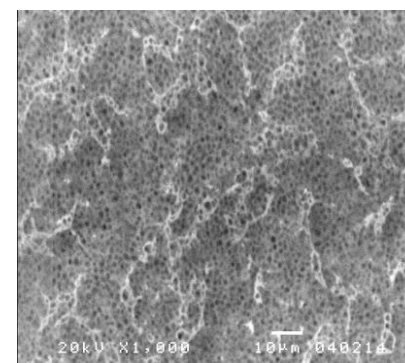
(ก1)



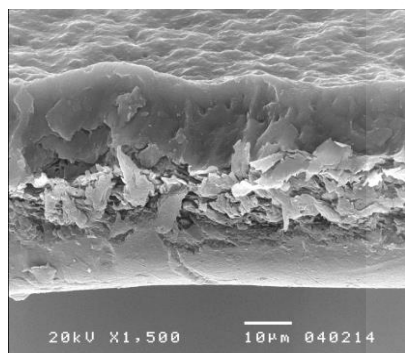
(ก2)



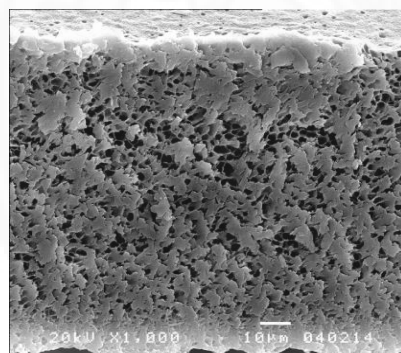
(ก3)



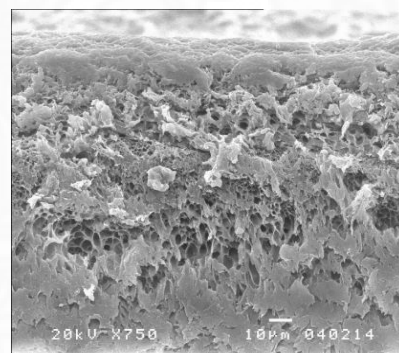
(ก4)



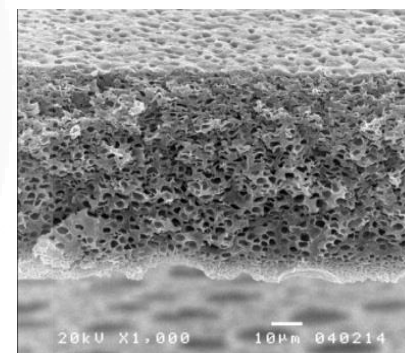
(ข1)



(ข2)

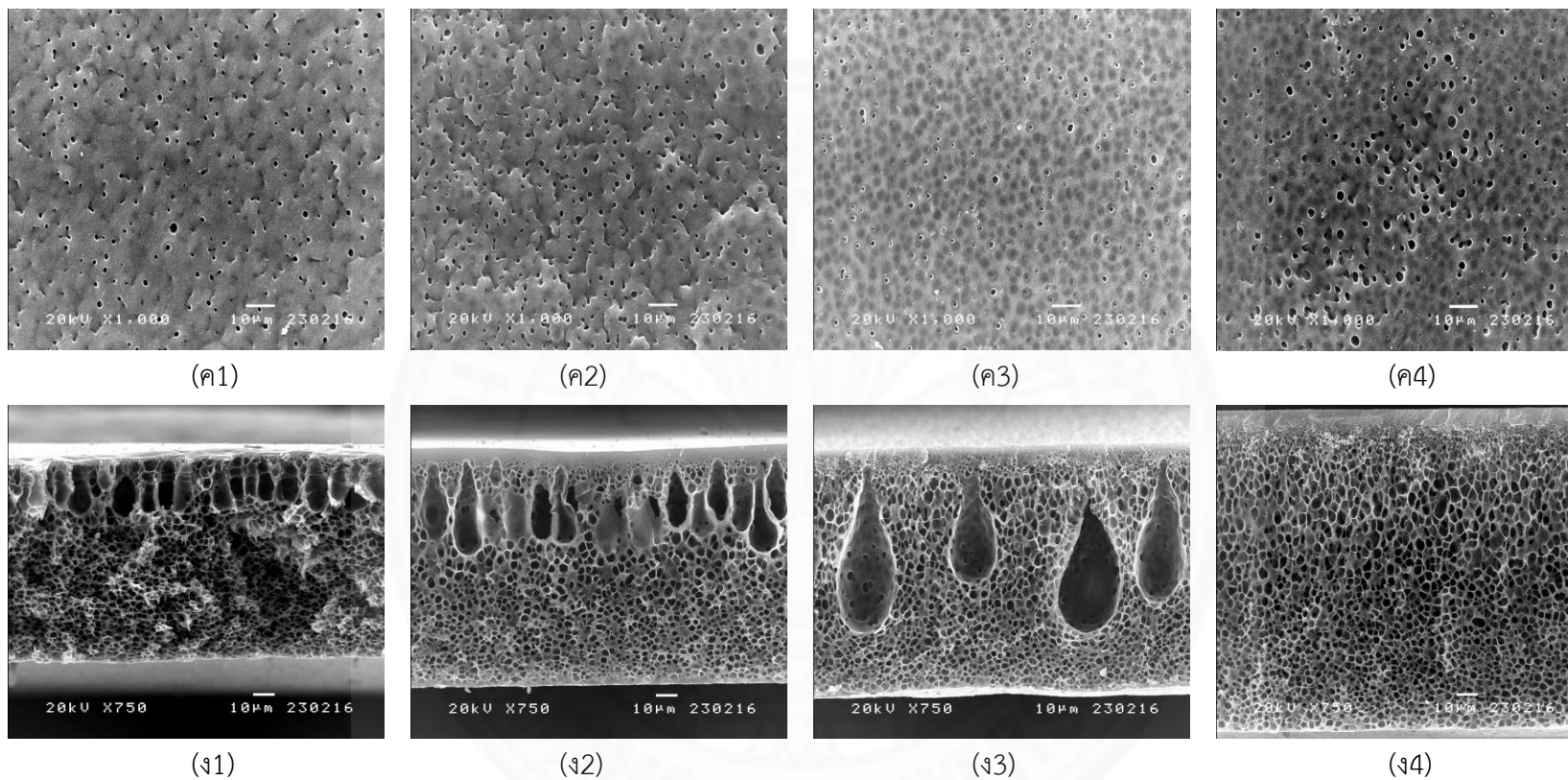


(ข3)

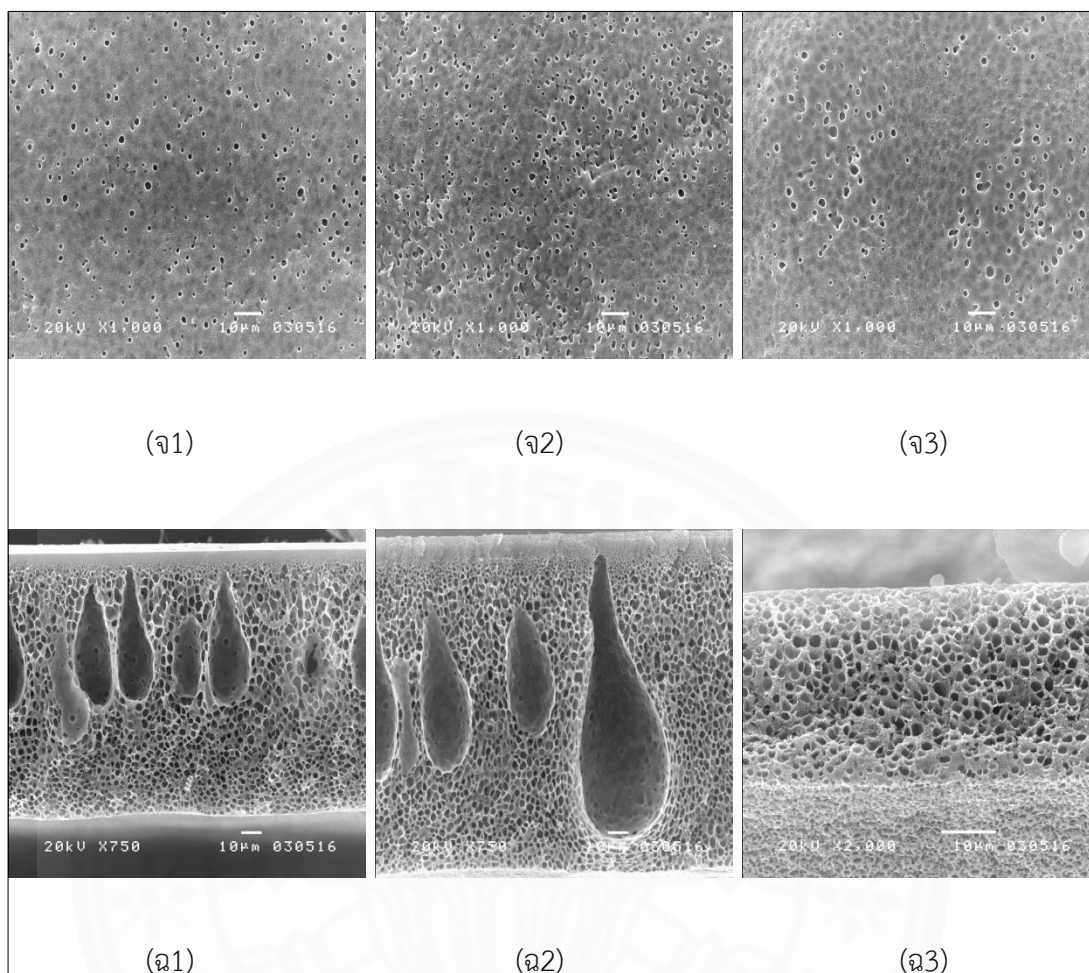


(ข4)

ภาพที่ 4.1 แสดงภาพจาก SEM โดยที่ ภาพที่ขึ้นด้วย ก คือภาพพื้นผิว และภาพที่ขึ้นด้วย ข คือภาพตัดขวาง และ 1, 2, 3 และ 4 คือแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA, CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 ตามลำดับ (ทำการสังเคราะห์ที่ 5-7 องศาเซลเซียส)

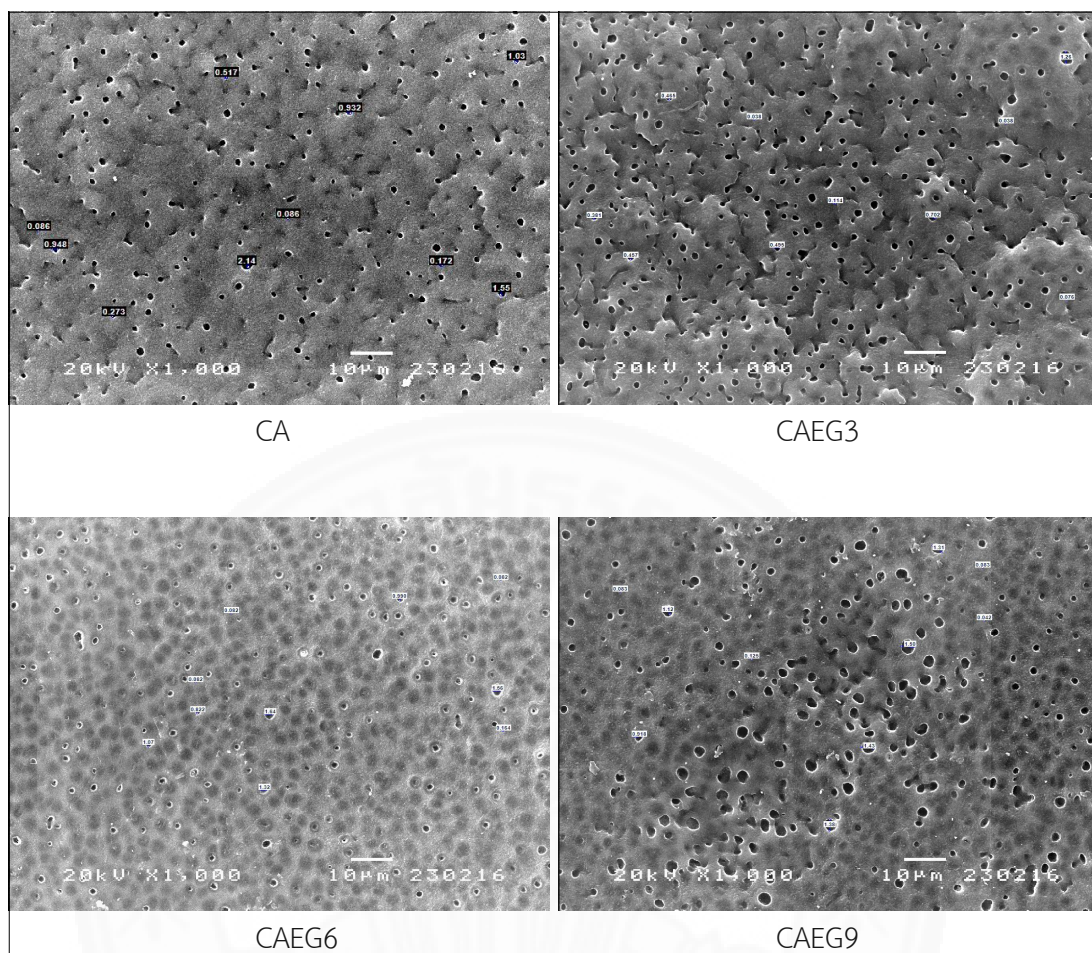


ภาพที่ 4.2 แสดงภาพจาก SEM โดยที่ ภาพที่ขึ้นด้วย ค คือภาพพื้นผิว และภาพที่ขึ้นด้วย ง คือภาพตัดขวาง และ 1, 2, 3 และ 4 คือแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA, CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 ตามลำดับ (ทำการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส)



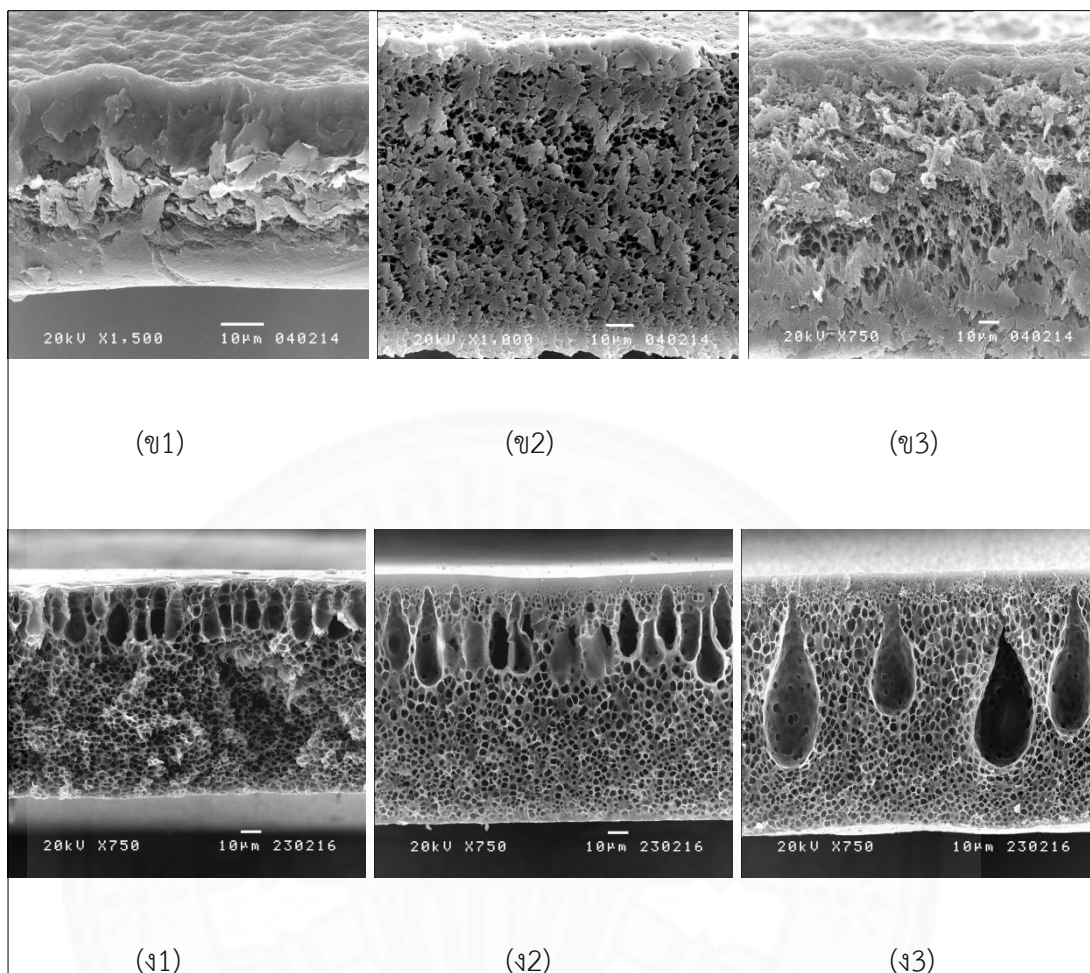
ภาพที่ 4.3 แสดงภาพจาก SEM โดยที่ ภาพที่ขึ้นด้วย จ คือภาพพื้นผิว และภาพที่ขึ้นด้วย ฉ คือภาพตัดขวาง และ 1, 2 และ 3 คือแผ่นเยื่อเลือกชนิด CAPEG3, CAPEG6 และ CAPEG9 ตามลำดับ (ทำการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส)

จากการศึกษาขนาดของรูพรุนด้วยโปรแกรม SemAfore (Version 5.21) แสดงดังภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นภาพตัวอย่างของแผ่นเยื่อเลือกที่มีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่งที่มีการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าภาพพื้นผิวที่มีกำลังการขยายที่เท่ากันที่ 1,000 เท่า พบว่าการเติมสารเติมแต่งจะทำให้ขนาดของรูพรุนบนพื้นผิวแผ่นเยื่อเลือกมีลักษณะของรูพรุนเล็กลงเล็กน้อย โดยมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.5-3.0 ไมโครเมตร และจะลดลงเมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง ซึ่งกล่าวได้ว่าการเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดมีผลทำให้โครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือกมีความพรุน และเกิดช่องว่างเพิ่มมากขึ้น และทำให้ขนาดของรูพรุนเล็กลงเล็กน้อยด้วย และจากการสังเกตจากภาพตัดขวางแผ่นเยื่อเลือกที่มีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่ง ที่มีการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส พบว่า โครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG9 จะมีความเหมาะสมกับการทดลองที่ต้องการให้ประสิทธิภาพการแยกสูงๆ



ภาพที่ 4.4 แสดงภาพขนาดของรูพรุนที่ภาพพื้นผิวของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA, CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 ที่มีการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส

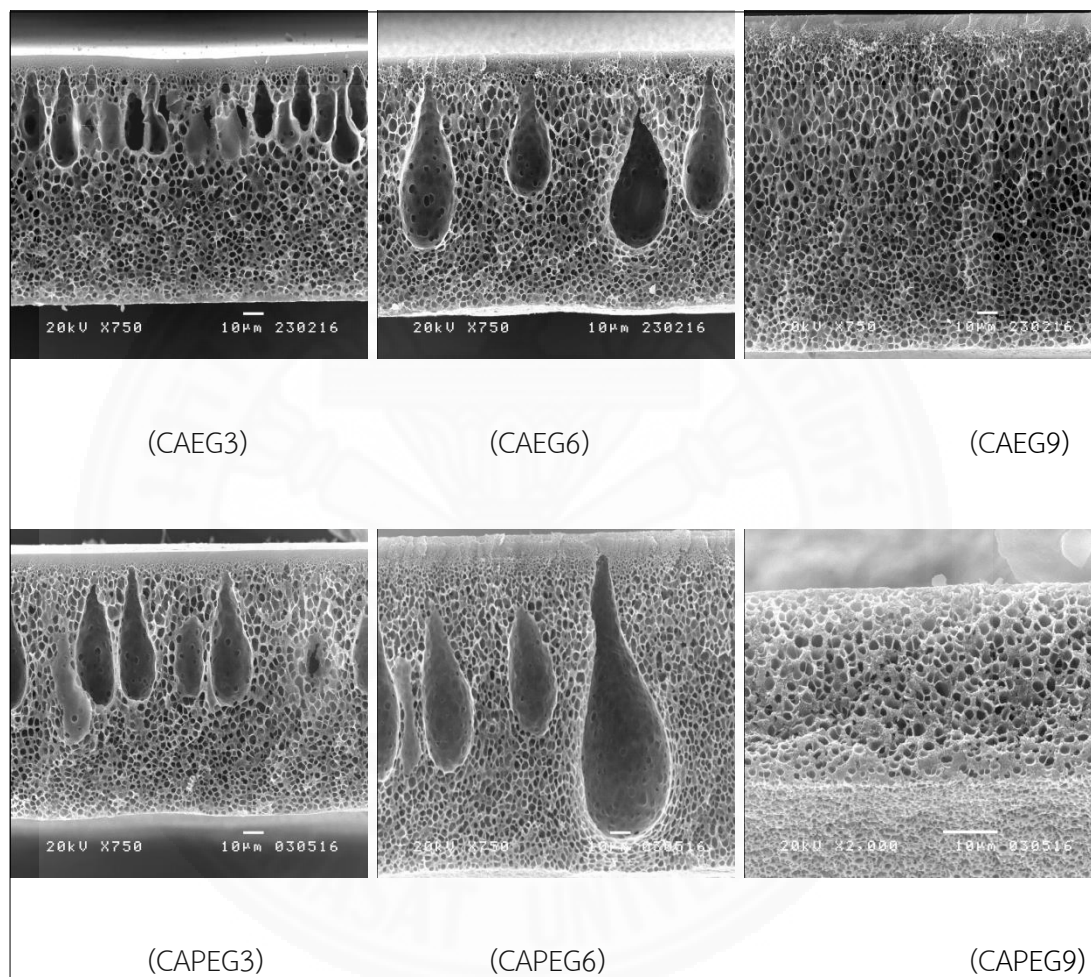
อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือกจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างกันพบว่าเมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้โครงสร้างภายในของแผ่นเยื่อเลือกมีความพรุน และเกิดช่องว่างมากกว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ในหัวข้อผลของตัวแปรที่มีผลต่อการเตรียมแผ่นเยื่อเลือก (รัตนา จิระรัตนานนท์, 1988) เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขให้แผ่นเยื่อเลือกที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นเองมีความพรุน และแนวโน้มที่จะสามารถยอมให้น้ำผ่านได้มากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.5 ซึ่งจะเป็นการพิจารณาจากตัวอย่างของภาพตัดขวางของแผ่นเยื่อเลือกที่มีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่งจากภาพที่ 4.1 และ 4.2 ที่เห็นความแตกต่างได้ชัดเจนที่สุด



ภาพที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างภายในของแผ่นเยื่อเลือกที่มีการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 5-7 องศาเซลเซียสคือภาพ ข1, ข2 และ ข3 กับการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20-23 องศาเซลเซียสคือภาพ ง1, ง2 และ ง3 ที่มีสารเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่ง

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้แผ่นเยื่อเลือกมีความพรุนมากกว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า จึงเลือกทำการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกที่ใช้โพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่งที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส เพื่อทำการเปรียบเทียบกับแผ่นเยื่อเลือกที่มีสารเติมแต่งเป็นเอทิลีนไกลคอล โดยทำการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน จะได้แผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 ที่มีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่ง กับ CAPEG3, CAPEG6 และ CAPEG9 ที่มีโพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่งได้ แสดงดังภาพที่ 4.6 ซึ่งจะเป็นการพิจารณาจากตัวอย่างของภาพตัดขวางของแผ่นเยื่อเลือกจากภาพที่ 4.2 และ 4.3 ที่เห็นความแตกต่างได้ชัดเจนที่สุด พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่มีการใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่งจะมีความเป็นรูพรุน และเกิดช่องว่างมากกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่มีการใช้โพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่ง ซึ่งผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Muhammad Zar และคณะ (2012) โดยในการทดลองนี้

น้ำหนักมวลโมเลกุลของสารโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ใช้เท่ากับ 200 กรัมต่อโมล แต่ถ้าต้องการใช้โพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารเติมแต่งก็สามารถที่จะเพิ่มความพรุน และการเกิดช่องว่างได้จากการใช้สารโพลีเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ตามการเสนองานวิจัยของ Jeong-Hoon Kim และ Kew-Ho Lee (1998) หรือของ B.Chakrabarty และคณะ (2008)



ภาพที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบชนิดของแผ่นเยื่อเลือกที่มีสารเติมแต่งเป็นเอทิลีนไกลคอล คือ CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 กับโพลีเอทิลีนไกลคอลคือ CAPEG3, CAPEG6 และ CAPEG9 ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส

4.1.3 ผลของค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำ

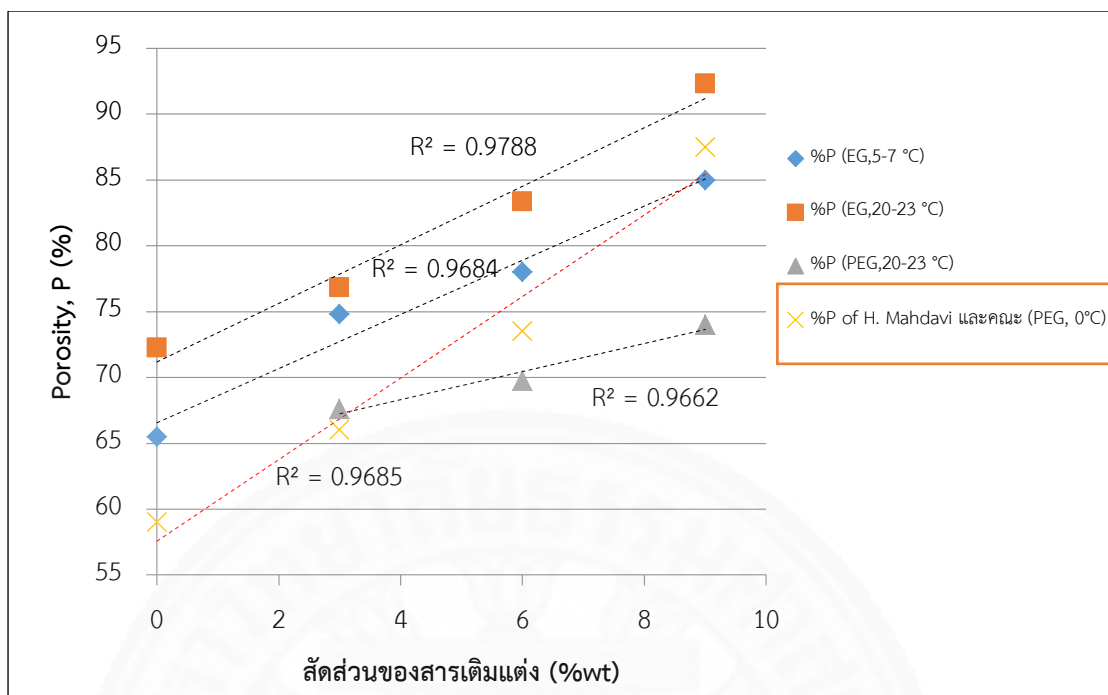
จากการทดสอบพบว่า แผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิด (EG และ PEG) มีค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำมากกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ แสดงดังตารางที่ 4.1 หรือภาพที่ 4.7 และ 4.8 และเนื่องมาจากสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปนั้นทั้งเอทิลีนไกลคอล และโพลีเอทิลีนไกลคอล มีคุณสมบัติเป็นมอนอเมอร์ที่

ชอบน้ำ ทำให้โครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือกเปลี่ยนแปลงไปจากการศึกษาด้วย SEM และเป็นการเพิ่มพันธะไฮโดรเจนของแผ่นเยื่อเลือกอีกด้วย จึงทำให้แผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับปรุงคุณภาพนั้นมีค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการสังเคราะห์ก็ส่งผลให้ค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำเปลี่ยนแปลงไป พบว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้แผ่นเยื่อเลือกมีค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำมากกว่าการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า

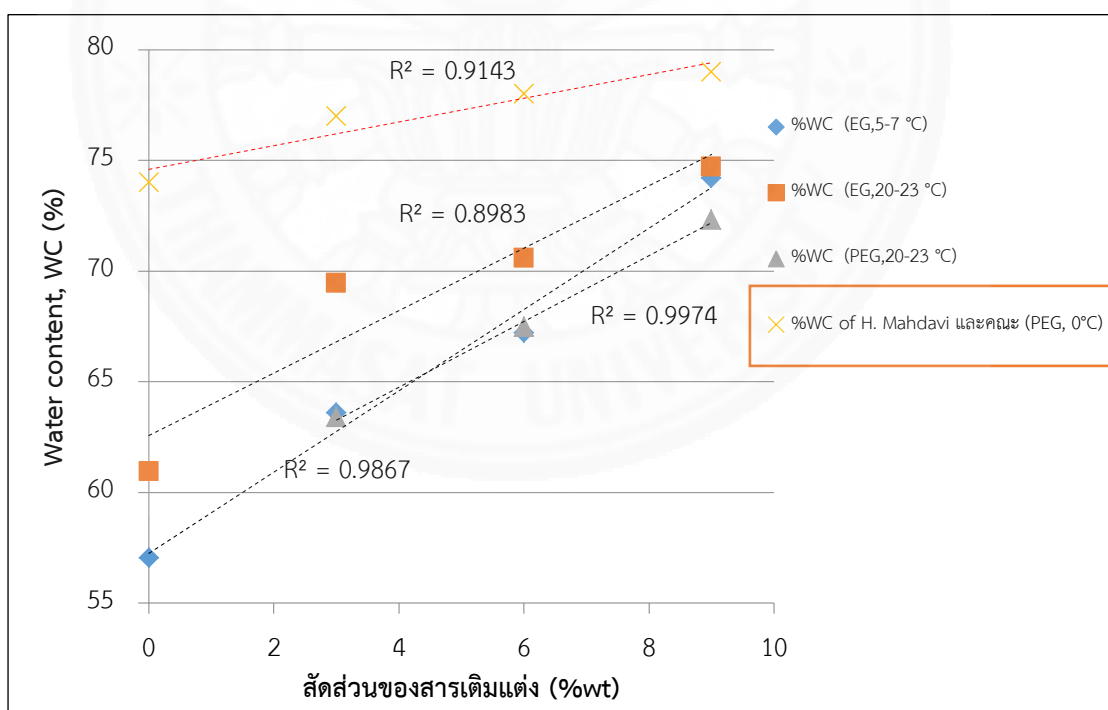
ตารางที่ 4.1

แสดงค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำ ของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่างกัน

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก	อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์			
	5-7 °C		20-23 °C	
	Porosity (%)	Water Content (%)	Porosity (%)	Water Content (%)
CA	65.50	57.05	72.26	60.95
CAEG3	74.79	63.59	76.83	69.45
CAEG6	77.99	67.20	83.35	70.58
CAEG9	84.98	74.21	92.30	74.66
CAPEG3	-	-	67.60	63.40
CAPEG6	-	-	69.76	67.46
CAPEG9	-	-	73.99	72.31



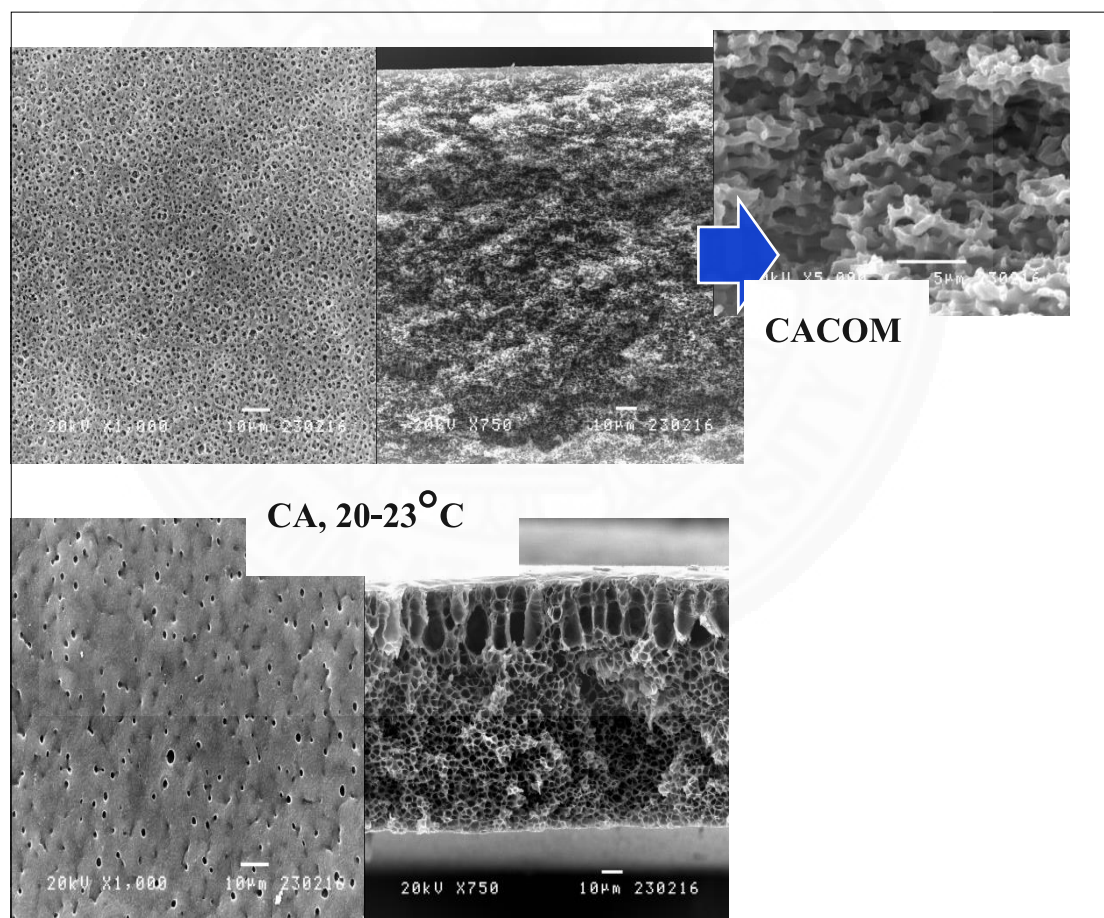
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ

4.1.4 ผลของการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตแบบสังเคราะห์กับแบบสำเร็จรูป

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตแบบสังเคราะห์กับแบบสำเร็จรูป (CACOM, จาก Whatman, pore size 0.2 μm , 47 mm Dia.) พบว่าแผ่นเยื่อเลือกมีลักษณะพื้นผิวเรียบ สีขาว และทึบแสง เหมือนกับแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นทุกชนิด และเมื่อปล่อยให้แห้งก็ยังคงสภาพเดิม ซึ่งคล้ายกับแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นโดยมีการเติมสารเติมแต่งลงไป และจากการส่อง SEM พบว่าโครงสร้างภายในของแผ่นเยื่อแบบสำเร็จรูปมีลักษณะเรียงกันเป็นชั้นๆ แต่โครงสร้างของแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นจะมีลักษณะเหมือนรังผึ้งต่อกันแสดงดังภาพที่ 4.9 และพบว่าแผ่นเยื่อเลือกแบบสำเร็จรูปจะให้ค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำมากกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.9 แสดงภาพพื้นผิว และภาพตัดขวางของแผ่นเยื่อเลือกแบบสำเร็จรูป (CACOM) และแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นชนิด CA

ตารางที่ 4.2

แสดงค่าความเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำ ของแผ่นเยื่อเลือกแบบสำเร็จรูปกับแบบสังเคราะห์ขึ้น

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก	แบบสำเร็จรูป	แบบสังเคราะห์ขึ้น (CA-1)
ค่าความเป็นรูพรุน (%)	90.46	72.26
ค่าการกักเก็บน้ำ (%)	66.25	60.95

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อเลือก

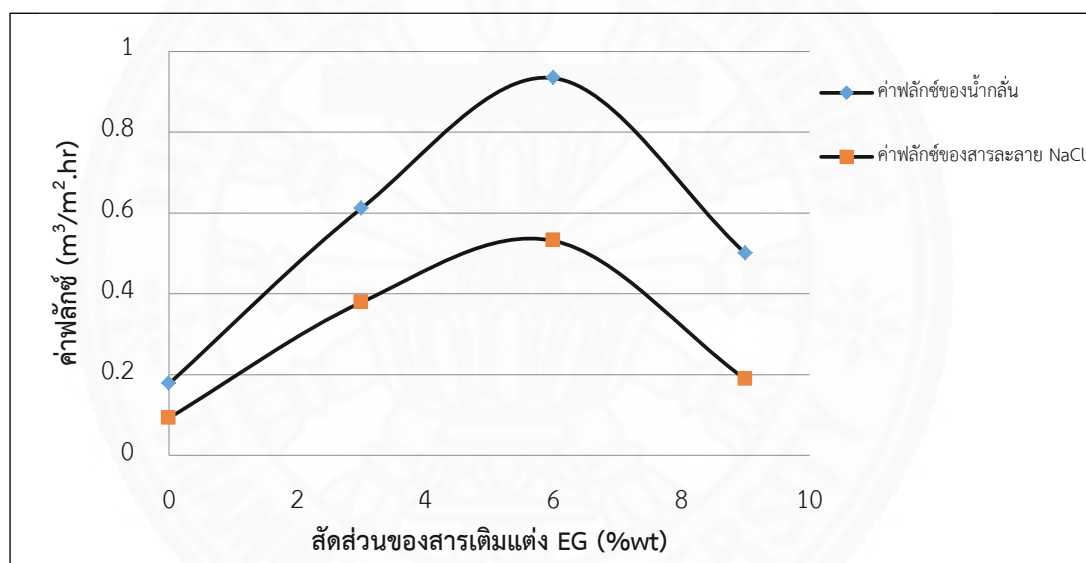
4.2.1 ผลของค่าฟลักซ์ของน้ำ

จากการทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำ โดยเป็นการเลือกแผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมสารเติมแต่งด้วยเอทิลีนไกลคอล และเป็นการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิที่ 20-23 องศาเซลเซียส เพราะเป็นแผ่นเยื่อเลือกที่สามารถแสดงถึงความชอบน้ำ และความสามารถในการกักเก็บน้ำมากที่สุด พบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเติมแต่งที่เติมลงไป ในสารละลายโพลิเมอร์ แสดงดังตารางที่ 4.3 หรือภาพที่ 4.10 และพบว่าค่าฟลักซ์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 3.5%wt มีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเติมแต่งที่เติมลงไป ในสารละลายโพลิเมอร์เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากแผ่นเยื่อเลือกที่มีการเติมสารเติมแต่งลงไป นั้นมีค่าความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และมีความชอบน้ำมากขึ้นจึงทำให้แผ่นเยื่อเลือกนั้นมีประสิทธิภาพในการยอมให้น้ำผ่านมากขึ้นด้วย นอกจากนี้จะเห็นว่าทั้งค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น และค่าฟลักซ์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG9 มีค่าน้อยกว่า แผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG6 และ CAEG3 แต่ก็ยังมีความมากกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการปรับปรุงคือแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมสารเติมแต่งลงไป ในสารละลายโพลิเมอร์สามารถทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มมากขึ้น และจากการศึกษาภาพจาก SEM ที่แผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG9 มีความเป็นรูพรุนมากจนไม่เกิดช่องว่าง เนื่องจากการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือกชนิดนี้ได้สารละลายโพลิเมอร์ที่มีความหนืดมากที่สุดจึงทำให้ขณะที่ขึ้นรูปบนแผ่นกระจกเกิดการระเหยได้เร็วกว่าแผ่นเยื่อเลือกชนิดอื่น แล้วทำให้กลายเป็นเซลปิดเร็วขึ้นจึงทำให้การระเหยออกของตัวทำละลายขณะแช่ลงในอ่างน้ำระเหยได้น้อยลง จึงทำให้มีความต้านในการไหลผ่านของน้ำมากกว่าแผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG3 และ CAEG6 จึงทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้ลดลงเมื่อทำการทดสอบที่เวลา 60 นาที ที่เท่ากัน

ตารางที่ 4.3

แสดงค่าฟลักซ์ของน้ำ และค่าฟลักซ์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก	ค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	ค่าฟลักซ์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)
CA	0.1770	0.0924
CAEG3	0.6106	0.3783
CAEG6	0.9336	0.5310
CAEG9	0.5000	0.1881

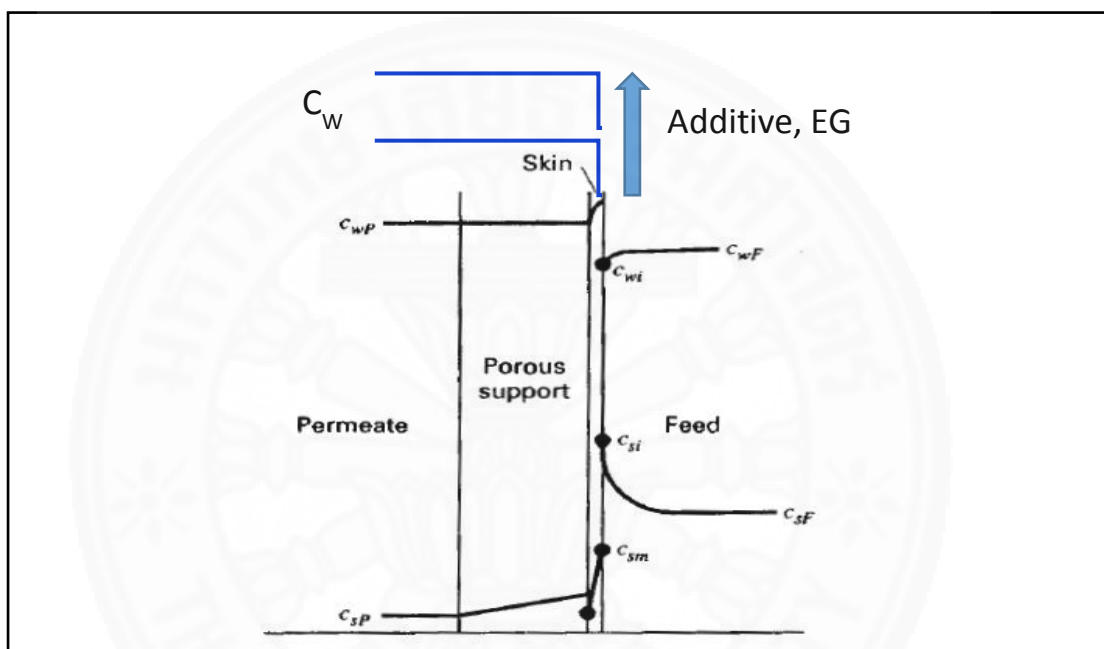


ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ

4.2.2 ผลของประสิทธิภาพในการแยกเกลือ

การทดสอบหาประสิทธิภาพในการแยกเกลือจะใช้แผ่นเยื่อเลือกประเภทเดียวกันกับที่ใช้ในการศึกษาค่าฟลักซ์ จากการศึกษาผลของสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยกเกลือ ที่แสดงดังตารางที่ 4.4 หรือภาพที่ 4.12 พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมสารเติมแต่งเอทิลีนไกลคอลสามารถแยกเกลือได้ดีกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากแผ่นเยื่อเลือกที่มีการเติมสารเติมแต่งนั้นมีขนาดของรูพรุนเล็กกว่า และมีความพรุนมากขึ้น จึงทำให้ความสามารถการยอมให้เกลือผ่านไปได้น้อยลง หรือ

สามารถอธิบายได้ตามภาพที่ 4.11 คือ ภาพที่แสดงการโพลาริเซชันของแผ่นเยื่อเลือกคือเมื่อมีการ feed สารละลายเกลือผ่านแผ่นเยื่อเลือกแล้ว ด้วยความที่แผ่นเยื่อเลือกมีความชอบน้ำมากจะเห็นว่าที่อินเตอร์เฟซความเข้มข้นของน้ำจะขึ้นสูงจาก C_{wF} เป็น C_{wP} และเช่นเดียวกันจะไม่ชอบเกลือจึงทำให้ค่าความเข้มข้นของเกลือลดลงจาก C_{sF} เป็น C_{sP} ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า หลักการโพลาริเซชันที่ผิวแผ่นเยื่อเลือก ซึ่งเมื่อแผ่นเยื่อเลือกมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยเติมสารเติมแต่งที่ชอบน้ำลงไปก็จะทำให้แผ่นเยื่อเลือกมีโพลาริเซชันของน้ำที่พื้นเลยเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้ค่า C_{wP} เพิ่มมากขึ้นอีก จึงทำให้ได้ค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือรวมลดลงไป



ภาพที่ 4.11 แสดงการโพลาริเซชันของแผ่นเยื่อเลือก จาก J.D. Seader, Ernest J. Henley, & D. Keith Roper. (2011). *Membrane separation*. (3rd ed.). United States: John Wiley & Sons.

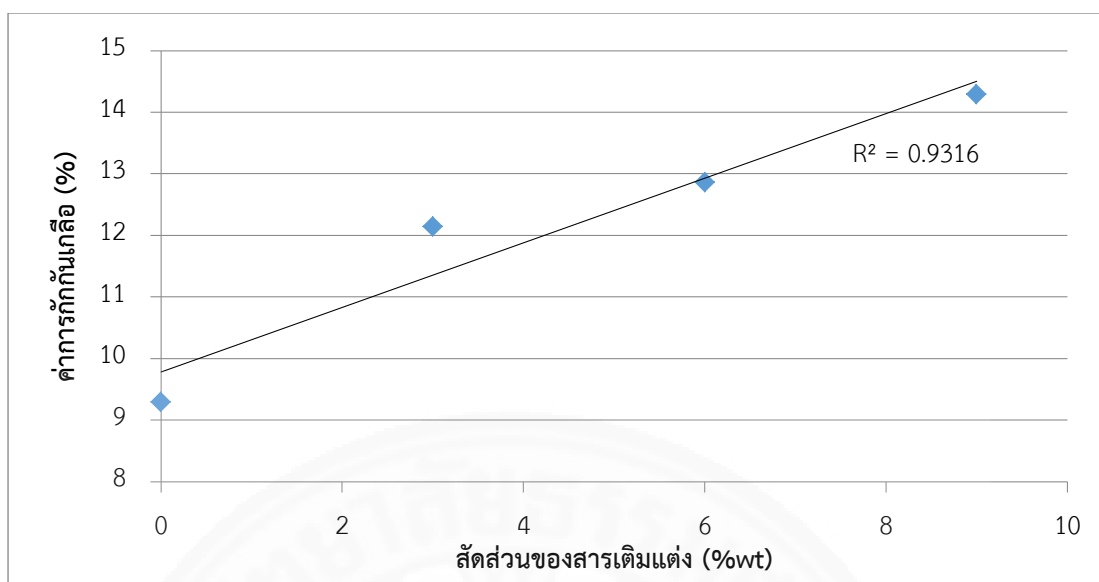
อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือที่ได้นั้นยังมีค่าที่ต่ำอยู่ เนื่องจากขนาดของรูพรุนของแผ่นเยื่อเลือกยังมีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของเกลือ ทำให้เกลือบางส่วนสามารถที่จะผ่านไปได้ และจะเห็นว่าแผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG9 มีประสิทธิภาพในการแยกเกลือมากที่สุดจึงเลือกนำไปใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการแยกเกลือโดยเปรียบเทียบกับแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการปรับปรุงที่เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ต่างกันในช่วง 2.0-3.5 %wt ที่แสดงดังตารางที่ 4.5 หรือภาพที่ 4.13 พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับปรุงคุณภาพให้ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือได้ดีกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพในทุกค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น และแผ่นเยื่อเลือกทั้งชนิดที่มีการปรับปรุง และไม่มีการปรับปรุงที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ 2.0 %wt ให้ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือมากที่สุด และลดลงตามค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือ

โซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ค่าความเข้มข้นสูงๆจะทำให้เกิดการสะสมของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในแผ่นเยื่อเลือกเร็วกว่า จึงทำให้เกลือบางส่วนสามารถผ่านแผ่นเยื่อเลือกไปได้มากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.4

แสดงสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ

ชนิดของ แผ่นเยื่อ เลือก	ครั้งที่	ความเข้มข้น ด้านหน้าของแผ่น เยื่อเลือก (%wt)	ความเข้มข้น ด้านหลังของแผ่น เยื่อเลือก (%wt)	ค่าประสิทธิภาพ ในการแยกเกลือ (%)	ค่าประสิทธิภาพ ในการแยกเกลือ เฉลี่ย (%)
CA	1	3.5	2.9	17.14	9.29
	2		3.4	2.86	
	3		3.1	11.43	
	4		3.3	5.71	
CAEG3	1	3.5	2.7	22.86	12.14
	2		3	14.29	
	3		3.4	2.86	
	4		3.2	8.57	
CAEG6	1	3.5	2.9	17.14	12.86
	2		3.2	8.57	
	3		3.1	11.43	
	4		3	14.29	
CAEG9	1	3.5	3	14.29	14.29
	2		2.6	25.71	
	3		3.1	11.43	
	4		3.3	5.71	

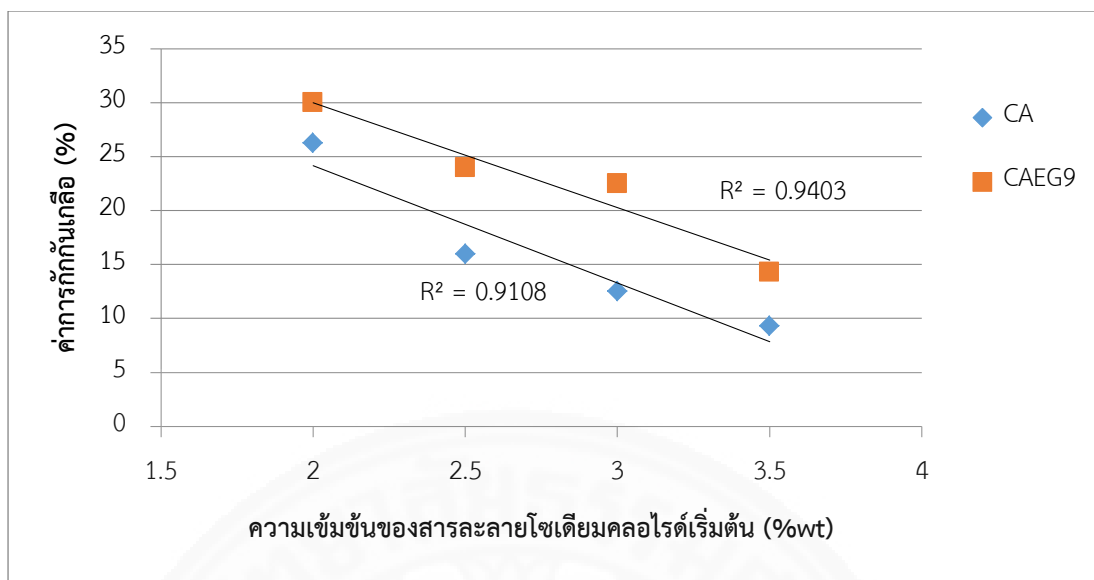


ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือกับสัดส่วนของสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5

แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ต่างกันที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น (%โดยมวล)	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (%)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ค่าเฉลี่ย
CA	2.0	50.00	30.00	15.00	10.00	26.25
	2.5	12.00	24.00	20.00	8.00	16.00
	3.0	13.33	10.00	6.67	20.00	12.50
	3.5	17.14	2.86	11.43	5.71	9.29
CAEG9	2.0	25.00	35.00	40.00	20.00	30.00
	2.5	44.00	28.00	16.00	8.00	24.00
	3.0	26.67	10.00	36.67	16.67	22.50
	3.5	14.29	25.71	11.43	5.71	14.29



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA และ CAEG9 กับค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่แตกต่างกัน

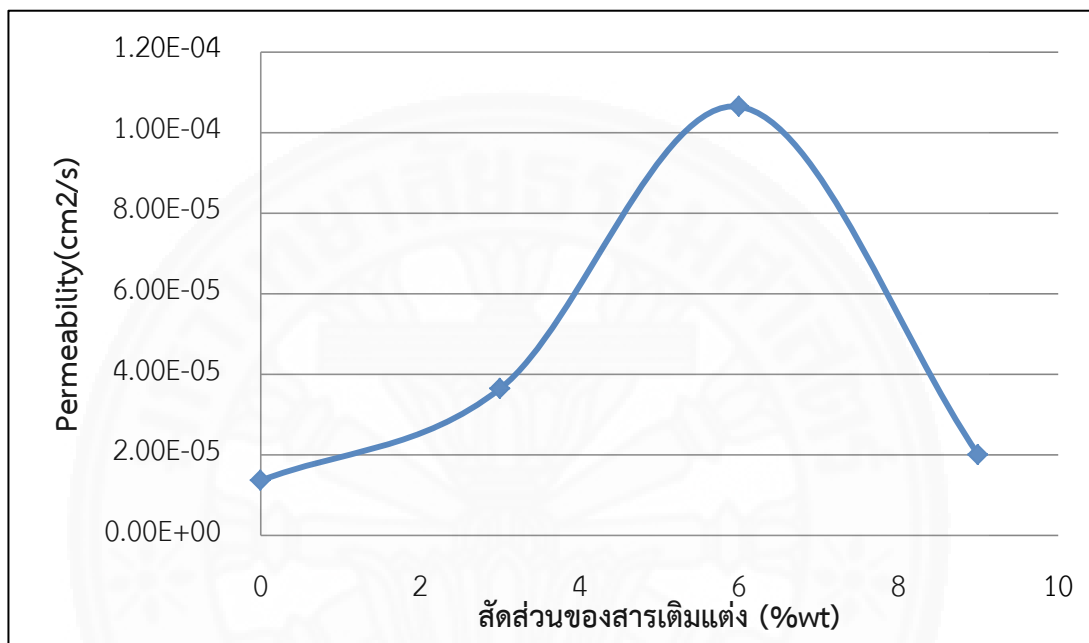
4.2.3 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์กับแผ่นเยื่อเลือกสำเร็จรูป

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตแบบสังเคราะห์กับแบบสำเร็จรูป (CACOM, จาก Whatman, pore size 0.2 μm , 47 mm Dia.) พบว่าจากการพิจารณาค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น และค่าฟลักซ์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %wt พบว่ามีค่าเท่ากับ 4.2950 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ และ 1.1787 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ ตามลำดับ และมีค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 3.5 %wt เท่ากับ 0.00% จึงกล่าวได้ว่าแผ่นเยื่อเลือกสำเร็จรูปสามารถให้ค่าฟลักซ์ได้มากกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้น แต่ได้ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือที่น้อยกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นหรือไม่สามารถแยกเกลือได้เลย

4.2.4 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมแพร่ผ่าน

จากการหาค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมแพร่ผ่าน (Permeability) ตามกฎของฟิค (Fick Law of Diffusion) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมแพร่ผ่านของแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นชนิด CA, CAEG3, CAEG6 และ CAEG9 ที่ทำการสังเคราะห์ที่ 20-23 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.36×10^{-5} , 3.64×10^{-5} , 10.64×10^{-5} , 2.00×10^{-5} cm^2/s ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.14 โดยค่าที่คำนวณได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับของค่า Permeability of water ของ F. Theeuwes และคณะ, 1976. มีค่าเท่ากับ 9.7×10^{-7} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที, J.O. Hirschfelder และคณะ, 1954. และ

R.C. Reid และคณะ, 1987.ได้ สรุปไว้ให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมแพร่ผ่านมีค่าเท่ากับ 10^{-1} - 10^{-30} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเติมสารเติมแต่งสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมแพร่ผ่านของน้ำเพิ่มมากขึ้น ยกเว้น CAEG9 ที่มีค่าน้อยกว่า CAEG3 และ CAEG6 แสดงให้เห็นว่า CAEG9 สามารถให้น้ำไหลผ่านได้น้อยกว่า CAEG3 และ CAEG6 จึงทำให้ค่าฟลักซ์ของ CAEG9 ที่มีค่าน้อยกว่า CAEG3 และ CAEG6 ดังผลการทดลองค่าฟลักซ์ข้างต้น



ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permeability กับสัดส่วนของสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ โดยพิจารณาจากลักษณะภายนอกและลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าเป็นรูพรุน และค่าการกักเก็บน้ำ พบว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ขึ้นที่มีความเป็นรูพรุน และชอบน้ำมากที่สุดคือ แผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG9 ที่มีการเติมสารเติมแต่งด้วยเอทิลีนไกลคอล และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส ซึ่งมีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.042-1.500 ไมโครเมตร และมีค่าความเป็นรูพรุนเท่ากับ 92.30% และค่าการกักเก็บน้ำเท่ากับ 74.66% จึงกล่าวได้ว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำได้มากกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 5-7 องศาเซลเซียส และการใช้สารเติมแต่งชนิดเอทิลีนไกลคอล (EG) จะให้ค่าความเป็นรูพรุนและค่าการกักเก็บน้ำได้มากกว่าการใช้สารเติมแต่งชนิดโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG)

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกเกลือ เนื่องจากปัจจัยของสัดส่วนของสารเติมแต่งที่แตกต่างกันในช่วง 0-9%wt ของ EG พบว่าค่าประสิทธิภาพการแยกเกลือโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่ 3.5%wt นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น และมีค่าฟลักซ์ของสารละลายเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ยกเว้นแผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG9 ที่ให้ค่าฟลักซ์น้อยกว่าแผ่นเยื่อเลือกชนิด CAEG3 และ CAEG6 แต่ก็ยังมากกว่า CA ซึ่งผลของค่าฟลักซ์ของสารละลายนี้เป็นไปในทางเดียวกันกับค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่น สำหรับปัจจัยจากค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่แตกต่างในช่วง 2.0-3.5%wt พบว่าเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นน้อยลงจะทำให้ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือเพิ่มขึ้น และแผ่นเยื่อเลือกที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพสามารถแยกเกลือได้ดีกว่าแผ่นเยื่อเลือกที่ไม่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพทุกความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น ดังนั้นการเติมสารเติมแต่ง EG จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตเปลี่ยนแปลงไป และให้ค่าฟลักซ์กับค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือที่ดีขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่สังเคราะห์ขึ้นกับแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตสำเร็จรูป พบว่าแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตที่สังเคราะห์ขึ้นมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาแตกต่างจากแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตสำเร็จรูป และถึงแม้แผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซิเตตสำเร็จรูปมีคุณสมบัติทางกายภาพ และมีค่าฟลักซ์มากกว่าแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะ

ซีเตตที่สังเคราะห์ขึ้น แต่มีค่าประสิทธิภาพในการแยกเกื่อนน้อยกว่าแผ่นเยื่อเลือกเซลลูโลสอะซีเตตที่สังเคราะห์ขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อเลือก ควรสังเคราะห์ในสถานที่ที่มีอุณหภูมิคงที่ และไม่มีลมพัดผ่านเพื่อควบคุมการระเหยของตัวทำละลายให้อยู่ในอัตราการระเหยที่คงที่ และช่วงเวลาในการระเหยควรทำในเวลาที่เหมาะสม ไม่ควรเข้าเกินไปหรือเร็วเกินไป เพราะจะมีผลต่อความหนา และทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง ถ้าปล่อยให้เวลาในการระเหยนานเกินไป

5.2.2 ในการศึกษาคุณลักษณะของแผ่นเยื่อเลือกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งในการเตรียมตัวอย่างแผ่นเยื่อเลือกสำหรับทดสอบ ควรใช้วิธีการตัดตัวอย่างด้วยไนโตรเจนเหลว เพื่อที่จะได้โครงสร้างที่เรียบ และชัดเจนยิ่งขึ้น และก่อนนำไปส่องควรกำจัดน้ำออกจากแผ่นเยื่อเลือกให้หมดก่อน เพราะถ้าหากมีความชื้นอยู่ในเมมเบรน ภาพที่ได้จะทำให้เห็นรูพรุนได้ไม่ชัดเจน ส่งผลให้การวิเคราะห์คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้

5.2.3 เนื่องจากประสิทธิภาพในการแยกเกื่อนมีค่าต่ำอยู่ เพราะการแยกเกื่อนในงานวิจัยนี้เป็นแบบ Dead end filtration ซึ่งจะทำให้อนุภาคเกื่อนสามารถหลุดไปยังด้าน permeate มากกว่าแบบ Cross flow filtration และบางพื้นที่ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยยังมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของเกื่อนอยู่มาก ซึ่งผลกระทบนี้อาจมาจากสัดส่วนของสารละลายโพลิเมอร์ที่ยังไม่เหมาะสมเพียงพอ

5.2.4 ถ้าต้องการให้ขนาดของรูพรุนเล็กลงมากขึ้น ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสอะซีเตต ตามการเสนองานวิจัยของ คุณ Schwarz ชวาดและฮิกเก้ Hicke (1981) หรือใช้สารเติมแต่งเป็น PEG ที่มีมวลโมเลกุลสูงๆ ตามการเสนองานวิจัยของ คุณ ซากาบาตี B.Chakrabarty และคณะ (2008)

5.2.5 และเมื่อสารละลายเริ่มต้นมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะทำให้ ความดันออสโมติกเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการให้ค่ากักกันเกื่อนเพิ่มมากขึ้นก็ควรที่จะเพิ่มความดันที่ให้แก่ระบบให้มากขึ้น ด้วย ($\Delta P > \Delta \pi$)

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- ชั้นทอง สุนทรภา. (2004). *เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. (1988). *กระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อเลือก*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- แสวง เกิดประทุม. (2540). *ทฤษฎีการกรองด้วยเมมเบรน*. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.).
- J.D. Seader, Ernest J. Henley, & D. Keith Roper. (2011). *Membrane separation*. (3rd ed.). United States: John Wiley & Sons.

บทความวารสาร

- ประกร งามกุล และ อัญชลี มุลคลี่. (2011). การประยุกต์ใช้กระบวนการออสโมซิสผันกลับในอุตสาหกรรมปัจจุบัน. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*.
- Bo Zhu, Darli T. Myat, Jin-Wook Shin, Yong-Han Na, Il-Shink Moon, Greg Connor, Shuichi Maeda, Gayle Morris, Stephen Gray, & Mikel Duke. (2015). Application of robust MFI-type zeolite membrane for desalination of saline wastewater. *Journal of Membrane Science*, 475, 167-174.
- Ehsan Saljoughi, Mohtada Sadrzadeh, & Toraj Mohammadi. (2009). Effect of preparation variables on morphology and pure water permeation flux through asymmetric cellulose acetate membranes. *Journal of Membrane Science*, 326, 627-634.
- George Q. Chen, Shinji Kanehashi, Cara M. Doherty, Anita J. Hill, & Sandra E. Kentish. (2015). Water vapor permeation through cellulose acetate membranes and its impact upon membrane separation performance for natural gas purification. *Journal of Membrane Science*, 487, 249-255.

- H.H. Schwarz, & G.H. Hicke. (1989). Influence of Casting Solution on Structure and Performance of Cellulose Acetate Membrane. *Journal of Membrane Science*, 46, 325-34.
- Hossen Mahdavi, & Taieb Shahalizade. (2015). Preparation, characterization and performance study of cellulose acetate membranes modified by aliphatic hyperbranched polyester. *Journal of Membrane Science*, 473, 256-266.
- Jeong-Hoon Kim, & Kew-Ho Lee. (1998). Effect of PEG additive on membrane formation by phase inversion. *Journal of Membrane Science*, 138, 153-163.
- J. Sikder, C. Pereira, S. Palchoudhury, K. Vohra, D. Basumatary, & P. Pal. (2009). Synthesis and characterization of cellulose acetate-polysulfone blend microfiltration membrane for separation of microbial cells from lactic acid fermentation broth. *Desalination*, 249, 802-808.
- L. Zou, I. Vidalis, D. Steele, A. Michelmore, S.P. Low. & J.Q.J.C. Verberk. (2011). Surface hydrophilic modification of RO membranes by plasma polymerization for low organic fouling. *Journal of Membrane Science*, 369, 420-428.
- Mou Sen, Ajoy Manna, & Parimal Pal. (2010). Removal of arsenic from contaminated groundwater by membrane-integrated hybrid treatment system. *Journal of Membrane Science*, 354, 108-113.
- Muhammad Zafar, Muddassir Ali, ShahzadMaqsood Khan, TahirJamil, & Muhammad TaqiZahid Butt. (2012). Effect of Additives on the Properties and Performance of Cellulose Acetate Derivative Membranes in the Separation of Isopropanol/Water Mixtures. *Desalination*, 285, 359-65.
- Reza Abedini, Seyed Mahmoud Mousavi, & Reza Aminzadeh. (2011). A Novel Cellulose Acetate (Ca) Membrane Using Tio2 Nanoparticles: Preparation, Characterization and Permeation Study. *Desalination*, 277, 40-45.
- Seema S. Shenvi, Arun M. Isloor, & A.F. Ismail. (2015). A review on RO membrane technology: Developments and challenges. *Desalination*, 368, 10-26.
- Sourirajan. (1970). Reverse Osmosis. New York. *Academic Press*, 54-86.
- Thi Phuong Nga Nguyen, Eun-Tae Yun, In-Chul Kim, & Young-Nam Kwon. (2013). Preparation of cellulose triacetate/cellulose acetate (CTA/CA)-based membranes for forward osmosis. *Journal of Membrane Science*, 433, 49-59.

Tzahi Y. Cath, Amy E. Childress, & Menachem Elimelech. (2006). Forward osmosis: Principles, application, and recent developments. *Journal of Membrane Science*, 281, 70-87.

วิทยานิพนธ์

โกวิทย์ คะลา. (1996). การเตรียมแผ่นเยื่อเลือกจากเซลลูโลสอะซิเตตสำหรับการใช้งานด้านออสโมซิสผันกลับ. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, คณะพลังงานและวัสดุ.

นายณัฐธนต์ โปสรักษ์กะ และ นางสาวนิตยา ตันเจริญ. (2013). การปรับปรุงประสิทธิภาพเยื่อแผ่นเซลลูโลสอะซิเตตเพื่อใช้ในการแยกแวกนีสีเอ็มไอออนออกจากน้ำบาดาล. (ปริญญานิพนธ์). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

ธีระ เล็กชลยุทธ. (2535). นิเวศวิทยาแหล่งน้ำ (Aquatic ecology), มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ หน้า 165 สืบค้นจาก http://cyberlab.lh1.ku.ac.th/elearn/faculty/fisher/fi16/page_2.files/page_2.html

แหล่งเรียนรู้ด้านประมง. (2010-2015). การวัดความเค็มของน้ำ (Salinity). สืบค้นจาก <http://www.aquatoyou.com/index.php/2013-05-16-04-06-08/870-salinity>

Aqua Clear Water Treatment Specialists. (2015). *Reverse Osmosis vs. Nanofiltration and Other Filtration Technologies*. สืบค้นจาก <http://www.aquaclearllc.com/technical-info/reverse-osmosis-vs-nanofiltration-and-other-filtration-technologies/>

Bright Hub Engineering. (2012). *Filtration and Membrane Separation for Water Purification*. สืบค้นจาก <http://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/54360-filtration-and-membrane-separation-for-water-purification/#>

Colour Way. (2006). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเพื่อบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. สืบค้นจาก <http://library.dip.go.th/multim6/edoc/16351.pdf>

IDE Technologies. (2016). *Sorek Project*. สืบค้นจาก http://www.ide-tech.com/blog/b_case_study/sorek-project/

Universal Utilities. (2015). สัมปทานกิจการประปาจากน้ำทะเล. สืบค้นจาก http://www.uu.co.th/uu-backend/download_media/file/download_media_th_19.pdf



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การคำนวณผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การคำนวณค่าความเป็นรูพรุน (%Porosity)

สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$\%Porosity = \frac{(W_w - W_d)}{d_{water}} \times \frac{100}{w \times l \times t} \quad (ก.1)$$

เมื่อ	W_w	คือ	น้ำหนักเปียกของแผ่นเยื่อเลือก (g)
	W_d	คือ	น้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือก (g)
	d_{water}	คือ	ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (g/cm^3)
	w	คือ	ความกว้างของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียก (cm)
	l	คือ	ความยาวของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียก (cm)
	t	คือ	ความหนาของแผ่นเยื่อเลือกขณะเปียก (cm)

ยกตัวอย่าง จากการคำนวณการทดลองของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA ครั้งที่ 1 แสดงในตารางที่ ก.1

โดยที่	ความหนาของแผ่นเยื่อเลือก	= 0.0097 cm
	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเยื่อเลือก	= $2 \times 1 = 2 \text{ cm}^2$
	ความหนาแน่นของน้ำ	= 0.9971 g/cm^3
	น้ำหนักเปียกของแผ่นเยื่อเลือก	= 0.0206 g
	น้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือก	= 0.0099 g

จะได้ว่า

$$\%Porosity = \frac{(0.0206 - 0.0099)}{0.9971} \times \frac{100}{2 \times 1 \times 0.0097}$$

$$\%Porosity = 55.32\%$$

ดังนั้น จากการคำนวณจะได้ค่าความเป็นรูพรุนเท่ากับ 55.32%

และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคิดจากสมการ

$$\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน} = \sqrt{\frac{(x - \bar{x})^2}{N}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ จากการทดลองของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA แสดงในตารางที่ ก.1

$$\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน} = \sqrt{\frac{(55.32-65.50)^2 + (74.73-65.50)^2 + (66.45-65.50)^2}{3}}$$

$$\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน} = 7.96$$

ตารางที่ ก.1

แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าความเป็นรุกรุนของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ EG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 5-7 องศาเซลเซียส

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือก (cm ²)	ความหนาของแผ่นเยื่อ (cm)	ค่าความเป็นรุกรุน (%)	ค่าความเป็นรุกรุนเฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CA	ครั้งที่ 1	0.0206	0.0099	2	0.0097	55.32	65.50	7.96
	ครั้งที่ 2	0.0352	0.0121	2	0.0155	74.73		
	ครั้งที่ 3	0.0403	0.0187	2	0.0163	66.45		
CAEG3	ครั้งที่ 1	0.0210	0.0082	2	0.0080	80.23	74.79	4.98
	ครั้งที่ 2	0.0248	0.0089	2	0.0105	75.93		
	ครั้งที่ 3	0.0207	0.0071	2	0.0100	68.20		
CAEG6	ครั้งที่ 1	0.0260	0.0079	2	0.0110	82.51	77.99	6.57
	ครั้งที่ 2	0.0216	0.0079	2	0.0100	68.70		
	ครั้งที่ 3	0.0248	0.0078	2	0.0103	82.76		
CAEG9	ครั้งที่ 1	0.0381	0.0101	2	0.0155	90.59	84.98	6.67
	ครั้งที่ 2	0.0280	0.0081	2	0.0132	75.60		
	ครั้งที่ 3	0.0374	0.0082	2	0.0165	88.74		

ตารางที่ ก.2

แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าความเป็นรูปพรุนของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ EG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือก (cm ²)	ความหนาของแผ่นเยื่อ (cm)	ค่าความเป็นรูปพรุน (%)	ค่าความเป็นรูปพรุนเฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CA	ครั้งที่ 1	0.0264	0.0106	2	0.0111	71.38	72.26	1.94
	ครั้งที่ 2	0.0191	0.0073	2	0.0084	70.44		
	ครั้งที่ 3	0.0232	0.0090	2	0.0095	74.95		
CAEG3	ครั้งที่ 1	0.0234	0.0072	2	0.0103	78.87	76.83	5.56
	ครั้งที่ 2	0.0233	0.0077	2	0.0113	69.23		
	ครั้งที่ 3	0.0255	0.0071	2	0.0112	82.38		
CAEG6	ครั้งที่ 1	0.0317	0.0092	2	0.0135	83.58	83.35	1.19
	ครั้งที่ 2	0.0315	0.0087	2	0.0135	84.69		
	ครั้งที่ 3	0.0291	0.0092	2	0.0122	81.79		
CAEG9	ครั้งที่ 1	0.0258	0.0063	2	0.0109	89.71	92.30	3.16
	ครั้งที่ 2	0.0273	0.0071	2	0.0112	90.44		
	ครั้งที่ 3	0.0293	0.0075	2	0.0113	96.74		

ตารางที่ ก.3

แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าความเป็นรูปพรุนของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือก (cm ²)	ความหนาของแผ่นเยื่อ (cm)	ค่าความเป็นรูปพรุน (%)	ค่าความเป็นรูปพรุนเฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CAPEG3	ครั้งที่ 1	0.0237	0.0077	2	0.0111	72.28	67.60	7.28
	ครั้งที่ 2	0.0203	0.0076	2	0.0087	73.20		
	ครั้งที่ 3	0.0173	0.0069	2	0.0091	57.31		
CAPEG6	ครั้งที่ 1	0.0209	0.0066	2	0.0103	69.62	69.76	8.34
	ครั้งที่ 2	0.0167	0.0060	2	0.0090	59.62		
	ครั้งที่ 3	0.0249	0.0075	2	0.0109	80.05		
CAPEG9	ครั้งที่ 1	0.0232	0.0064	2	0.0112	75.22	73.99	2.91
	ครั้งที่ 2	0.0260	0.0073	2	0.0134	69.98		
	ครั้งที่ 3	0.0270	0.0074	2	0.0128	76.79		

ตารางที่ ก.4

แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าความเป็นรูปพรุนของแผ่นเยื่อเลือกแบบสำเร็จรูป

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือก (cm ²)	ความหนาของแผ่นเยื่อ (cm)	ค่าความเป็นรูปพรุน (%)	ค่าความเป็นรูปพรุนเฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CACOM	ครั้งที่ 1	0.0367	0.0124	2	0.0136	89.60	90.46	1.22
	ครั้งที่ 2	0.0367	0.0124	2	0.0136	89.60		
	ครั้งที่ 3	0.0377	0.0127	2	0.0136	92.18		

ตอนที่ 2 การคำนวณค่าการกักเก็บน้ำ (%Water Content)

สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$\% \text{Water content} = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100 \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ W_w คือ น้ำหนักเปียกของแผ่นเยื่อเลือก (g)
 W_d คือ น้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือก (g)

ยกตัวอย่าง จากการคำนวณการทดลองของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA ครั้งที่ 1 แสดงในตารางที่ ก.4

โดยที่ น้ำหนักเปียกของแผ่นเยื่อเลือก = 0.0206 g

น้ำหนักแห้งของแผ่นเยื่อเลือก = 0.0099 g

จะได้ว่า

$$\% \text{Water content} = \frac{0.0206 - 0.0099}{0.0206} \times 100$$

$$\% \text{Water content} = 51.94\%$$

ดังนั้น จากการคำนวณจะได้ค่าการกักเก็บเท่ากับ 51.94%

ตารางที่ ก.5

แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ EG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 5-7 องศาเซลเซียส

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	ค่าการกักเก็บ น้ำ (%)	ค่าการกักเก็บน้ำ เฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
CA	ครั้งที่ 1	0.0206	0.0099	51.94	57.05	6.10
	ครั้งที่ 2	0.0352	0.0121	65.63		
	ครั้งที่ 3	0.0403	0.0187	53.60		
CAEG3	ครั้งที่ 1	0.0210	0.0082	60.95	63.59	1.97
	ครั้งที่ 2	0.0248	0.0089	64.11		
	ครั้งที่ 3	0.0207	0.0071	65.70		
CAEG6	ครั้งที่ 1	0.0260	0.0079	69.62	67.20	2.70
	ครั้งที่ 2	0.0216	0.0079	63.43		
	ครั้งที่ 3	0.0248	0.0078	68.55		
CAEG9	ครั้งที่ 1	0.0381	0.0101	73.49	74.21	2.90
	ครั้งที่ 2	0.0280	0.0081	71.07		
	ครั้งที่ 3	0.0374	0.0082	78.07		

ตารางที่ ก.6

แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ EG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	ค่าการกักเก็บ น้ำ (%)	ค่าการกักเก็บน้ำ เฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
CA	ครั้งที่ 1	0.0264	0.0106	59.85	60.95	0.81
	ครั้งที่ 2	0.0191	0.0073	61.78		
	ครั้งที่ 3	0.0232	0.0090	61.21		
CAEG3	ครั้งที่ 1	0.0234	0.0072	69.23	69.45	2.13
	ครั้งที่ 2	0.0233	0.0077	66.95		
	ครั้งที่ 3	0.0255	0.0071	72.16		
CAEG6	ครั้งที่ 1	0.0317	0.0092	70.98	70.58	1.66
	ครั้งที่ 2	0.0315	0.0087	72.38		
	ครั้งที่ 3	0.0291	0.0092	68.38		
CAEG9	ครั้งที่ 1	0.0258	0.0063	75.58	74.66	0.67
	ครั้งที่ 2	0.0273	0.0071	73.99		
	ครั้งที่ 3	0.0293	0.0075	74.40		

ตารางที่ ก.7

แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่ง และที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	ค่าการกักเก็บ น้ำ (%)	ค่าการกักเก็บน้ำ เฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
CAPEG3	ครั้งที่ 1	0.0237	0.0077	67.51	63.40	3.08
	ครั้งที่ 2	0.0203	0.0076	62.56		
	ครั้งที่ 3	0.0173	0.0069	60.12		
CAPEG6	ครั้งที่ 1	0.0209	0.0066	68.42	67.46	2.47
	ครั้งที่ 2	0.0167	0.0060	64.07		
	ครั้งที่ 3	0.0249	0.0075	69.88		
CAPEG9	ครั้งที่ 1	0.0232	0.0064	72.41	72.31	0.28
	ครั้งที่ 2	0.0260	0.0073	71.92		
	ครั้งที่ 3	0.0270	0.0074	72.59		

ตารางที่ ก.8

แสดงค่าน้ำหนักเปียก น้ำหนักแห้ง และค่าการกักเก็บน้ำของแผ่นเยื่อเลือกแบบสำเร็จรูป

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	ค่าการกักเก็บ น้ำ (%)	ค่าการกักเก็บน้ำ เฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
CAPEG3	ครั้งที่ 1	0.0367	0.0124	66.21	66.25	0.05
	ครั้งที่ 2	0.0367	0.0124	66.21		
	ครั้งที่ 3	0.0377	0.0127	66.31		

ตอนที่ 3 การคำนวณค่าฟลักซ์ของน้ำ (Water Flux)

สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$J = \frac{Q}{A \times \Delta t} \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ	J	คือ	ฟลักซ์ของน้ำ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)
	Q	คือ	ปริมาตรของน้ำหรือสารละลายด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (m^3)
	A	คือ	พื้นที่แผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ทดสอบ (m^2)
	Δt	คือ	เวลาที่ใช้ทดสอบ (hr)

โดยใช้น้ำกลั่น หรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.5%wt เป็นสารละลายตัวอย่างเริ่มต้น และอัตราการไหลของน้ำเข้าเท่ากับ 2.5 ลิตรต่อชั่วโมง

ยกตัวอย่าง จากการคำนวณการทดลองของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA ครั้งที่ 1 โดยใช้น้ำกลั่นเป็น

สารละลายเริ่มต้นแสดงในตารางที่ ก.7

โดยที่ พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ทดสอบ = $4.52 \text{ cm}^2 = 0.000452 \text{ m}^2$

เวลาที่ใช้ในการทดสอบ = 1 hr

ปริมาตรของน้ำ ด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก = 0.000060 m^3

จะได้ว่า

$$J = \frac{0.000060 \text{ m}^3}{0.000452 \text{ m}^2} \times \frac{1}{1 \text{ hr}}$$

$$J = 0.1770 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

ดังนั้น จากการคำนวณจะได้ค่าฟลักซ์ของน้ำเท่ากับ $0.1770 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$

ตารางที่ ก.9

แสดงข้อมูลของปริมาณน้ำกลั่นที่ผ่านแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส และค่าฟลักซ์ของน้ำ

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		ปริมาตรของน้ำ (m ³)	พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือก (m ²)	เวลา (hr)	ค่าฟลักซ์ (m ³ /m ² .hr)	ค่าฟลักซ์เฉลี่ย (m ³ /m ² .hr)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CA	ครั้งที่ 1	0.000060	0.000452	1	0.1327	0.1770	0.07
	ครั้งที่ 2	0.000132	0.000452	1	0.2920		
	ครั้งที่ 3	0.000048	0.000452	1	0.1062		
CAEG3	ครั้งที่ 1	0.000384	0.000452	1	0.8496	0.6106	0.15
	ครั้งที่ 2	0.000234	0.000452	1	0.5177		
	ครั้งที่ 3	0.000210	0.000452	1	0.4646		
CAEG6	ครั้งที่ 1	0.000450	0.000452	1	0.9956	0.9336	0.04
	ครั้งที่ 2	0.000402	0.000452	1	0.8894		
	ครั้งที่ 3	0.000414	0.000452	1	0.9159		
CAEG9	ครั้งที่ 1	0.000180	0.000452	1	0.3982	0.5000	0.06
	ครั้งที่ 2	0.000240	0.000452	1	0.5310		
	ครั้งที่ 3	0.000258	0.000452	1	0.5708		
CACOM	ครั้งที่ 1	0.001560	0.000452	1	3.4513	4.2950	0.55
	ครั้งที่ 2	0.002011	0.000452	1	4.4491		
	ครั้งที่ 3	0.002253	0.000452	1	4.9845		

ตารางที่ ก.10

แสดงข้อมูลของปริมาณน้ำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผ่านแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ ที่ทำการ
สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส และค่าฟลักซ์ของสารละลาย

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		ปริมาตรของสารละลาย (m ³)	พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือก (m ²)	เวลา (hr)	ค่าฟลักซ์ (m ³ /m ² .hr)	ค่าฟลักซ์เฉลี่ย (m ³ /m ² .hr)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CA	ครั้งที่ 1	0.000024	0.000452	1	0.0531	0.0924	0.03
	ครั้งที่ 2	0.000063	0.000452	1	0.1394		
	ครั้งที่ 3	0.000036	0.000452	1	0.0796		
	ครั้งที่ 4	0.000044	0.000452	1	0.0973		
CAEG3	ครั้งที่ 1	0.000080	0.000452	1	0.1770	0.3783	0.20
	ครั้งที่ 2	0.000114	0.000452	1	0.2522		
	ครั้งที่ 3	0.000316	0.000452	1	0.6991		
	ครั้งที่ 4	0.000174	0.000452	1	0.3850		
CAEG6	ครั้งที่ 1	0.000144	0.000452	1	0.3186	0.5310	0.25
	ครั้งที่ 2	0.000282	0.000452	1	0.6239		
	ครั้งที่ 3	0.000408	0.000452	1	0.9027		
	ครั้งที่ 4	0.000126	0.000452	1	0.2788		
CAEG9	ครั้งที่ 1	0.000086	0.000452	1	0.1903	0.1881	0.07
	ครั้งที่ 2	0.000068	0.000452	1	0.1504		
	ครั้งที่ 3	0.000052	0.000452	1	0.1150		
	ครั้งที่ 4	0.000134	0.000452	1	0.2965		
CACOM	ครั้งที่ 1	0.000398	0.000452	1	0.8805	1.1787	0.20
	ครั้งที่ 2	0.000651	0.000452	1	1.4403		
	ครั้งที่ 3	0.000524	0.000452	1	1.1593		
	ครั้งที่ 4	0.000558	0.000452	1	1.2345		

ตอนที่ 4 การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (Salt Rejection)

สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f} \right) \times 100 \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ	R	คือ	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (%)
	C_p	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (%wt)
	C_f	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้าแผ่นเยื่อเลือก (%wt)

โดยแยกเป็น 2 กรณี คือ ทำการศึกษาผลของสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกเกลือ และทำศึกษาผลของความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2.0-3.5 %wt โดยใช้แผ่นเยื่อเลือกชนิด CA และ CAEG9 ซึ่งกำหนดให้พื้นที่ของแผ่นเยื่อเลือกที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 4.52 ตารางเซนติเมตร และอัตราไหลของน้ำขาเข้าเท่ากับ 2.5 ลิตรต่อชั่วโมง และทำการวัดความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ก่อนแผ่นเยื่อเลือกและหลังแผ่นเยื่อเลือก โดยอาศัยหลักการทำความของเครื่องวัดค่าความเค็ม (Reflecto-Salinometer)

ยกตัวอย่าง จากการคำนวณการทดลองของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA ครั้งที่ 1 แสดงในตารางที่ ก.9

โดยที่ ความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้าแผ่นเยื่อเลือก (C_f) = 3.5% = 0.035

ความเข้มข้นของสารละลายด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (C_p) = 2.9% = 0.029

จะได้ว่า

$$R = \left(1 - \frac{0.035}{0.029} \right) \times 100$$

$$R = 17.14\%$$

ดังนั้น จากการคำนวณจะได้ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือเท่ากับ 17.14%

ตารางที่ ก.11

แสดงผลของสัดส่วนของสารเติมแต่งที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ และข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		C _F (%wt)	C _P (%wt)	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (%)	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือเฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CA	ครั้งที่ 1	3.5	2.9	17.14	9.29	5.49
	ครั้งที่ 2	3.5	3.4	2.86		
	ครั้งที่ 3	3.5	3.1	11.43		
	ครั้งที่ 4	3.5	3.3	5.71		
CAEG3	ครั้งที่ 1	3.5	2.7	22.86	12.14	7.39
	ครั้งที่ 2	3.5	3.0	14.29		
	ครั้งที่ 3	3.5	3.4	2.86		
	ครั้งที่ 4	3.5	3.2	8.57		
CAEG6	ครั้งที่ 1	3.5	2.9	17.14	12.86	3.19
	ครั้งที่ 2	3.5	3.2	8.57		
	ครั้งที่ 3	3.5	3.1	11.43		
	ครั้งที่ 4	3.5	3.0	14.29		
CAEG9	ครั้งที่ 1	3.5	3.0	14.29	14.29	7.28
	ครั้งที่ 2	3.5	2.6	25.71		
	ครั้งที่ 3	3.5	3.1	11.43		
	ครั้งที่ 4	3.5	3.3	5.71		
CACOM	ครั้งที่ 1	3.5	0	0	0	0
	ครั้งที่ 2	3.5	0	0		
	ครั้งที่ 3	3.5	0	0		
	ครั้งที่ 4	3.5	0	0		

ตารางที่ ก.12

แสดงผลของความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่แตกต่างกันที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ และข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA และ CAEG9 ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		C _F (%wt)	C _P (%wt)	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (%)	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือเฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CA	ครั้งที่ 1	2.0	1.0	50.00	26.25	15.56
	ครั้งที่ 2	2.0	1.4	30.00		
	ครั้งที่ 3	2.0	1.7	15.00		
	ครั้งที่ 4	2.0	1.8	10.00		
CAEG9	ครั้งที่ 1	2.0	1.5	25.00	30.00	7.91
	ครั้งที่ 2	2.0	1.3	35.00		
	ครั้งที่ 3	2.0	1.2	40.00		
	ครั้งที่ 4	2.0	1.6	20.00		
CA	ครั้งที่ 1	2.5	2.2	12.00	16.00	6.32
	ครั้งที่ 2	2.5	1.9	24.00		
	ครั้งที่ 3	2.5	2.0	20.00		
	ครั้งที่ 4	2.5	2.3	8.00		
CAEG9	ครั้งที่ 1	2.5	1.4	44.00	24.00	13.56
	ครั้งที่ 2	2.5	1.8	28.00		
	ครั้งที่ 3	2.5	2.1	16.00		
	ครั้งที่ 4	2.5	2.3	8.00		

ตารางที่ ก.12

แสดงผลของความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่แตกต่างกันที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ และข้อมูลความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA และ CAEG9 ที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		C _F (%wt)	C _P (%wt)	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือ (%)	ค่าประสิทธิภาพในการแยกเกลือเฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
CA	ครั้งที่ 1	3.0	2.6	13.33	12.50	4.93
	ครั้งที่ 2	3.0	2.7	10.00		
	ครั้งที่ 3	3.0	2.8	6.67		
	ครั้งที่ 4	3.0	2.4	20.00		
CAEG9	ครั้งที่ 1	3.0	2.2	26.67	22.50	10.10
	ครั้งที่ 2	3.0	2.7	10.00		
	ครั้งที่ 3	3.0	1.9	36.67		
	ครั้งที่ 4	3.0	2.5	16.67		
CA	ครั้งที่ 1	3.5	2.9	17.14	9.29	5.49
	ครั้งที่ 2	3.5	3.4	2.86		
	ครั้งที่ 3	3.5	3.1	11.43		
	ครั้งที่ 4	3.5	3.3	5.71		
CAEG9	ครั้งที่ 1	3.5	3.0	14.29	14.29	7.28
	ครั้งที่ 2	3.5	2.6	25.71		
	ครั้งที่ 3	3.5	3.1	11.43		
	ครั้งที่ 4	3.5	3.3	5.71		

ตอนที่ 5 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมแพร่ผ่าน

สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$D = \frac{J \times l_m}{(C_F - C_P)} \quad (ก.5)$$

เมื่อ	D	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมแพร่ผ่าน (cm^2/s)
	C_P	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (kmol/m^3)
	C_F	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้าแผ่นเยื่อเลือก (kmol/m^3)
	l_m	คือ	ความหนาของแผ่นเยื่อเลือก (m)
	J	คือ	ค่าฟลักซ์ของสารละลาย ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

โดยจะใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.5%wt เป็นสารละลายตัวอย่าง เริ่มต้น และอัตราไหลของน้ำเข้าเท่ากับ 2.5 ลิตรต่อชั่วโมง

ยกตัวอย่าง จากการคำนวณการทดลองของแผ่นเยื่อเลือกชนิด CA ครั้งที่ 1 แสดงในตารางที่ ก.12

โดยที่ ความเข้มข้นของสารละลายด้านหน้าแผ่นเยื่อเลือก = 3.5 g/100ml

$$= \frac{3.5 \text{ g}}{100 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ kmol}}{58.44 \text{ kg}} \times \frac{10^6 \text{ ml}}{1 \text{ m}^3}$$

$$= 0.5989 \text{ kmol}/\text{m}^3$$

ความเข้มข้นของสารละลายด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก = 2.9 g/100ml

$$= 0.4962 \text{ kmol}/\text{m}^3$$

ความหนาของแผ่นเยื่อเลือก = 0.000097 m

ค่าฟลักซ์ของสารละลาย = 0.0531 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$

$$D = \frac{0.0531 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \times 0.000097 \text{ m}}{(0.5989 - 0.4962) \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}} \times \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ kmol}}{22.42 \times 10^6 \text{ cm}^3} \times \frac{10^4 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}$$

$$D = 6.22 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$$

ดังนั้น จากการคำนวณจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมแพร่ผ่าน (Permeability) ของน้ำเท่ากับ $6.22 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$

ตารางที่ ก.13

แสดงข้อมูลการในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมแพร่ผ่านของแผ่นเยื่อเลือกชนิดต่างๆ

ชนิดของแผ่นเยื่อเลือก		ความหนาของแผ่นเยื่อเลือก (cm)	ค่าฟลักซ์ของเกลือ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	ความเข้มข้นด้านหลังแผ่นเยื่อเลือก (kmol/m^3)	ความเข้มข้นด้านหน้าแผ่นเยื่อเลือก (kmol/m^3)	Permeability (cm^2/s)
CA	ครั้งที่ 1	0.000097	0.0531	0.5989	0.4962	1.36E-05
	ครั้งที่ 2		0.0796		0.5305	
	ครั้งที่ 3		0.0973		0.5647	
CAEG3	ครั้งที่ 1	0.000100	0.1770	0.5989	0.4620	3.64E-05
	ครั้งที่ 2		0.2522		0.5133	
	ครั้งที่ 3		0.3850		0.5476	
CAEG6	ครั้งที่ 1	0.000120	0.6239	0.5989	0.5476	10.64E-05
	ครั้งที่ 2		0.9027		0.5305	
	ครั้งที่ 3		0.2788		0.5133	
CAEG9	ครั้งที่ 1	0.000132	0.1903	0.5989	0.5133	2.00E-05
	ครั้งที่ 2		0.1504		0.4449	
	ครั้งที่ 3		0.1150		0.5305	

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวนิตยา ตันเจริญ
วันเดือนปีเกิด	2 พฤษภาคม 2535
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2556: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ทุนการศึกษา	พ.ศ. 2558: ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์เพื่อนำไปสู่ การตีพิมพ์เผยแพร่ สำนักงานบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2558: ทุนสนับสนุนโครงการวิจัย เพื่อทำ วิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2557: ทุนการศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

Nittaya Tancharoen, & Tippabust Eksangsri. (2015). *Modification of Cellulose Acetate Membrane for Seawater Treatment*. การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ the 4th International Symposium on Engineering, Energy and Environment, Thammasat University, Pattaya Campus, Thailand.