

การเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง  
สำหรับการกรองน้ำผลไม้

**Preparation and Characterization of Polymeric Hollow Fiber Membrane  
for Fruit Juice Filtration**

ศิริรัตน์ ตั้งสถิตพร

**Sirorat Tungsatitporn**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Science in Polymer Science and Technology**

**Prince of Songkla University**

**2550**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

๗

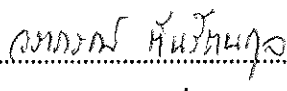
เลขหมู่	QD63.F5	ด69	๖550	ค.	2
Bib Key	๖84490				
	๖3 กค. ๖550				

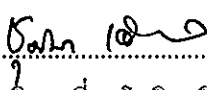
(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์                    การเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์เมมเบรนชนิด  
เส้นใยกลวงสำหรับการกรองน้ำผลไม้  
ผู้เขียน                            นางสาวศิริโรจน์ ตั้งสัจจิตพร  
สาขาวิชา                         วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์


---

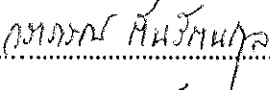
คณะกรรมการที่ปรึกษา

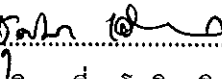
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ดันรัตน์กุล)

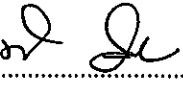
.....กรรมการ  
(ดร.ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต)

คณะกรรมการสอบ

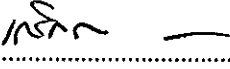
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ยูรวงศ์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ดันรัตน์กุล)

.....กรรมการ  
(ดร.ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต)

.....กรรมการ  
(ดร.พิชิตน์ ลิ้มปะนะพิทยาธร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และ  
เทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสำหรับการกรองน้ำผลไม้
ผู้เขียน	นางสาวสิโรรัตน์ ตั้งสติพร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2549

### บทคัดย่อ

พอลิซัลโฟนและพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง เตรียมด้วยกระบวนการเปลี่ยนเฟส โดยใช้ น้ำเป็นสารทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวทั้งภายในและภายนอกเมมเบรน ใช้เอ็น - เมทิล - 2 - ไพโรโรลิโดนเป็นตัวทำละลาย ใช้สารเติมแต่ง 2 ชนิด คือ สารพลาสติกไซเซอร์ ได้แก่ ไตรอะซิติก และ 1,2 - โพรเพนไดออก และสารก่อรูพรุน ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลไพโรโรลิโดน เคลือบเมมเบรนที่ขึ้นรูปแล้วด้วยกลีเซอรอลเพื่อป้องกันการยุบตัวของรูพรุน ทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์และการกรองน้ำอ้อยภายใต้ความดัน 1-3 bar และ 1 bar ตามลำดับ วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงดังต่อไปนี้ การกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลด้วยสารละลายเปปซินและ โบวี ซีรัม แอลบูมิน ภายใต้ความดัน 1 bar การหาขนาดรูพรุนด้วยวิธีการใช้ปรอท การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึง 50 mm/min ตรวจสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ พบว่าความหนืดที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงนี้ควรมีค่าไม่เกิน 4,800 mPa.s สารเติมแต่งที่เติมลงในเมมเบรนมีผลต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากกว่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยและไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลสมบัติความทนแรงดึง ขนาดรูพรุนและสัณฐานวิทยา ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกันสารเติมแต่งพอลิเอทิลีนไกลคอลจะมีความเหมาะสมต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมากกว่าสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ พอลิซัลโฟนและพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีค่าสภาพการซึมผ่านได้ในช่วง 14 - 114  $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  และ 36 - 333  $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  ตามลำดับ และมีค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อย 10  $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และ 15  $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ตามลำดับ น้ำอ้อยที่ได้จากการกรองด้วยเมมเบรนทั้งสองชนิดนี้มีความใสเพิ่มขึ้น และความเข้มของสีจางลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำอ้อยสดก่อนนำมากรอง ในขณะที่ปริมาณน้ำตาล (น้ำตาลซูโครส) ของน้ำอ้อยสดก่อนนำมากรองและน้ำอ้อยที่กรองด้วยเมมเบรนมีค่าใกล้เคียงกัน เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 2 ชนิดมีค่าการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 67,000 Da มีขนาดรูพรุนในช่วง 0.08 - 0.17  $\mu\text{m}$  สมบัติความทนแรงดึงของเมมเบรนทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความทนแรงดึง 2 - 5 MPa และระยะยืด ณ

จุดขาด 27 - 60% นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะวิทยาของเมมเบรนขึ้นอยู่กับอัตราเร็วการแข็งตัวของเมมเบรน บริเวณที่เกิดการแข็งตัวเร็วจะมีโครงสร้างรูพรุนแบบทรงกระบอก บริเวณที่แข็งตัวช้าจะมีโครงสร้างรูพรุนแบบทรงกลม ดังนั้น เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 2 ชนิดจึงมีโครงสร้างรูพรุนแบบทรงกระบอก 2 ชั้นบริเวณภายในและภายนอกของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง พอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากกว่าพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง แต่เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 2 ชนิดมีสมบัติด้านอื่นไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจึงมีความเหมาะสมมากกว่าพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

**Thesis Title** Preparation and Characterization of Polymeric Hollow Fiber Membrane for Fruit Juice Filtration  
**Author** Miss Sirorat Tungsatiporn  
**Major Program** Polymer Science and Technology  
**Academic Year** 2006

### ABSTRACT

Polysulfone and polyethersulfone hollow fiber membranes were prepared by phase inversion process. Water was used as both the internal and the external coagulants. N-methyl-2-pyrrolidone was used as a solvent. Two types of additives were used: (1) plasticizer type including triacetin and 1,2-propanediol; (2) pore forming additive type including poly(ethylene glycol) and poly(vinyl pyrrolidone). The spun fibers were post-treated in glycerol aqueous solution to prevent the collapse of porous structures. Water permeation and sugar cane juice filtration were tested under pressure of 1 – 3 bar and 1 bar, respectively. The hollow fiber membranes were characterized by molecular weight cut off (MWCO) measurement by using pepsin and bovine serum albumin under pressure of 1 bar and pore size measurement by using mercury intrusion test. Morphology was observed by using a scanning electron microscope. Tensile properties were tested at a speed of 50 mm/min. Polymer solution viscosity was investigated to determine ease of fiber spinning. Experiment results showed that solution viscosity  $\leq 4,800$  mPa.s was suitable for spinning. An addition of additives affected on pure water flux more than flux of sugar cane juice. It is observed that pore forming additives showed little changes in MWCO, tensile properties, pore size and morphology. Poly(ethylene glycol) was suitable for pure water flux more than other additives under the condition tested. Permeability of polysulfone and polyethersulfone hollow fiber membranes were in the range of 14 - 114 and 36 - 333  $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$ , respectively. The flux of sugar cane juice of polysulfone and polyethersulfone hollow fiber membrane was 10 and 15  $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ , respectively. Sugar cane juice permeate showed more clarity and less coloring than raw juice, while sugar content (sucrose) of feed and permeate was in the same range. Both hollow fiber membranes showed MWCO approximately 67,000 Da and pore size in the range of 0.08 - 0.17  $\mu\text{m}$ . Tensile properties of both polymer membranes were in the same range. Tensile strength was 2 - 5 MPa and elongation at break was 27 - 60%. It was

found that morphology of membrane depended on a demixing rate. Hollow fiber membranes had a double layer finger - like structure with internal and external skin layer. The finger - like structure was generally formed in a faster coagulation rate, whereas a porous sponge - like structure was formed in a slower coagulation rate. Polyethersulfone hollow fiber membrane showed higher pure water flux than polysulfone hollow fiber membrane while the other properties of both hollow fiber membranes were in the same range, therefore polyethersulfone was more suitable than polysulfone.

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ ตันรัตนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่กรุณาแนะนำแนวทางในการทำการวิจัยและให้คำปรึกษาที่ดีตลอดมา จนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้ ตลอดจนเชื้อเชิญเพื่อสถานที่และอำนวยความสะดวกขณะทำการวิจัยที่ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ขอขอบพระคุณ โครงการการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท - เอก ระหว่างสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยกับสถาบันการศึกษา และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนการวิจัย อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตลอดจนคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณวีระเดช กীরติธนวิทย์ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยทุกท่านและเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และขอขอบคุณน้องสาว ที่คอยเป็นกำลังใจสนับสนุนการศึกษาของข้าพเจ้าอย่างเต็มที่และให้ทุกอย่างแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ศิริรัตน์ ตั้งสถิตพร

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(13)
รายการรูป	(15)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กระบวนการเมมเบรน	5
2.1.1 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน	7
2.1.1.1 พอลิเมอร์เมมเบรน	7
2.1.1.2 อนินทรีย์เมมเบรน	8
2.1.1.3 เมมเบรนชีวภาพ	8
2.1.2 การเตรียมเมมเบรนสังเคราะห์	9
2.1.2.1 การเปลี่ยนเฟส	9
2.1.3 โมดูลเมมเบรน	11
2.1.3.1 โมดูลชนิดแผ่นและกรอบ	11
2.1.3.2 โมดูลชนิดท่อม้วน	12
2.1.3.3 โมดูลชนิดท่อ	12
2.1.3.4 โมดูลชนิดเส้นใยกลวง	12
2.1.4 ปรากฏการณ์โพลาไรเซชันและการอุดตัน	14
2.1.4.1 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน	15
2.1.4.2 การอุดตันเมมเบรน	16
2.1.5 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน	16
2.1.5.1 การประยุกต์ใช้งานของเมมเบรน	16



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.6 ลักษณะเฉพาะของเมมเบรน	17
2.1.6.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	17
2.1.6.2 การตรวจสอบโดยใช้ปรอท	18
2.1.6.3 การตรวจสอบการแพร่ผ่านเมมเบรน	18
2.1.6.4 การตรวจสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล	19
2.1.6.5 การตรวจสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง	20
2.2 พอลิซัลโฟนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟน	21
2.2.1 พอลิซัลโฟน	21
2.2.2 พอลิอีเทอร์ซัลโฟน	21
2.3 การผลิตน้ำตาลจากอ้อย	22
2.4 ส่วนประกอบของน้ำอ้อย	24
2.5 การตรวจสอบเอกสาร	24
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิซัลโฟนเมมเบรน	24
2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรน	28
2.5.3 น้ำอ้อย	31
3. วิธีการวิจัย	34
3.1 สารเคมี	34
3.2 อุปกรณ์การวิจัย	35
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	35
3.4 วิธีดำเนินการทดลอง	36
3.4.1 การเตรียมเมมเบรนชนิดแผ่น	36
3.4.2 การเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	37
3.4.3 การประกอบโมดูล	40
3.4.4 การทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนชนิดแผ่น	41
3.4.5 การทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	41
3.4.6 การทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	42

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.7 การทดสอบการกรองน้ำอ้อยของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	43
3.4.8 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด	43
3.4.9 การวิเคราะห์สีของน้ำอ้อย	43
3.4.10 การวิเคราะห์ความขุ่นของน้ำอ้อย	44
3.4.11 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลของน้ำอ้อย	44
3.4.12 การทดสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์	44
3.4.13 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	45
3.4.14 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	45
3.4.15 การหาขนาดรูพรุน โดยการใช้อุปกรณ์	45
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	46
4.1 พอลิซัลโฟนเมมเบรน	46
4.1.1 ผลการทดสอบฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น	46
4.1.2 ผลการทดสอบฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	48
4.1.3 ผลทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	50
4.1.4 ผลทดสอบการกรองน้ำอ้อยของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	52
4.1.4.1 ผลการทดสอบฟลักซ์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	52
4.1.4.2 ผลการวิเคราะห์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	53
4.1.4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	55
4.1.5 ผลการทดสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์	56
4.1.6 ผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	57

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.7 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	58
4.1.8 ผลการหาขนาดรูพรุนของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยการใช้ปรอท	59
4.2 พอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรน	61
4.2.1 ผลการทดสอบฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น	61
4.2.1.1 แปรชนิดและปริมาณสารก่อรูพรุน 1,2-โพรเพนไดออกไซด์และไตรอะซิติก	61
4.2.1.2 แปรน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณสารก่อรูพรุนกลุ่ม PEG และ PVP	62
4.2.2 ผลการทดสอบฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	63
4.2.2.1 แปรปริมาณพอลิเอเทอร์ซัลโฟนและปริมาณสารก่อรูพรุนไตรอะซิติก	63
4.2.2.2 แปรชนิดสารก่อรูพรุน PEG และ PVP	65
4.2.3 ผลทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	66
4.2.3.1 แปรปริมาณพอลิเอเทอร์ซัลโฟนและปริมาณสารก่อรูพรุนไตรอะซิติก	66
4.2.3.2 แปรชนิดสารก่อรูพรุน	67
4.2.4 ผลทดสอบการกรองน้ำอ้อยของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	68
4.2.4.1 ผลฟลักซ์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	68
4.2.4.2 ผลการวิเคราะห์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	69
4.2.4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	71

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.5 ผลการทดสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์	71
4.2.6 ผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	73
4.2.6.1 แปรปริมาณพอลิอีเทอร์ซัลโฟนและปริมาณสารก่อรูพรุน	73
4.2.6.2 แปรชนิดสารก่อรูพรุน	74
4.2.7 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	75
4.2.8 ผลการหาขนาดรูพรุนของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยการใช้ปรอท	77
5. สรุปผลการทดลอง	79
5.1 สรุปผลการทดลอง	79
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก	89
ก. เปรียบเทียบการรักษาสภาพพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง ด้วยสารละลายกลีเซอรอล	90
ประวัติผู้เขียน	93

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ค่าฟลักซ์และความดัน ในกระบวนการเมมเบรนต่างๆ	7
2.2	ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรนในกระบวนการต่างๆ	8
2.3	เปรียบเทียบโมดูลเมมเบรนแบบต่างๆ	13
3.1	สูตรต่างๆของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น	38
3.2	สูตรต่างๆของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น	39
3.3	สูตรต่างๆของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	40
3.4	สูตรต่างๆของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	40
4.1	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยแผ่น	46
4.2	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	48
4.3	ความสามารถในการกักกันของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	51
4.4	วิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด สี และความขุ่นของน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	54
4.5	วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	55
4.6	ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดแผ่นและชนิดเส้นใยกลวง	56
4.7	สมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	57
4.8	ขนาดรูพรุนและความพรุนตัวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	60
4.9	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นแปรชนิดและปริมาณสารก่อรูพรุน 1,2-โพรเพนไดออกไซด์และไตรอะซิติก	61
4.10	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นแปรน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณสารก่อรูพรุนกลุ่ม PEG	63
4.11	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นแปรน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณสารก่อรูพรุนกลุ่ม PVP	63
4.12	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรปริมาณพอลิเอเทอร์ซัลโฟนและปริมาณสารก่อรูพรุนไตรอะซิติก	64
4.13	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรชนิดสารก่อรูพรุน	65

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.14	ความสามารถในการกักกันของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรปริมาณพอลิเอเทอร์ซัลโฟนและปริมาณสารก่อรูพรุน	66
4.15	ความสามารถในการกักกันของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรชนิดสารก่อรูพรุน	68
4.16	วิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด สี และความขุ่นของน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	70
4.17	วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	71
4.18	ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดแผ่นแปรชนิดและปริมาณสารก่อรูพรุน 1,2-โพรเพนไดออกไซด์และไตรอะซิติก	72
4.19	ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดแผ่นแปรน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณสารก่อรูพรุนกลุ่ม PEG	72
4.20	ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดแผ่นแปรน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณสารก่อรูพรุนกลุ่ม PVP	73
4.21	ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดเส้นใยกลวง	73
4.22	สมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรปริมาณพอลิเอเทอร์ซัลโฟนและปริมาณสารก่อรูพรุน	74
4.23	สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรชนิดสารก่อรูพรุน	75
4.24	ขนาดรูพรุนและความพรุนตัวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	77
ตารางภาคผนวก		
ก1	สูตรต่างๆของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง	91
ก2	พอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่รักษาสภาพเมมเบรนด้วยสารละลายกลีเซอรอลและไม่รักษาสภาพเมมเบรน	91
ก3	การกักกันระดับน้ำหนักรักษาของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่รักษาสภาพเมมเบรนด้วยสารละลายกลีเซอรอลและไม่รักษาสภาพเมมเบรน	92

## รายการรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะการใช้เมมเบรนกันระหว่าง 2 เฟส	5
2.2	การเตรียมเมมเบรนชนิดแผ่น โดยวิธีแยกเฟสด้วยการจุ่ม	11
2.3	การเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางด้วยกระบวนการ dry – wet spinning	11
2.4	รูปแบบของเมมเบรนชนิดแผ่นและกรอบ	12
2.5	รูปแบบของเมมเบรนชนิดท่อม้วน	13
2.6	รูปแบบของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง	13
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา	14
2.8	ความต้านทานต่อการไหลที่เกิดขึ้นในเมมเบรน	15
2.9	โครงสร้างทางเคมีของพอลิซัลโฟน	21
2.10	โครงสร้างทางเคมีของพอลิอีเทอร์ซัลโฟน	22
3.1	เครื่องเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง	38
3.2	ชุดทดสอบการกรองโมดูลชนิดแผ่นและโมดูลชนิดเส้นใยกลาง	42
4.1	ฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง	53
4.2	น้ำอ้อยก่อนและหลังกรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง	55
4.3	ภาพถ่ายภาคตัดขวางของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางจากกล้อง SEM	59
4.4	ฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยของพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง	69
4.5	ภาพถ่ายภาคตัดขวางของพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางจากกล้อง SEM	76

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปลายศตวรรษที่ 20 อุตสาหกรรมต่างๆมีความสนใจกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแพร่ (diffusion) การดูดซึม (sorption) การซึมผ่าน (permeation) มาก เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้เป็นปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกิดขึ้นในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการเคลือบวัสดุ (coating) อุตสาหกรรมวัสดุห่อหุ้มอาหารและผัก (packaging materials for food and vegetables) อุตสาหกรรมอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับชีวภาพ (biomedical devices) และอุตสาหกรรมเมมเบรน

การผลิตเมมเบรนได้มีการปรับปรุงความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและเทคโนโลยี เพื่อให้ใช้ผลิตเมมเบรนทางการค้าสำหรับกระบวนการแยกของเหลวและก๊าซ การพัฒนาเมมเบรนไม่เพียงแต่พัฒนาสมบัติของเมมเบรนให้เหมาะสมกับความต้องการใช้งาน แต่ยังคงพัฒนาการนำเมมเบรนไปประยุกต์ใช้งานด้วยจึงจะทำให้เมมเบรนมีคุณค่าเพิ่มมากขึ้น ข้อดีของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแยกด้วยวิธีดั้งเดิม ได้แก่ ต้นทุนมีราคาลดลง ใช้พลังงานน้อยกว่า และมีค่าติดตั้งถูกกว่าเนื่องจากการออกแบบโมดูลให้สามารถประกอบกันได้และมีการใช้งานง่าย [1] เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเป็นเมมเบรนอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเพิ่มขึ้น ข้อดีของเมมเบรนชนิดนี้ ได้แก่

1. มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่เมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดแผ่นและเมมเบรนชนิดท่อหมุนจึงให้ผลผลิตจากการกรองมากกว่าเมมเบรนชนิดอื่น
2. มีความแข็งแรงซึ่งสามารถทำความสะอาดเมมเบรนด้วยวิธีการล้างกลับ (back-washed) ได้
3. สามารถปรับใช้กับงานได้หลากหลายรูปแบบ [2]

ปัจจุบันมีการใช้เมมเบรนกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นภายในประเทศ ประเทศไทย ยังไม่สามารถผลิตเมมเบรนได้เอง จึงต้องการนำเข้าจากต่างประเทศทำให้เมมเบรนมีราคาแพง ดังนั้นหากเราสามารถผลิตเมมเบรนที่มีคุณภาพขึ้นได้เองภายในประเทศจะสามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศและเป็นการพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืน ตัวอย่างกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่สามารถพัฒนาเข้าสู่อุตสาหกรรมภายในประเทศได้ เช่น การกรองเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำ



ผลไม้ การทำน้ำผลไม้ให้ใสมากขึ้น การแยกหรือการเพิ่มความเข้มข้นโปรตีน การกรองน้ำทะเล หรือน้ำกร่อยเพื่อผลิตน้ำจืด การบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม

พอลิซัลโฟเนมเมมเบรน และพอลิอีเทอร์ซัลโฟเนมเมมเบรน เป็นเมมเบรนสังเคราะห์ ที่นิยมใช้ในปัจจุบันนี้ พอลิเมอร์เมมเบรนทั้งสองชนิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดไม่ชอบน้ำ มีความคงทน ต่อสารเคมี ทนต่อคลอรีน ทนต่อความดัน ทนต่อความเป็นกรด-ด่างในช่วงกว้าง (pH 2-13) และทน ต่อความร้อนได้ดี พอลิซัลโฟเนมเมมเบรนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟเนมเมมเบรนสามารถนำมาผลิตเป็น เมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการอัลตราฟิเตรชันและกระบวนการไมโครฟิเตรชันได้ง่าย มีขนาดรู พูรูตั้งแต่  $10 \text{ \AA}$  ถึง  $0.2 \text{ \mu m}$  [3]

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายภายในประเทศไทย ได้เจริญเติบโตด้านปริมาณ อย่างต่อเนื่องทั้งในด้านการผลิตอ้อยและการผลิตน้ำตาลทรายรวมทั้งการขยายตัวของการบริโภคทั้ง ภายในประเทศตลอดจนการส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศทำรายได้ปีละนับหมื่นล้านบาท จน ได้ชื่อว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกน้ำตาลทรายมากเป็นอันดับ 2 หรือ 3 ของโลก [4]

น้ำตาลเป็นสินค้าที่ได้จากอุตสาหกรรมเกษตรจึงมีความเกี่ยวข้องกับสินค้าเกษตร และอุตสาหกรรม กล่าวคือ น้ำตาลผลิตโดยอาศัยวัตถุดิบที่เป็นสินค้าเกษตร คือ อ้อย แต่น้ำตาลให้ มูลค่าเพิ่มของผลผลิตมากกว่าอ้อย ขณะเดียวกันน้ำตาลยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสินค้า อุตสาหกรรมอื่นๆ อุตสาหกรรมผลิตอาหาร นมข้นหวาน และเกอรักรรม เป็นต้น อุตสาหกรรม น้ำตาลนอกจากผลิตน้ำตาลออกมาแล้วยังมีผลพลอยได้ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก กล่าวคือ กากน้ำตาลสามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมชีวเคมี เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบใน อุตสาหกรรมผงชูรส ใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตอาหารสัตว์ ใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์ เป็น ต้น สำหรับกากอ้อยนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษและไม้อัดได้ แต่ในประเทศไทยนิยม ใช้กากอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตน้ำตาล [5]

ฤดูกาลผลิตปี พ.ศ. 2544/45 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อย 6.04 ล้านไร่ ผลผลิตอ้อย รวม 59.5 ล้านตัน โดยมีผลผลิตเฉลี่ย 9.58 ตันต่อไร่ ได้ผลผลิตน้ำตาล 6.15 ล้านตัน โดยมีรายได้ จากการขายน้ำตาลภายในประเทศ 20,301 ล้านบาท และรายได้จากการส่งออกได้ 29,837 ล้านบาท รวมรายได้จากการขายน้ำตาลของปี 2544/45 ทั้งหมด 50,139 ล้านบาท เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตอ้อย ในปี 2543/44 จำนวน 48.6 ล้านตัน ผลผลิตเพิ่มขึ้น 10.9 ล้านตัน หรือมีอัตราการเพิ่ม 22.4% [6]

การผลิตน้ำตาลด้วยวิธีการเดิมปูนขาวและการฟอกสีเป็นวิธีการดั้งเดิมที่นิยมใช้ ในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทราย วิธีการนี้มีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น ไม่มีประสิทธิภาพ ในการทำน้ำอ้อยให้ใสซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำตาลทราย มีกากน้ำตาลเพิ่มมากขึ้นและขั้นตอน การระเหยน้ำอ้อยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้สูญเสียพลังงานมาก ดังนั้นจึงต้องการกระบวนการที่ ประหยัดพลังงานและเป็นการเพิ่มทางเลือกในการผลิตน้ำตาลทราย [7]

การทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการเมมเบรนมีความนิยมเพิ่มขึ้นในหลายอุตสาหกรรม เช่น การบำบัดน้ำทิ้ง การบำบัดน้ำผิวดิน และในอุตสาหกรรมอาหารก็มีความนิยมเพิ่มขึ้นเช่นกัน เช่นการกรองโปรตีนในหางนํ้านม การทำไวน์ให้ใส การทำน้ำผลไม้ให้ใส งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเมมเบรนเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลทรายเพื่อให้ น้ำอ้อยที่ผ่านกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนมีความใสเพิ่มขึ้นและสามารถกักกันสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำอ้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8, 9] การประยุกต์ใช้งานนี้เป็นประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลเพราะเป็นกระบวนการทางกาย ภาพในขณะที่เทคโนโลยีที่ใช้ผลิตน้ำตาลให้ขาวในปัจจุบันเป็นกระบวนการทางเคมีนอกจากจะเป็นการลดการใช้สารเคมีในการทำให้ น้ำอ้อยมีความใสเพิ่มขึ้นแล้วยังช่วยให้ น้ำตาลทรายที่ได้มีการปนเปื้อนสารเคมีลดลง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางที่เตรียมจากพอลิซัลโฟนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟน
2. ศึกษาผลการแปรชนิดและปริมาณของสารก่อรูพรุนที่มีต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง
3. ศึกษาต้นทุนวิชา ลักษณะเฉพาะและสมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมเพื่อใช้เตรียมพอลิเมอร์เมมเบรนชนิดเส้นใยกลางที่เตรียมจากพอลิซัลโฟน (polysulfone, PSF) และพอลิอีเทอร์ซัลโฟน (polyethylsulfone, PES)
  - 1.1 ศึกษาผลการแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ได้แก่ 19 % และ 21 % โดยน้ำหนัก
  - 1.2 ศึกษาการแปรค่าชนิดสารเติมแต่ง ได้แก่
    - 1, 2 - โพรเพนไดออล (1,2 – propandiol, 1,2-PD)
    - ไตรอะซีติน (triacetin)
    - พอลิไวนิลไพโรลิโดน (poly(vinyl pyrrolidone), PVP)
    - พอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol), PEG)
  - 1.3 ศึกษาการแปรค่าปริมาณสารเติมแต่ง ได้แก่ 2 % - 10 % โดยน้ำหนัก

## 2. ตรวจสอบลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรน

2.1 ทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์

2.2 ทดสอบหาขนาดรูพรุนด้วยวิธีการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลและการใช้

ปรอท (mercury intrusion)

2.3 ทดสอบการกรองน้ำอ้อย

2.4 ทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง (tensile properties)

2.5 ตรวจสอบสัณฐานวิทยา

## 3. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เตรียมจากพอลิซัลโฟนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟน

2. ได้แนวทางในการพัฒนาพอลิเมอร์เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล

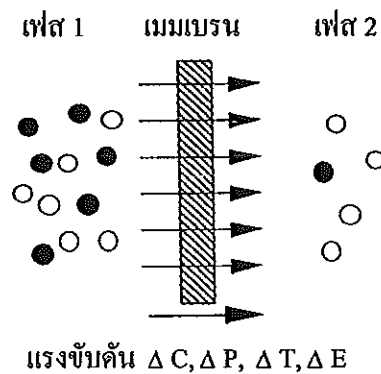
3. ลดการใช้สารเคมีในกระบวนการทำน้ำอ้อยให้ใสและมีทางเลือกในการทำน้ำอ้อยให้ใสเพิ่มขึ้น

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการเมมเบรน [10]

กระบวนการเมมเบรนเป็นวิธีการแยกสารวิธีหนึ่งที่มีปัจจุบันมีการนำกระบวนการเมมเบรนมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมมเบรนเป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการเมมเบรนเนื่องจากใช้เป็นตัวเลือกผ่านสาร (permselectivity) หรือตัวกั้นระหว่าง 2 เฟส แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการใช้เมมเบรนกั้นระหว่าง 2 เฟส [10]

เฟส 1 เป็นสารป้อน (feed or upstream side) เฟส 2 เป็นเพอมีเอท (permeate or down stream side) เมมเบรนที่อยู่กั้นกลางระหว่างเฟสทั้ง 2 ทำหน้าที่ในการแยกสาร ประสิทธิภาพของเมมเบรนรายงานในค่าฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนและการกักกั้นแสดงดังสมการ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

การแพร่ผ่านเมมเบรนจะอาศัยแรงขับเคลื่อน (driving force) ทางด้านสารป้อน ตัวอย่างแรงขับเคลื่อนที่ใช้ในกระบวนการเมมเบรน เช่น ผลต่างของความดัน ผลต่างของความเข้มข้น ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าและผลต่างของอุณหภูมิ นอกจากนี้แรงขับเคลื่อนที่เป็นปัจจัยหนึ่งในกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนแล้ว โครงสร้างของเมมเบรนและวัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรนก็มีผลต่อการเลือกใช้เมมเบรนด้วยเช่นกัน

$$\text{flux} = \frac{Q}{A \cdot t} \quad (2.1)$$

เมื่อ	flux	คือ ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น $\text{lm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$
	Q	คือ ปริมาตรของน้ำบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น l
	A	คือ พื้นที่ของเมมเบรน มีหน่วยเป็น $\text{m}^2$
	t	คือ เวลาที่เก็บน้ำบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น h

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.2)$$

เมื่อ	R	ค่ากักกัน
	$C_p$	ความเข้มข้นตัวถูกละลายในเพอมีเอท
	$C_f$	ความเข้มข้นตัวถูกละลายในสารป้อน

เมมเบรนที่สามารถกักกันอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 nm ได้ เมมเบรนชนิดนี้มีโครงสร้างแบบเปิด เมมเบรนมีความต้านทานการแพร่ต่ำ ค่าฟลักซ์มากและใช้แรงขับเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เรียกกระบวนการนี้ว่า ไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration)

เมมเบรนที่สามารถกักกันอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่หรือมากกว่า  $10^4$  Da เมมเบรนชนิดนี้มีโครงสร้างแบบแน่น (dense) เมมเบรนมีความต้านทานการแพร่เพิ่มขึ้นและใช้แรงขับเคลื่อนมากกว่ากระบวนการ ไมโครฟิลเตรชัน เรียกกระบวนการนี้ว่าอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration)

เมมเบรนที่สามารถกักกันอนุภาคขนาดเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 Da เมมเบรนชนิดนี้มีโครงสร้างแบบแน่นมาก (dense) เมมเบรนมีความต้านทานการแพร่และใช้แรงขับเคลื่อนมาก เรียกกระบวนการนี้ว่าออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis)

สามารถสรุปได้ว่าในกระบวนการ ไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และกระบวนการออสโมซิสผันกลับนั้น เมมเบรนจะมีความต้านทานการแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้นจึงต้องใช้แรงขับเคลื่อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์และขนาดโมเลกุลที่เมมเบรนสามารถกักกันได้มีแนวโน้มลดลง ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์และแรงขับเคลื่อนที่ใช้ในกระบวนการต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1

นอกจากกระบวนการเมมเบรนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นยังมีกระบวนการเมมเบรนอื่นๆ เช่น กระบวนการไดอะไลซิส (dialysis) กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (electrodialysis) กระบวนการเพอแวปอเรชัน (pervaporation) และกระบวนการแยกแก๊ส (gas separation)

เมมเบรนที่ผลิตขึ้นโดยทั่วไปมีหลากหลายรูปแบบ ดังนั้นเพื่อทำการเข้าใจข้อมูลพื้นฐานบางอย่างของเมมเบรน สามารถทำการแบ่งชนิดของเมมเบรนได้ตามหัวข้อที่สนใจแตกต่างกันออกไป เช่น การแบ่งตามชนิดของแรงขับเคลื่อน ได้แก่ เมมเบรนที่ใช้ผลต่างของความดัน ผลต่างของความเข้มข้น หรือผลต่างของอุณหภูมิ การแบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรน ได้แก่ เมมเบรนชีวภาพ (biological membranes) เมมเบรนสังเคราะห์ (synthetic membranes) เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดมีโครงสร้างและหน้าที่การทำงานแตกต่างกันอย่างชัดเจน หรือแบ่งตามโครงสร้างของเมมเบรน ได้แก่ เมมเบรนสมมาตร (symmetric membranes) มีความหนาประมาณ 10-200  $\mu\text{m}$  และเมมเบรนไม่สมมาตร (asymmetric membranes) เมมเบรนชนิดนี้ประกอบด้วยชั้นเมมเบรนแบบแน่นที่ผิวหน้า (dense top layer) หนาประมาณ 0.1- 0.5  $\mu\text{m}$  และชั้นรองรับที่มีรูพรุน (porous sublayer) หนาประมาณ 50-150  $\mu\text{m}$  จึงทำให้เมมเบรนมีประสิทธิภาพในการกักกันและค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มาก เมมเบรนอีกชนิดหนึ่งในกลุ่มนี้คือ เมมเบรนเชิงประกอบ (composit membranes) โครงสร้างของเมมเบรนประกอบด้วย เมมเบรนไม่สมมาตรอยู่บนชั้นรองรับที่มีรูพรุน ซึ่งเมมเบรนทั้ง 2 ชั้นผลิตจากพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน

ตารางที่ 2.1 ค่าฟลักซ์และความดันในกระบวนการเมมเบรนต่างๆ [10]

กระบวนการเมมเบรน	ช่วงความดัน (bar)	ช่วงค่าฟลักซ์ ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ )
ไมโครฟิลเตรชัน	0.1-2.0	>50
อัลตราฟิลเตรชัน	1.0-5.0	10-50
นาโนฟิลเตรชัน	5.0-20	1.4-12
รีเวอร์สออสโมซิส	10-100	0.05-1.4

### 2.1.1 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน [10]

วัสดุที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนมีมากมายหลายชนิด ในหัวข้อนี้จะแบ่งวัสดุที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ และเมมเบรนชีวภาพ โดยส่วนใหญ่เมมเบรนจะผลิตจากวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์หรือสารที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งจะทำให้เมมเบรนมีสมบัติที่เฉพาะเจาะจงมากกว่า

### 2.1.1.1 พอลิเมอร์เมมเบรน

เนื่องจากพอลิเมอร์มีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่แตกต่างกันจึงทำให้มีพอลิเมอร์เพียงบางชนิดเท่านั้นที่สามารถนำไปผลิตเมมเบรนได้ การเลือกใช้พอลิเมอร์ในการผลิตเมมเบรนจะพิจารณาทางด้านกระบวนการผลิต การอุดตัน ความต้านทานสารเคมี ความร้อนและราคา เมมเบรนพอลิเมอร์นิยมใช้ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน แต่ปัญหาหลักที่พบในกระบวนการนี้คือการอุดตันในเมมเบรน ดังนั้นหลักในการเลือกใช้วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรนต้องคำนึงถึงการป้องกันการอุดตันและสามารถทำความสะอาดเมมเบรนได้ภายหลังเกิดการอุดตัน นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในกระบวนการแยกก๊าซ และกระบวนการเพอเวป-พอเรชัน ตัวอย่างชนิดของพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาผลิตเมมเบรนแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างชนิดพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรนในกระบวนการต่างๆ [10]

ไมโครฟิลเตรชัน	อัลตราฟิลเตรชัน
polycarbonate	polysulfone/polyethersulfone
poly(vinylidene-fluoride)	Polyacrylontrile
polytetrafluoroethylene	cellulose-ester
polypropylene	polyimide/ poly(ether-imide)
polyamide	polyamide (aliphatic)
cellulose-ester	poly(vinylidene-fluoride)
polysulfone/polyethersulfone	polyetheretherketone
poly(ether-imide)	
polyetheretherketone	

### 2.1.1.2 อนินทรีย์เมมเบรน

วัสดุอนินทรีย์มีสมบัติทนความร้อนและสารเคมีได้ดีกว่าวัสดุพอลิเมอร์ ปัจจุบันเมมเบรนชนิดนี้เป็นที่สนใจเพิ่มขึ้น แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของวัสดุที่จะนำมาผลิตเมมเบรน เมมเบรนชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน และกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพราะสามารถผลิตเป็นเมมเบรนที่มีรูพรุนได้เท่านั้น วัสดุอนินทรีย์ที่สามารถนำมาผลิตเมมเบรน ได้แก่ วัสดุเซรามิก แก้ว โลหะ และซีโอไลต์

### 2.1.1.3 เมมเบรนชีวภาพ

เป็นเมมเบรนที่มีหน้าที่เฉพาะเจาะจง โครงสร้างเมมเบรนประกอบด้วยชั้นไขมัน 2 ชั้น (lipid bilayer structure) ทำหน้าที่ในการส่งผ่าน โมเลกุล เช่น น้ำตาลและกรดอะมิโน

## 2.1.2 การเตรียมเมมเบรนสังเคราะห์ [10]

### 2.1.2.1 การเปลี่ยนเฟส (phase inversion)

เป็นกระบวนการที่ทำให้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีสถานะของเหลวเปลี่ยนเป็นสถานะของแข็ง กระบวนการแข็งตัว (solidification) เริ่มจากของเหลว 1 เฟส แยกออกเป็นของเหลว 2 เฟส (liquid-liquid demixing) เฟสที่มีความเข้มข้นของพอลิเมอร์มากกว่าจะแข็งตัวกลายเป็นเฟสเมทริกซ์ เทคนิคที่ใช้เตรียมเมมเบรนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนเฟส ได้แก่

1. การแยกเฟส โดยการระเหยของตัวทำละลาย (precipitation by solvent evaporation)

เป็นเทคนิคง่ายที่สุดในการเตรียมเมมเบรน นำสารละลายพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปบนชั้นรองรับแล้ว (support) ระเหยตัวทำละลายในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยเพื่อป้องกัน ไอน้ำที่มีในอากาศเมมเบรนที่ได้มีโครงสร้างแบบแน่น

2. การแยกเฟสด้วยไอของตัวไม่ทำละลาย (precipitation from the vapour phase)

นำเมมเบรนที่ขึ้นรูปแล้วเข้าสู่บรรยากาศที่ประกอบด้วยไอของสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายและไอของสารที่เป็นตัวทำละลาย การแข็งตัวของเมมเบรนเกิดขึ้นจากการแพร่ไอของสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายเข้าไปยังเมมเบรนทำให้บริเวณที่ไอของสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายแพร่เข้าไปกลายเป็นช่องว่างในโครงสร้างเมมเบรน

3. การแยกเฟสโดยการควบคุมการระเหย (precipitation by controlled evaporation)

ผสมพอลิเมอร์ลงในของผสมระหว่างสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายและสารที่เป็นตัวทำละลาย สารที่เป็นตัวทำละลายจะระเหยได้ดีกว่า ดังนั้นในระหว่างขั้นตอนนี้ความสามารถในการละลายจะลดลงทำให้มีการแยกเฟสเกิดขึ้น

4. การแยกเฟสด้วยความร้อน (thermal precipitation)

เตรียมเมมเบรนโดยการลดอุณหภูมิของสารละลายพอลิเมอร์ ความสามารถในการละลายจะลดลงทำให้มีการแยกเฟสเกิดขึ้นจากนั้นจึงทำการระเหยตัวทำละลายออกไป

5. การแยกเฟสด้วยการจุ่ม (immersion precipitation)

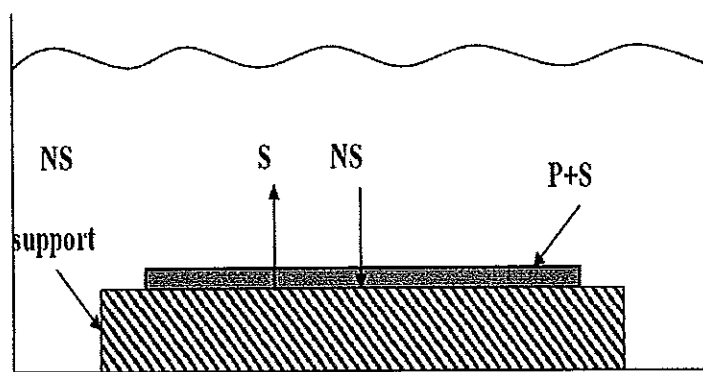
วิธีนี้เป็นวิธีที่ปัจจุบันนิยมใช้ในการผลิตเมมเบรนและเป็นวิธีการขึ้นรูปที่สามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์หลายชนิด แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ พอลิเมอร์จะต้องละลายเข้ากับตัวทำละลายหรือของผสมอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี นิยมใช้เทคนิคการขึ้นรูปนี้กับเมมเบรนที่มีลักษณะเรียบ (flat membrane) และเมมเบรนที่มีลักษณะเป็นท่อ (tubular membrane) หลักการของวิธีนี้คือ ขึ้นรูปสารละลายพอลิเมอร์ตามลักษณะที่ต้องการจากนั้นแช่ลงในอ่างแยกเฟส (coagulation bath) ซึ่งเป็นอ่างที่มีสาร ไม่ใช่ตัวทำละลายบรรจุอยู่ส่วนใหญ่ใช้น้ำเป็นสาร ไม่ใช่ตัวทำละลาย ระหว่าง



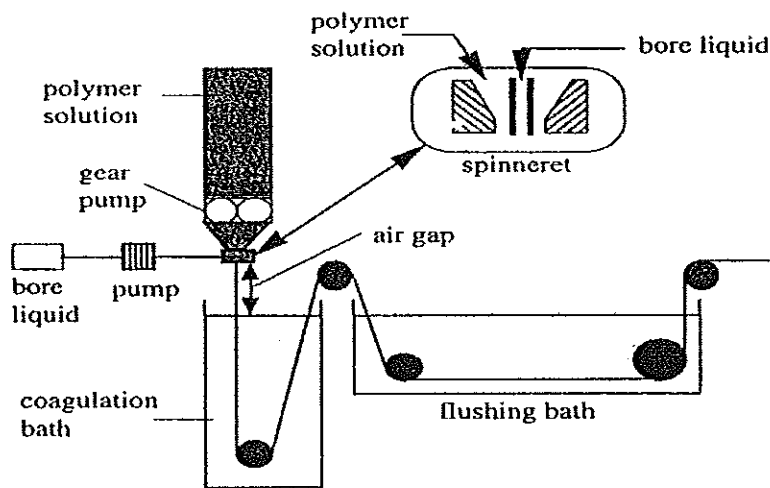
กระบวนการแยกเฟสจะเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายในอ่างแยกเฟสจะแพร่เข้าไปในเมมเบรนและสารที่เป็นตัวทำละลายในเมมเบรนจะแพร่ออกไปซึ่งอ่างแยกเฟสทำให้มีการแยกเฟสเกิดขึ้นภายในอ่างนี้ ตัวอย่างรูปแบบเมมเบรนที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้ได้แก่

(1) เมมเบรนที่มีลักษณะเรียบ เช่น เมมเบรนชนิดแผ่นและกรอบ (plate and frame membrane) และเมมเบรนชนิดท่อม้วน (spiral-wound membrane) การเตรียมเมมเบรนชนิดนี้จะขึ้นรูปโดยเทสารละลายพอลิเมอร์บนชั้นรองรับ เช่น โพลีเอสเตอร์ (polyester) หรือแผ่นกระดาษ ปาดสารละลายพอลิเมอร์ด้วยมีดที่ปรับความหนาได้ (doctor blade) จากนั้นนำไปจุ่มลงในอ่างแยกเฟสจะทำให้มีการแยกเฟสเกิดขึ้นหลักการของกระบวนการแยกเฟสได้กล่าวแล้วข้างต้น ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนได้แก่ ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ เวลาการระเหย ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิการขึ้นรูป องค์ประกอบของสารละลายพอลิเมอร์ การเตรียมเมมเบรนลักษณะนี้นิยมใช้ในระบับห้องปฏิบัติการเพราะเป็นวิธีการที่ง่ายไม่ซับซ้อน การเตรียมเมมเบรนชนิดแผ่นแสดงดังรูปที่ 2.2

(2) เมมเบรนที่มีลักษณะเป็นท่อ เช่น เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (hollow fiber membrane) และเมมเบรนชนิดท่อ (tubular membrane) การเตรียมเมมเบรนที่มีลักษณะเป็นท่อเตรียมได้ 2 วิธี ได้แก่ การขึ้นรูปโดยใช้สารละลายพอลิเมอร์ (solution spinning) และการขึ้นรูปโดยใช้พอลิเมอร์หลอม (melt spinning) การขึ้นรูปโดยใช้สารละลายพอลิเมอร์จะใช้พอลิเมอร์ประมาณ 20 % - 30 % ละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม สารละลายพอลิเมอร์และสารที่ทำให้เมมเบรนแข็งตัวภายใน (bore liquid) จะถูกดันผ่านหัวสปินเนอร์ลงในอ่างแยกเฟสซึ่งมีสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายบรรจุอยู่ กระบวนการแยกเฟสจะเกิดขึ้นในช่วงเวลานี้ กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้สารละลายพอลิเมอร์สามารถเตรียมได้ 2 วิธี ได้แก่ dry - wet process วิธีนี้จะมีระยะห่างระหว่างหัวสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสเพื่อระเหยตัวทำละลายที่อยู่ในเมมเบรนก่อนที่เมมเบรนจะลงในอ่างแยกเฟส อีกวิธีได้แก่ wet process วิธีนี้จะไม่มีการห่างระหว่างหัวสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟส เมมเบรนที่ผ่านออกจากหัวสปินเนอร์จะลงในอ่างแยกเฟสทันที การขึ้นรูปโดยใช้พอลิเมอร์หลอมทำได้โดยดันพอลิเมอร์หลอมที่ร้อนผ่านหัวสปินเนอร์เมมเบรนจะเกิดการแข็งตัวในอากาศก่อนที่จะจุ่มลงในอ่างแยกเฟส เมมเบรนที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีโครงสร้างแน่นและมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์น้อยนิยมนำไปใช้กับกระบวนการออสโมซิสผันกลับและการแยกก๊าซ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนได้แก่ อัตราการดันของสารละลายพอลิเมอร์ (extrusion rate) อัตราการไหลของสารที่ทำให้ตัวดันในท่อแข็งตัว (bore liquid rate) ระยะห่างระหว่างหัวสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟส (air gap) และขนาดของหัวสปินเนอร์ (dimension of the spinneret) การเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การเตรียมเมมเบรนชนิดแผ่น โดยวิธีแยกเฟสด้วยการจุ่ม  
P คือ พอลิเมอร์, S คือ ตัวทำละลาย และ NS คือ สารไม่ใช้ตัวทำละลาย [11]



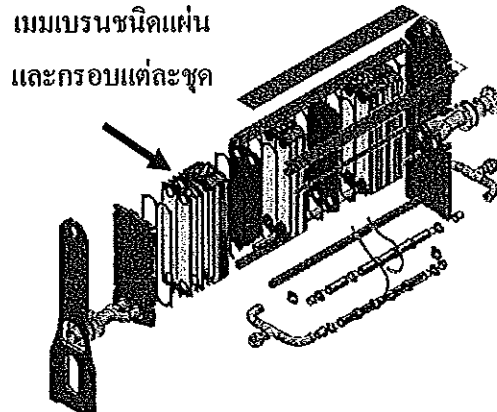
รูปที่ 2.3 การเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางด้วยกระบวนการ dry - wet spinning [10]

### 2.1.3 โมดูลเมมเบรน (module) [10]

การใช้งานเมมเบรนมีความต้องการพื้นที่ผิวเมมเบรนมากๆ ดังนั้นจึงมีการบรรจุเมมเบรนจำนวนมากเข้าด้วยกัน เรียกอุปกรณ์นี้ว่า โมดูล

#### 2.1.3.1 โมดูลชนิดแผ่นและกรอบ (plate and frame module)

เมมเบรน 2 แผ่นประกบกันเป็นคู่ โดยมีสารป้อนไหลผ่านระหว่างเมมเบรนทั้ง 2 แผ่น การประกอบโมดูลจะนำเอาชุดเมมเบรนมาประกอบเรียงกันเป็นชั้นเพื่อให้ได้พื้นที่เมมเบรนตามต้องการ โมดูลชนิดนี้มีพื้นที่ผิวเมมเบรนต่อหน่วยปริมาตร (packing density) ประมาณ 100-400  $\text{m}^2/\text{m}^3$  รูปแบบของเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบของเมมเบรนชนิดแผ่นและกรอบ [12]

#### 2.1.3.2 โมดูลชนิดทอมีวน (spiral wound module)

นำเมมเบรนชนิดแผ่นพันรอบแกนกลางทึบการไหลของสารป้อนขนานกับแกนกลางและทึบการไหลของเพอมีเอทจะแพร่ไปยังแกนกลางของโมดูลตามแนวรัศมี โมดูลชนิดนี้มีพื้นที่เมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรประมาณ  $300-1,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  รูปแบบของเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.5

#### 2.1.3.3 โมดูลชนิดท่อ (tubular module)

นำเมมเบรนใส่ในท่อ (housing) ซึ่งจะประกอบด้วยเมมเบรนหลายๆท่อ สารป้อนจะผ่านเข้าไปตรงกลางท่อ โมดูล และเพอมีเอทจะแพร่ผ่านเมมเบรนออกไปยังโมดูล นอกจากนี้ใช้กับพอลิเมอร์เมมเบรนแล้วยังนิยมใช้กับเซรามิกส์เมมเบรนด้วย โมดูลชนิดนี้มีพื้นที่เมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรน้อยกว่า  $3,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$

#### 2.1.3.4 โมดูลชนิดเส้นใยกลวง (hollow fiber module)

โมดูลชนิดนี้สามารถแบ่งระบบการกรองออกได้ 2 ระบบ

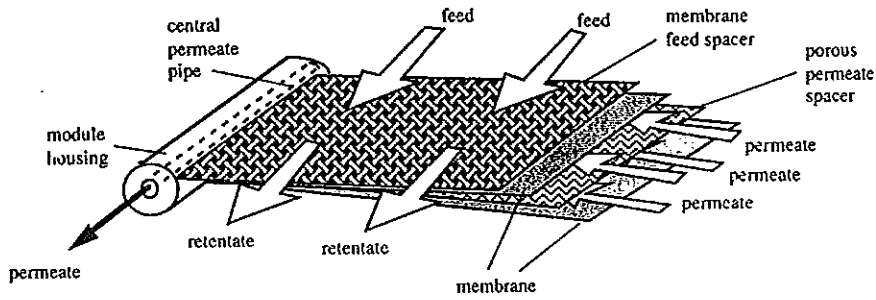
##### 1. ระบบภายในสู่ภายนอก (inside-out)

สารป้อนผ่านเข้าไปช่องกลวงตรงกลางของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงและเพอมีเอทจะแพร่ผ่านเมมเบรนออกมาภายนอก

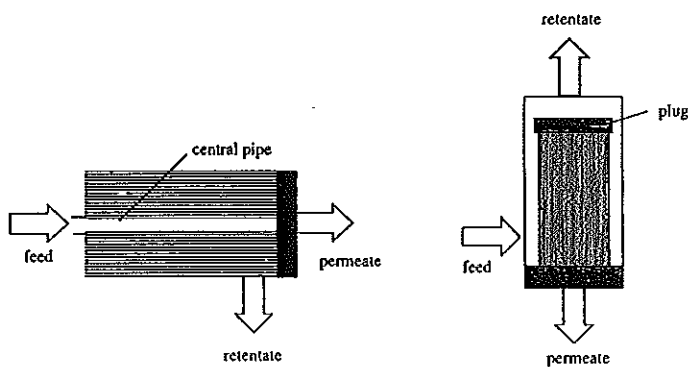
##### 2. ระบบภายนอกสู่ภายใน (outside-in)

สารป้อนผ่านเข้าไปภายนอกของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงและเพอมีเอทจะแพร่ผ่านเมมเบรนเข้าไปภายในรูกลวงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

โมดูลชนิดนี้มีพื้นที่เมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรมากที่สุดประมาณ  $30,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  รูปแบบของเมมเบรนแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 รูปแบบของเมมเบรนชนิดท่อม้วน [10]



รูปที่ 2.6 รูปแบบของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง [10]

หลักการเลือกใช้โมดูลแต่ละชนิดจะพิจารณาจากหลักเศรษฐศาสตร์และรูปแบบการนำไปใช้งานเป็นสำคัญ ลักษณะเฉพาะของโมดูลแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

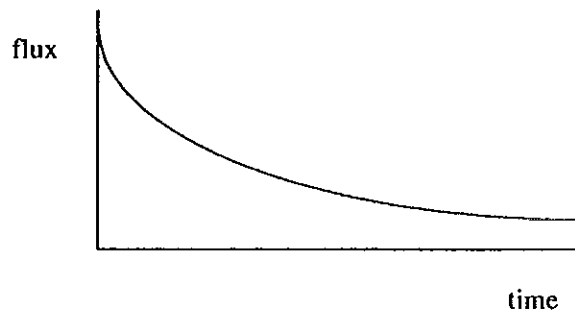
ตารางที่ 2.3 ลักษณะต่างๆของโมดูลเมมเบรนแบบต่างๆ [10]

ข้อมูล	ชนิดท่อ	ชนิดแผ่นและกรอบ	ชนิดท่อม้วน	ชนิดเส้นใยกลวง
พื้นที่/ปริมาตร	น้อย	----->	----->	มาก
ต้นทุน	มาก	----->	----->	น้อย
การอุดตัน	น้อย	----->	----->	มาก
การทำความสะดวก	ดี	----->	----->	ไม่ดี
การเปลี่ยนเมมเบรน	ได้/ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้

จากตารางพบว่าเมมเบรนชนิดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับสารที่เกิดการอุดตันง่ายและสามารถทำความสะอาดได้ง่าย ในขณะที่โมดูลชนิดเส้นใยกลวงมีพื้นที่ผิวเมมเบรนมาก แต่เกิดการอุดตันได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดสารป้อนก่อนผ่านเข้ากระบวนการเมมเบรน

#### 2.1.4 ปรากฏการณ์โพลาไรเซชันและการอุดตัน (polarization phenomena and membrane fouling) [10]

ระหว่างกระบวนการเมมเบรนจะทำให้ความดันและประสิทธิภาพของเมมเบรนเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ตัวอย่างเช่น พฤติกรรมค่าฟลักซ์เทียบกับเวลา พบว่าค่าฟลักซ์จะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดคอนเซนเตรชัน โพลาไรเซชัน (concentration polarization, CP) และการอุดตัน (fouling) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับเวลา [10]

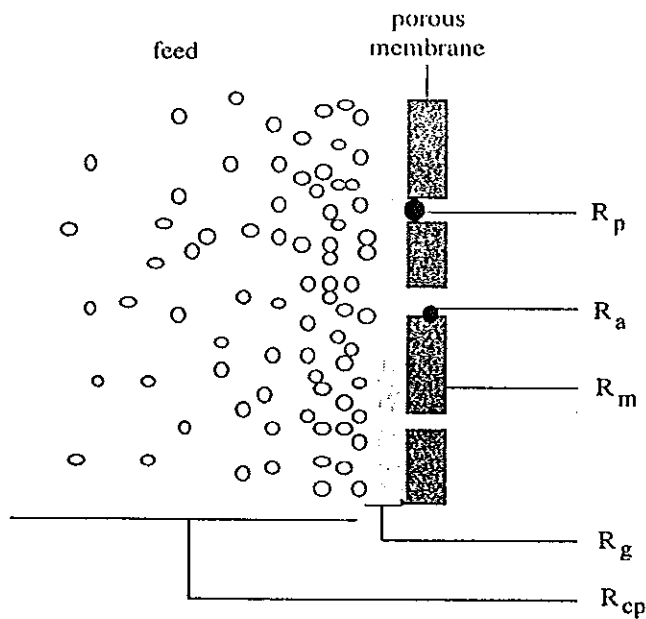
เมมเบรนในอุดมคติมีเฉพาะความต้านทานการแพร่ของเมมเบรนเองเท่านั้น (membrane resistance,  $R_m$ ) แต่ในความเป็นจริงจะมีความต้านทานการแพร่ผ่านเมมเบรนที่เกิดจากปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเมมเบรนทำให้บริเวณนี้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นและมีชั้นเจลเกิดขึ้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เมมเบรนมีความต้านทานการแพร่เพิ่มขึ้น เรียกความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์นี้ว่า concentration resistance ( $R_{cp}$ ) และ gel resistance ( $R_g$ ) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีความต้านทานที่เกิดจากอนุภาคตัวถูกละลายแทรกเข้าไปยังรูพรุนของเมมเบรนและความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันของอนุภาคของเมมเบรน เรียกความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์นี้ว่า pore-block resistance ( $R_p$ ) และ adsorption resistance ( $R_a$ ) ตามลำดับ ความต้านทานการแพร่ผ่านเมมเบรนที่เกิดขึ้นในเมมเบรนทั้งหมด ( $R_{tot}$ ) แสดงดังรูปที่ 2.8

ปัจจัยที่มีผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงได้แก่ การเกิด CP การอุดตันของอนุภาคที่ผิวเมมเบรน การเกิดชั้นเจลและการอุดตันภายในรูเมมเบรนซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้ทำให้ความต้านทานการแพร่

ผ่านเมมเบรนค้ำสารป้อนเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์การจากปรากฏการณ์นี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

2.3

$$\text{Flux} = \frac{\text{driving force}}{(\text{viscosity})(\text{total resistance})} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.8 ความต้านทานต่อการไหลที่เกิดขึ้นในเมมเบรน [10]

#### 2.1.4.1 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

การแยกด้วยกระบวนการเมมเบรนเกิดขึ้นเมื่อมีแรงขับเคลื่อนไปกระทำกับสารป้อน เมมเบรนจะกักกันตัวถูกละลายบางส่วนไว้และตัวถูกละลายบางส่วนสามารถแพร่ผ่านไปได้ทำให้บริเวณผิวหน้าเมมเบรนมีการสะสมของอนุภาคดังนั้นบริเวณนี้จะมีค่าความเข้มข้นค่อยๆเพิ่มขึ้นและแพร่กลับไปยังสารป้อน ผลจากการเกิด CP สามารถสรุปได้ ดังนี้

##### 1. ความสามารถในการกักกันลดลง

เนื่องจากความเข้มข้นของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเมมเบรนมีมากและสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนไปได้ ความสามารถในการกักกันที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าความสามารถในการกักกันที่แท้จริงของเมมเบรน เช่น การกรองเกลือซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กทำให้อนุภาคเกลืออุดตันภายในเมมเบรน

## 2. ความสามารถในการกักกันเพิ่มขึ้น

เช่น ในกรณีการกรองสารละลายที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ผสมอยู่ โมเลกุลขนาดใหญ่จะทำให้เกิด CP ผิวหน้าเมมเบรนซึ่งปรากฏการณ์นี้จะมีผลต่อความสามารถในการกักกันสาร โดยช่วยให้เมมเบรนสามารถกักกันสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้ดีขึ้น

## 3. ค่าฟลักซ์ลดลง

เนื่องจากการอุดตันที่เกิดขึ้นในเมมเบรนเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง

### 2.1.4.2 การอุดตันเมมเบรน (membrane fouling)

การอุดตันในเมมเบรนส่วนมากพบในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเนื่องจากสารป้อนที่ใช้ใน 2 กระบวนการนี้มีอนุภาคขนาดใหญ่ผสมอยู่จึงทำให้เมมเบรนมีแนวโน้มเกิดการอุดตันได้ง่ายกว่าในกระบวนการออสโมซิสผันกลับที่สารป้อนมีอนุภาคขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดการอุดตันในเมมเบรนได้แก่ ความเข้มข้นของสารป้อน คุณภูมิของสารป้อน ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารป้อน และอันตรกิริยาระหว่างเมมเบรนกับสารป้อนซึ่งมีผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง

### 2.1.5 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration process) [13]

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกสาร โดยการคัดขนาด เมมเบรนมีขนาดรูพรุน 10-1,000 Å สามารถกักกันอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุล 300-500,000 Da ตัวอย่างเช่น โมเลกุลทางชีวภาพ โมเลกุลพอลิเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์ ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการกักกันของเมมเบรนเช่น การคัดขนาด โมเลกุล อันตรกิริยาระหว่างเมมเบรนกับตัวทำละลาย รูปร่าง โมเลกุลของสารป้อน สภาวะการทดสอบ กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันจะใช้ความดันระหว่าง 2-10 bar

ลักษณะเฉพาะของเมมเบรนมีความสำคัญต่อการเลือกใช้เมมเบรนให้มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ลักษณะเฉพาะของเมมเบรนกล่าวโดยสรุป ได้แก่ ความพรุนตัว (porosity) สัณฐานวิทยา (morphology) สมบัติของผิวเมมเบรน (surface property) ความแข็งแรงทางกล (mechanical strength) และความต้านทานสารเคมี (chemical resistance)

#### 2.1.5.1 การประยุกต์ใช้งานของเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรนมีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ ตัวอย่างเช่น

##### 1. การเคลือบสีด้วยไฟฟ้า (electrocoat paint)

การเคลือบสีรถยนต์ด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วปัญหาที่พบในอุตสาหกรรมนี้ที่สำคัญ ได้แก่ สีเคลือบในถังเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากสารไอออนิก

ที่มาจากขั้นตอนการล้างชิ้นส่วนรถยนต์ก่อนนำมาเคลือบสีและน้ำจากขั้นตอนการล้างสี ปัญหาที่สามารถแก้ไขได้ด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน สารละลายสีเคลือบที่นำเข้าระบบเมมเบรนมีปริมาณของแข็ง 15 % - 20 % เพอมิเอทที่ผ่านเมมเบรนออกมามีเพียงสาร ไอออนิกเท่านั้นจะไม่มีอนุภาคสีเคลือบ เพอมิเอทบางส่วนจะปล่อยทิ้งไปบางส่วนจะนำกลับไปใช้ในขั้นตอนการล้างสี ส่วนสีเคลือบที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะนำกลับไปยังถังเคลือบเพื่อใช้ในขั้นตอนการเคลือบสีต่อไป

### 2. อุตสาหกรรมเกี่ยวกับนม (dairy application)

หางนม (cheese whey) ที่ได้จากการผลิตชีสมีปริมาณ 90 % ของปริมาณนมทั้งหมด หางนมมีปริมาณ โปรตีน 10 % - 35 % จึงมีการนำกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมาใช้เพิ่มความเข้มข้นโปรตีนในเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปเพิ่มความเข้มข้นโปรตีนด้วยกระบวนการไดอะฟิลเตรชันซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นโปรตีนได้ถึง 80 %

### 3. การทำน้ำผลไม้ให้ใส (fruit juice clarification)

การทำน้ำผลไม้ให้ใสด้วยวิธีการดั้งเดิมมีหลายวิธี เช่น การแยกเหวี่ยง (centrifugation) การใช้เอนไซม์เพกติน (treatment with pectinases) และการกรองสุญญากาศ (rotary vacuum filtration) เมื่อเปรียบเทียบกับทำให้ใสด้วยกระบวนการเมมเบรนพบว่ากระบวนการเมมเบรนสามารถดำเนินการได้ง่ายกว่า แยกสารได้ดีกว่าและให้ผลผลิตที่มากกว่า ตัวอย่างน้ำผลไม้ที่สามารถนำมาทำให้ใสด้วยกระบวนการเมมเบรน ได้แก่ น้ำแอปเปิ้ล น้ำองุ่นและน้ำมะเขือเทศ

### 4. การกรองสารอิมัลชันระหว่างน้ำ - น้ำมัน (oil - water emulsion)

งานที่เกี่ยวกับเครื่องจักรมีการใช้สารอิมัลชันระหว่าง น้ำ - น้ำมัน เป็นจำนวนมาก เพื่อใช้เป็นสารหล่อลื่นและสารหล่อเย็น การใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพื่อทำให้น้ำมันมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นและน้ำมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ในระบบได้ใหม่ซึ่งเป็นการประหยัดน้ำมันและน้ำที่จะต้องทิ้งไป

## 2.1.6 ลักษณะเฉพาะของเมมเบรน (characterization of membrane) [10]

โครงสร้างเมมเบรนที่แตกต่างกันทำให้เมมเบรนมีสมบัติการส่งผ่าน (transport phenomena) แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้พยายามที่จะทำนายโครงสร้างของเมมเบรนเพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้ การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเมมเบรนทำให้ทราบถึงสมบัติของโครงสร้างเมมเบรน เช่น ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของขนาดรูพรุน และความเป็นผลึก การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเมมเบรนมีหลายวิธี เช่น

### 2.1.6.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscopy)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)



เป็นเทคนิคที่นิยมใช้เนื่องจากสะดวกและง่ายในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเมมเบรน สามารถบอกขนาดรูพรุนได้ในช่วง  $0.005 - 0.01 \mu\text{m}$  หลักการของเทคนิคนี้คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะปล่อยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงไปชนกับชิ้นตัวอย่าง ตรวจจับอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมาด้วยตัวจับสัญญาณและส่งสัญญาณไปยังจอภาพ เทคนิคนี้สามารถทำให้ทราบถึงลักษณะผิวด้านบน ผิวด้านล่าง ภาคตัดขวาง และความสมมาตรของเมมเบรนได้อย่างชัดเจน ปัญหาที่สำคัญของเทคนิคนี้คือ การเตรียมชิ้นตัวอย่างให้แห้งไม่เช่นนั้น โครงสร้างตัวอย่างจะเกิดความเสียหายและจะทำให้ข้อมูลผิดพลาด ข้อดีของเทคนิคนี้คือ เป็นการตรวจสอบเฉพาะผิวหน้าที่สามารถมองเห็นเท่านั้น ไม่สามารถบ่งบอกถึงลักษณะรูพรุนภายในเนื้อเมมเบรนตามความหนาของเมมเบรนได้

#### 2.1.6.2 การตรวจสอบโดยใช้ปรอท (mercury intrusion test)

เทคนิคนี้อาศัยการเพิ่มความดันของปรอทเข้าไปในเมมเบรนแห้งโดยทำการตรวจสอบปริมาตรของปรอทที่ผ่านเข้าไปในรูพรุนเมมเบรนที่ความดันต่างๆมุมสัมผัสระหว่างปรอทกับพอลิเมอร์มีค่าประมาณ  $141.3^\circ$  จึงทำให้ปรอทไม่เปียกเมมเบรนและ  $\cos\theta$  มีค่าเป็นลบ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและขนาดของรูพรุนแสดงดังสมการที่ 2.4

ที่ความดันต่ำปรอทจะเข้าไปในรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นปรอทจะเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็ก แต่ข้อควรระวังคือ ที่ความดันสูง โครงสร้างรูพรุนอาจเกิดความเสียหายได้จากเทคนิคนี้ทำให้ทราบถึงขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุน สามารถทำการตรวจสอบตัวอย่างที่มีขนาดรูพรุนประมาณ  $5 \text{ nm} - 10 \mu\text{m}$  ได้

$$r_p = \frac{-2\gamma\cos\theta}{\Delta P} \quad (2.4)$$

เมื่อ	$r_p$	คือ รัศมีรูพรุน มีหน่วยเป็น nm
	$\gamma$	คือ แรงตึงผิวของปรอทมีค่าเท่ากับ $0.48 \text{ N/m}$
	$\theta$	คือ มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ $141.3^\circ$
	$\Delta P$	คือ ความดัน มีหน่วยเป็น bar

#### 2.1.6.3 การตรวจสอบการแพร่ผ่านเมมเบรน (permeability test)

ตรวจสอบค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ผ่านเมมเบรนที่ความดันคงที่โดยใช้สมการ Hagen-Poiseuille ซึ่งสมมติรูพรุนของเมมเบรนมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (capillary pores) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์กับขนาดรูพรุนในสมการที่ 2.5

$$J = \frac{\varepsilon r_p^2 \Delta P}{8\eta\tau\Delta x} \quad (2.5)$$

เมื่อ	J	คือ ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์
	$\Delta P$	คือ ความดัน มีหน่วยเป็น $N/m^2$
	$\Delta x$	คือ ความหนาเมมเบรน มีหน่วยเป็น m
	$r_p$	คือ รัศมีรูพรุน มีหน่วยเป็น m
	$\eta$	คือ ความหนืดของของเหลว มีหน่วยเป็น Pa.s
	$\varepsilon$	คือ ความพรุนตัวของผิวเมมเบรน
	$\tau$	คือ ตัวประกอบความคดเคี้ยวของรูพรุน (tortuosity factor)

วิธีนี้ใช้น้ำเป็นของเหลวที่ผ่านเมมเบรน ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าฟลักซ์ พบว่าค่าฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เมมเบรนบางชนิดรูพรุนเกิดจากช่องว่างระหว่างอนุภาคทรงกลมที่อยู่ชิดกัน (close - packed sphere) ในกรณีนี้ค่าฟลักซ์เป็นไปตามสมการของ Kozeny - Karman แสดงดังสมการที่ 2.6

$$J = \frac{\varepsilon^3}{K\eta s^2(1-\varepsilon)^2} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (2.6)$$

เมื่อ	K	คือ ค่าคงที่เมมเบรน (ค่าคงที่ Kozeny-Karman) ขึ้นอยู่กับรูปร่างและความคดเคี้ยวของรูพรุน
	$\varepsilon$	คือ ความพรุนตัว
	s	คือ พื้นที่ผิวของอนุภาคต่อหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็น $m^{-1}$

หลักการของการตรวจสอบการแพร่ผ่านเมมเบรนของทั้ง 2 สมการข้างต้นเป็นเพียงการพยายามโยงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์กับลักษณะของรูพรุนเท่านั้น ในความเป็นจริงลักษณะรูพรุนของเมมเบรนอาจไม่เป็นไปตามที่สมมติไว้ใน 2 สมการข้างต้นก็ได้

#### 2.1.6.4 การตรวจสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight cut off, MWCO)

ผู้ผลิตเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันส่วนใหญ่ใช้ค่าการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลในการบอกสมบัติของเมมเบรน ค่าการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลเป็นค่าที่บอกว่าเมมเบรนสามารถกักกันอนุภาคได้ 90 % เช่น เมมเบรนที่มีค่าการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล 40,000

หมายความว่า เมมเบรนสามารถกักกันอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุล 40,000 Da ได้มากกว่า 90% ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการกักกัน ได้แก่ รูปร่างตัวของอนุภาค ความยืดหยุ่นของตัวอนุภาค (flexibility) การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับเมมเบรน การเกิด CP ความดัน ความเร็วของสารป้อน ชนิดของอนุภาค จึงทำให้ยากแก่การเปรียบเทียบผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น เปรียบเทียบอนุภาค 3 ชนิด ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากันแต่มีรูปร่างแตกต่างกัน เช่น โปรตีนที่มีโครงสร้างแบบทรงกลม (globular protein) โพลีแซคคาไรด์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบกิ่ง (branched polysaccharide) เช่น เดกเทรน (dextran) และโมเลกุลที่มีโครงสร้างยืดหยุ่นแบบเส้น (linear flexible molecule) เช่น PEG ดังนั้นการแยกสารจึงมีลักษณะแตกต่างกัน นอกจากนั้นถ้าในสารละลายมีอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน เช่น  $\gamma$ -globulin น้ำหนักโมเลกุล 150,000 Da และ albumin น้ำหนักโมเลกุล 69,000 Da สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าจะทำให้เกิดชั้นเจลบนผิวหน้าเมมเบรนหรือเกิดการอุดตันภายในรูพรุนเมมเบรนซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการกักกันและการแพร่ผ่านของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สมการที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการกักกันแสดงดังสมการที่ 2.2

#### 2.1.6.5 การตรวจสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง (tensile properties) [14]

เป็นวิธีใช้ตรวจสอบความต้านแรงที่มากกระทำต่อวัสดุ หลักการของวิธีนี้คือให้แรงกระทำต่อวัสดุและตรวจสอบแรงที่กระทำต่อวัสดุจนกระทั่งเกิดการแตกหักและระยะยืดของวัสดุที่สามารถยืดได้ก่อนเกิดการแตกหัก การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะมีค่าความเค้น (stress) และความเครียด (strain) เข้ามาเกี่ยวข้อง

ความเค้น ( $\sigma$ ) คือ แรงที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งคำนวณได้จากค่าของแรง (F) หารด้วยพื้นที่ของวัสดุที่ตั้งฉากกับทิศของแรงนั้น (A) ดังนั้นความเค้นจึงมีหน่วยเป็น  $N/m^2$  หรือ พาสคาล (Pa) ในหน่วย SI ค่าความเค้นคำนวณได้ตามสมการที่ 2.7

ความเครียด ( $\epsilon$ ) คือ เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำจากภายนอกคำนวณได้ตามสมการที่ 2.8

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.8)$$

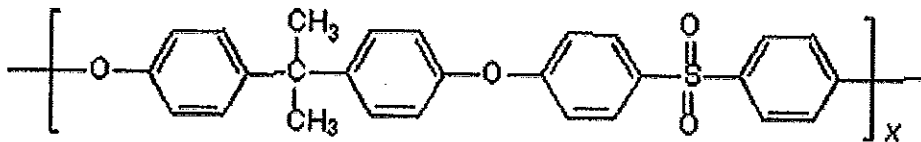
เมื่อ	F	คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด มีหน่วยเป็น N
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด มีหน่วยเป็น $mm^2$
	$\Delta L$	คือ ความยาวสุดท้าย (L) ความยาวเริ่มต้น ( $L_0$ )

- L คือ ระยะที่ขึ้นทดสอบสามารถยึดตัวได้จนขาด  
Lo คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ

## 2.2 พอลิซัลโฟนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟน [15, 16]

### 2.2.1 พอลิซัลโฟน

โครงสร้างทางเคมีของพอลิซัลโฟนหรือพอลิซัลโฟนแสดงดังรูป 2.9 หน่วยซ้ำของพอลิซัลโฟนประกอบด้วย หมู่อีเทอร์ 2 หมู่ หมู่ฟีนิล 2 หมู่และหมู่เมทิล 2 หมู่ เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน มีความแข็ง (stiff) ค่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ )  $190^{\circ}\text{C}$  มีความใส นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางกลที่ดี เช่น มีความแข็ง (rigidity) ทนทานต่อการคืบ (creep resistance) มีความเหนียว (toughness) แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ที่อุณหภูมิสูง สมบัติเด่นอื่นๆ เช่น ทนต่อการไฮโดรไลซิส สภาวะที่ทำการสเตอริไลซ์ ทนต่อสารเคมี เช่น น้ำมัน น้ำมันเครื่อง น้ำมันเบนซิน ทนต่อตัวทำละลาย แต่ไม่ทนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต การแปรรูปใช้การฉีดเข้าเบ้า ต้องอบเม็ดพอลิเมอร์ให้แห้งก่อนเพื่อไม่ให้เกิดไอน้ำให้ความร้อนประมาณ  $370^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้เม็ดพอลิเมอร์หลอม อุณหภูมิเข้าประมาณ  $95^{\circ}\text{C}$  และยังสามารถแปรรูปโดยการเอ็กซ์ทรูดเป็นแผ่นฟิล์มบางเพื่อนำไปแปรรูปต่อด้วยวิธีเทอร์โมฟอร์ม

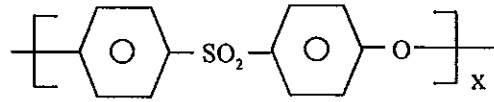


เมื่อ x คือ หน่วยซ้ำ มีค่าระหว่าง 50 – 80  
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของพอลิซัลโฟน [17]

### 2.2.2 พอลิอีเทอร์ซัลโฟน

โครงสร้างทางเคมีของพอลิอีเทอร์ซัลโฟนแสดงดังรูป 2.10 หน่วยซ้ำประกอบด้วยอีเทอร์ไดฟีนิลซัลโฟน พอลิอีเทอร์ซัลโฟนเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน มีความใส มีค่า  $T_g$  ประมาณ  $211^{\circ}\text{C}$  มีความแข็งแรง (strong) ความเหนียว ทนทานต่อการคืบ ทนต่อการไฮโดรไลซิส แต่ไม่ทนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต

ตัวอย่างการนำพอลิเอเทอร์ซัลโฟนไปใช้งาน เช่น อุปกรณ์เตาอบ เครื่องเป่าลม เครื่องทำความร้อน ส่วนประกอบของหลอดไฟวัตต์สูง วัสดุสะท้อนแสง เกล็ดไฟชนิดต่างๆ และ อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องการความใสและทนความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอเทอร์ซัลโฟน [17]

### 2.3 การผลิตน้ำตาลจากอ้อย [18]

อ้อยเป็นพืชที่มีความสำคัญที่ชาวไทยนำมาใช้ในพิธีต่างๆมาแต่โบราณ ไม่ว่าจะเป็นเทศกาลหรือพิธีมงคลต่างๆเช่น แต่งงาน โกนจุก ขึ้นบ้านใหม่ หรือเทศน์มหาชาติ สิ่งที่เราไม่ได้ก็คืออ้อย ในงานหมั้นหรือแต่งงานก็มีต้นอ้อยแท่งกับกระบวนขันหมากและนำมาผูกที่ประตูบ้านเจ้าสาว ในการไหว้พระจันทร์ของชาวจีนก็ใช้อ้อยประดับทำซุ้ม ในพิธีอื่นๆที่ต้องมีมณฑปพิธีต้องราชวัตรตรงก็จะต้องประดับประดับด้วยอ้อยรวมทั้งกล้วยและมะพร้าวต่างๆ ด้วย

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายแบ่งได้ 2 ขั้นตอนใหญ่ได้แก่ การผลิตน้ำตาลทรายดิบและการผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลรีไฟน์ กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ แบ่งได้ 5 ขั้นตอน [6] ดังนี้

#### 1. กระบวนการสกัดน้ำอ้อย (juice extraction)

ทำการสกัดน้ำอ้อยโดยผ่านอ้อยเข้าไปในลูกหีบ (4 - 5 ชุด) และกากอ้อยที่ผ่านการสกัดน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดสุดท้ายจะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ภายในเตาหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการผลิตและน้ำตาลทราย

#### 2. การทำความสะอาดหรือการทำน้ำอ้อยใส (juice purification)

น้ำอ้อยที่สกัดได้ทั้งหมดจะเข้าสู่ระบบการทำใสเนื่องจากน้ำอ้อยมีสิ่งสกปรกต่างๆ จึงต้องแยกเอาส่วนเหล่านี้ออกโดยผ่านวิธีทางกล เช่น ผ่านเครื่องกรองต่างๆ และวิธีทางเคมี เช่น โดยให้ความร้อนและผสมปูนขาว

#### 3. การต้ม (evaporation)

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำใสแล้วจะถูกนำเข้าสู่ชุดหม้อต้ม (multiple evaporation) เพื่อระเหยเอาน้ำออก (ประมาณ 70 %) โดยน้ำอ้อยเข้มข้นที่ออกมาเรียกว่าน้ำเชื่อม (syrup)

#### 4. การเคี้ยว (crystallization)

น้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มจะถูกนำเข้ามาห่อเคี้ยวสุญญากาศ (vacuum pan) เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว ที่จุดนี้จะมีผลึกน้ำตาลเกิดขึ้น โดยที่ผลึกน้ำตาลและกากน้ำตาลที่ได้จากการเคี้ยวนี้รวมเรียกว่า เมสสิควิท (messecuite)

#### 5. การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (centrifuging)

เมสสิควิทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่น (centrifugal) แยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลรีไฟน์ โดยการนำน้ำตาลทรายดิบไปละลายน้ำแล้วผ่านเข้า 5 ขั้นตอน [6] ดังนี้

#### 1. การปั่นละลาย (affinated centrifuging)

ขั้นตอนนี้จะทำการล้างคราบสีเหลืองที่อยู่ในน้ำตาลดิบให้มีสีอ่อนลงโดยการนำน้ำตาลทรายดิบมาละลายกับน้ำร้อน น้ำสีเหลืองที่ได้จากการปั่นละลาย (green molasses) น้ำตาลดิบเรียกว่า แมกม่า (magma) และแมกม่านี้จะถูกนำไปปั่นละลายเพื่อล้างคราบสีเหลืองหรือกากน้ำตาลออก

#### 2. การทำความสะอาดและการฟอกสี (clarification)

น้ำเชื่อมที่ได้จากหม้อปั่นละลาย (affinated syrup) จะถูกนำไปละลายอีกครั้งเพื่อละลายผลึกน้ำตาลบางส่วนที่ยังละลายไม่หมดจากการปั่นและผ่านตะแกรงกรองเข้าผสมกับปูนขาวเข้าฟอกสีโดยผ่านเข้าไปในหม้อฟอก (ปัจจุบันนิยมใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวฟอก) จากนั้นจะผ่านเข้าสู่การกรองโดยหม้อกรองแบบใช้แรงดัน (pressure filter) เพื่อแยกตะกอนออกและน้ำเชื่อมที่ได้จะผ่านไปฟอกเป็นครั้งสุดท้ายโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) จะได้น้ำเชื่อมรีไฟน์

#### 3. การเคี้ยว (crystallization)

น้ำเชื่อมรีไฟน์ที่ได้จะถูกนำเข้ามาห่อเคี้ยวระบบสุญญากาศ เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว

#### 4. การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (centrifuging)

เมสสิควิทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล ผลึกน้ำตาลที่ได้จะเป็นน้ำตาลรีไฟน์และน้ำตาลทรายขาว

#### 5. การอบ (drying)

ผลึกน้ำตาลรีไฟน์และน้ำตาลทรายขาวที่ได้จากการปั่นก็จะนำเข้ามาห่ออบเพื่อไล่ความชื้นออกแล้วบรรจุกระสอบเพื่อจำหน่าย

## 2.4 ส่วนประกอบของน้ำอ้อย [18]

โดยทั่วไปอ้อยที่นำมาหีบเพื่อทำน้ำตาลมีส่วนประกอบดังนี้	
น้ำ	65% - 76 %
ของแข็ง (solids)	24 % - 27 %
เยื่อ (fiber)	11 % - 16 %
ของแข็งที่ละลายได้ (soluble solids)	10 % - 16 %
ส่วนประกอบของน้ำอ้อย	% จากของแข็งละลายได้
น้ำตาล	75 - 79
ซูโครส (sucrose)	70 - 88
กลูโคส (glucose)	2 - 4
ฟรุกโทส (fructose)	2 - 4
เกลือ	3 - 7.5
เกลือของกรดอินทรีย์	1.5 - 4.5
เกลือของกรดอินทรีย์	1.0 - 3.0
กรดอินทรีย์อิสระ	0.5 - 2.5
กรดคาร์บอริก (carborylic acids)	0.1 - 0.5
กรดอะมิโน (amino acids)	0.5 - 2.0
สารอื่นที่ไม่ใช่น้ำตาล	3.8 - 6.5
โปรตีน	0.5 - 0.6
แป้ง	0.001 - 0.05
ยาง	0.3 - 0.6
ไขและขี้ผึ้ง	0.05 - 0.15
สารอื่นที่ไม่ทราบแน่ชัด	3.0 - 5.0

## 2.5 การตรวจสอบเอกสาร

### 2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิซัลโฟเนมเมมเบรน

Han และ Nan [19] ศึกษาอิทธิพลของการเติม PVP ที่มีต่อกระบวนการเปลี่ยนเฟสของเมมเบรนชนิดแผ่น สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิซัลโฟเนปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก

PVP น้ำหนักโมเลกุล 55,000 Da เป็นสารเติมแต่ง แปรปริมาณ PVP 0 % - 20 % โดยน้ำหนัก เอ็น-เมทิล-2-ไพโรลิโดน (n-methyl-2-pyrrolidone, NMP) เป็นตัวทำละลาย เตรียมเมมเบรนด้วยวิธีเทขึ้นรูป (cast film) บนแผ่นกระจกเรียบ ที่อุณหภูมิ 25°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65 % นำแผ่นเมมเบรนที่ได้มาทดสอบการแพร่ของน้ำผ่านเมมเบรนและการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาโดยใช้กล้อง SEM พบว่า PVP ที่มีปริมาณน้อยประมาณ 5 % โดยน้ำหนัก จะทำให้เมมเบรนมีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากที่สุดประมาณ  $35 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{c}^2\text{sec}$  และเมื่อเติม PVP ปริมาณ 20 % โดยน้ำหนัก ทำให้เมมเบรนมีการแข็งตัวช้าลง และทำให้ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มีค่าลดลงถึง  $10 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{c}^2\text{sec}$

Kim และ Lee [20] ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งที่มีต่อขนาดรูพรุนของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิซัลโฟน 15 % โดยน้ำหนัก สารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหลายชนิด ได้แก่ 1,4-ไดออกแซน (1,4-dioxane), ไดเอทิลีนไกลคอล (diethylene glycol, DEG) ไดเมทิลอีเทอร์ (diethylene glycol dimethyl ether, DGDE), อะซิโตน (acetone) และ  $\gamma$ -บิวทิลโรแลกโตน ( $\gamma$ -butyrolactone, GBL) ปริมาณ 28 % - 57 % โดยน้ำหนัก และ NMP เป็นตัวทำละลาย เตรียมเมมเบรนด้วยวิธีเทขึ้นรูปบนแผ่นพอลิเอสเตอร์ที่มีความหนา 200  $\mu\text{m}$  จากนั้นนำไปแช่ในน้ำ จากการศึกษาลักษณะและโครงสร้างของเมมเบรน พบว่าสารเติมแต่งทั้ง 4 ชนิดไม่มีผลต่อโครงสร้างภาคตัดขวางของเมมเบรนแต่จะมีผลต่อโครงสร้างผิวเมมเบรน โดยเมมเบรนที่เติม 1,4-ไดออกแซน, DGDE และอะซิโตน จะทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงเนื่องจากสารเติมแต่ง ทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวมีความสามารถเข้า (miscibility) กับน้ำได้น้อยกว่า NMP ในขณะที่เมมเบรนที่เติม GBL จะทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเพราะสารเติมแต่งนี้มีความสามารถเข้ากับน้ำได้ดีกว่า NMP

Aptel และคณะ [21] ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการเตรียมที่มีผลต่อสมบัติของเมมเบรนชนิดเส้นใยถลุง สภาวะการเตรียม ได้แก่ ความเร็วในการดันสารละลายเมมเบรนผ่านสปินเนอร์ อัตราเร็วของสารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวและระยะห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟส เตรียมพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยถลุง สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิซัลโฟนปริมาณ 18 % โดยน้ำหนัก PVP น้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da (K15) เป็นสารเติมแต่งปริมาณ 18% โดยน้ำหนัก และ เอ็น-ไดเมทิลอะเซตาไมด์ (n-dimethylacetamide, DMAC) เป็นตัวทำละลาย ปริมาณ 64 % โดยน้ำหนัก เตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยถลุงโดยกระบวนการ dry - wet spinning ใช้ น้ำเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวและเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังนอกท่อแข็งตัว (external coagulant) พบว่าเมมเบรนที่เตรียมขึ้นมีโครงสร้างแบบไม่สมมาตรและสภาวะการเตรียมมีผลต่อสมบัติของเมมเบรนชนิดเส้นใยถลุง ได้แก่ อัตราเร็วในการดันสารละลายเมมเบรนผ่านสปินเนอร์ ลดลงจาก 8 - 1.6 cm/s อัตราเร็วของน้ำที่ไหลภายในสปินเนอร์เพิ่มขึ้นจาก  $4 \times 10^{-2}$  -  $6 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{s}$  และระยะห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสลดลงจาก 50 - 25 cm มีผลทำให้ค่าสภาพให้ซึม



ผ่านได้ (hydraulic permeability) เพิ่มขึ้นจาก  $2 \times 10^{-8}$  -  $6 \times 10^{-8}$  cm/s.Pa แต่ค่าการกักกัน PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da ลดลงจาก 80 % - 40 %

Qin, Gu และ Chung [22] ศึกษาผลของกระบวนการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการกักกัน ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกล งานวิจัยนี้เตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่แตกต่างกัน 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการ wet spinning และ dry - wet spinning พอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมเมมเบรนได้แก่พอลิซัลโฟนและพอลิเอเทอร์ซัลโฟน ปริมาณ 13 % - 21 % โดยน้ำหนัก สารเติมแต่งได้แก่ PVP น้ำหนักโมเลกุล 40 kDa ไดเอทิลีนไกลคอล 1,2 - โพรเพนไดออลและน้ำ ปริมาณ 25 % - 42 % โดยน้ำหนัก ตัวทำละลายได้แก่ NMP, เอ็น-ไดเมทิลฟอร์มามิด (n-dimethylformamide, DMF) และ DMAC กระบวนการ wet spinning และ dry - wet spinning มีระยะห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสเท่ากับ 0 และ 1 cm ตามลำดับ สารที่ทำให้ผิวด้านในท่อแข็งตัว ได้แก่ NMP/น้ำ อัตราส่วน 86/14 DMAC/น้ำ อัตราส่วน 83/17 และน้ำ ใช้เป็นสารที่ทำให้ผิวด้านนอกท่อแข็งตัวขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % - 60 % พบว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ wet spinning จะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และความเครียด ณ จุดขาดน้อยกว่า แต่ประสิทธิภาพการกักกันสาร มอดูลัสสะสม (storage modulus) มอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) และความสมบัติความทนต่อแรงดึงยิ่งมากกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ dry - wet spinning เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เตรียมจากกระบวนการ dry - wet spinning มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากที่สุดเท่ากับ  $1,220 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$

Qin และคณะ [23] ศึกษาประสิทธิภาพของเมมเบรนและสัณฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เตรียมโดยกระบวนการ dry - wet spinning สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิซัลโฟน 15 % โดยน้ำหนัก PVP น้ำหนักโมเลกุล 360 kDa เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มสมบัติชอบน้ำให้แก่เมมเบรนปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก 1, 2 - โพรเพนไดออล เป็นสารเติมแต่งที่ไม่ใช่ตัวทำละลายปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก และใช้ DMF เป็นตัวทำละลายปริมาณ 77 % โดยน้ำหนัก ระยะห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสเท่ากับ 85 cm สารที่ทำให้ผิวด้านในท่อแข็งตัวประกอบด้วย DMF/น้ำ ในอัตราส่วน 60/40 ใช้เป็นสารที่ทำให้ผิวด้านนอกท่อแข็งตัวซึ่งมีอุณหภูมิ  $27^{\circ}\text{C}$  ขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 60 % รักษาสภาพเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 2000, 4000, 6000 mg/l เป็นเวลา 48 h ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 11.5 นำเมมเบรนมาทดสอบประสิทธิภาพ ได้แก่ ทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์และการกักกัน ตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้อง SEM พบว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ผ่านการรักษาสภาพจะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากขึ้นและสามารถกักกันอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลเล็กกว่า 67 kDa ได้น้อยกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่

ไม่ผ่านการรักษาสภาพและยังพบว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ผ่านการรักษาสภาพมีแนวโน้มเกิดการอุดตันเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมมเบรนที่ผ่านการรักษาสภาพจะทำให้การบวมตัวของ PVP ลดลงเป็นผลทำให้เมมเบรนมีสมบัติความชอบน้ำลดลง เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ผ่านการรักษาสภาพมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์  $760 \times 10^{-5} \text{ l.m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$

Qin และคณะ [2] ศึกษาระยะเวลาห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสที่มีต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน เตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยกระบวนการ dry - wet spinning สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยเซลลูโลสอะซิเตต (cellulose acetate, CA) ปริมาณ 19% โดยน้ำหนัก PVP น้ำหนัก โมเลกุล 360 kDa เป็นสารเติมแต่งช่วยเพิ่มสมบัติชอบน้ำให้แก่เมมเบรน ปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก ใช้น้ำเป็นสารเติมแต่งที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย 1.2 % โดยน้ำหนัก และใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย 74.8 % โดยน้ำหนัก ระยะห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสมีระยะเท่ากับ 55 และ 88 cm ใช้น้ำเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวและเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังนอกท่อแข็งตัวมีอุณหภูมิ 24 และ  $30^{\circ}\text{C}$  ขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่อุณหภูมิ  $24^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 60 % - 62 % รักษาสภาพเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่มีความเข้มข้น 200 mg/l เป็นเวลาต่างๆกันในระยะเวลา 0 - 48 h ค่าความเป็นกรด - ด่าง เท่ากับ 11.5-7 นาเมมเบรนมาทดสอบประสิทธิภาพ ได้แก่ ทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์และการกักกัน ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพโดยใช้กล้อง SEM พบว่าระยะเวลาห่างระหว่างสปินเนอร์เพิ่มขึ้นทำให้ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ลดลง การกักกันสารเพิ่มขึ้น ชั้นผิว (skin layer) มีความหนาเพิ่มขึ้น เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ผ่านการรักษาสภาพจะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น การกักกันลดลงและมีแนวโน้มเกิดการอุดตันเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ไม่ผ่านการรักษาสภาพและยังพบว่าเมมเบรนที่ผ่านการรักษาสภาพที่ความเข้มข้น 200 mg/l เป็นเวลา 6 h มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากที่สุดมีค่าเท่ากับ  $220 \times 10^{-5} \text{ l.m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$

Xu, Chung และ Huang [24] ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันต่อลักษณะทางกายภาพ ประสิทธิภาพการแยกน้ำผสมน้ำมัน สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อน สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิเอธิเรอไมด์ (polyetherimide, PEI) 20 % โดยน้ำหนัก PVP น้ำหนักโมเลกุล 10, 40 และ 1,300 kDa เป็นสารเติมแต่งช่วยเพิ่มสมบัติชอบน้ำให้แก่เมมเบรนปริมาณ 5 % และ 10 % โดยน้ำหนัก และใช้ NMP เป็นตัวทำละลายปริมาณ 70 % และ 75 % โดยน้ำหนัก เตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยกระบวนการ wet spinning โดยมีสภาวะการขึ้นรูปดังนี้ ระยะห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสเท่ากับ 0 cm สารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวประกอบด้วย NMP/น้ำ ในอัตราส่วน 95/5 ใช้น้ำเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังนอกท่อแข็งตัวพบว่าเมื่อ PVP มีน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณเพิ่มขึ้นลักษณะของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเปลี่ยนจากโครงสร้างรูพรุนที่มีลักษณะทรงกระบอก (finger like structure) เป็น โครงสร้างที่มีลักษณะทรง

กลม (spongy like structure) เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เติม PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากและไม่ผ่านการรักษาสภาพจะมีค่าการกักกันสูง ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ต่ำ ค่าการกักกันสารลดแรงดึงผิว สารคาร์บอน (total organic carbon) และน้ำมัน มีค่าเท่ากับ  $76.1 \approx 79.8$ ,  $91.0 \approx 93.0$  และมากกว่า 99% ตามลำดับ และพบว่าเมมเบรนที่ผ่านการรักษาสภาพมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น ค่า Tg ลดลงเพียงเล็กน้อย ความเครียด ณ จุดขาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ไม่ผ่านการรักษาสภาพ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เติม PVP ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก และเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ผ่านการรักษาสภาพจะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากที่สุดมีค่าเท่ากับ  $117 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$

### 2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรน

Liu, Koops และ Strathmann [25] ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง PEG ที่เติมในสารละลายพอลิเมอร์และสารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวที่มีต่อสมบัติของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิเอเทอร์ซัลโฟน 16 % และ 20 % โดยน้ำหนัก NMP เป็นตัวทำละลาย PEG น้ำหนักโมเลกุล 400 Da และใช้น้ำเป็นสารเติมแต่งร่วมอีกชนิดหนึ่ง สารละลายพอลิเมอร์มีอัตราส่วนระหว่าง PEG/NMP เท่ากับ 1:1 - 4:1 เตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยกระบวนการ dry - wet spinning ระยะห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสเท่ากับ 10 mm สารละลายที่ไหลภายในสปินเนอร์ประกอบด้วย น้ำ/PEG/NMP และใช้น้ำเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังนอกท่อแข็งตัว จากการศึกษพบว่า การเติม PEG ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้สารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดเพิ่มขึ้นและยังทำให้การเชื่อมต่อนั้นของรูพรุนดีขึ้น นอกจากนี้สารเติมแต่ง PEG จะช่วยปรับปรุงให้เมมเบรนมีสมบัติความชอบน้ำเพิ่มขึ้น เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ประกอบด้วย PEG/NMP อัตราส่วนเท่ากับ 1:1 จะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 4:1 โดยค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์จะลดลงจาก  $320 - 130 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$

Qin และ Chung [26] ศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการดันสารละลายเมมเบรนผ่านสปินเนอร์ที่มีต่อสัณฐานวิทยา ประสิทธิภาพการแพร่ผ่านและการกักกัน สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิเอเทอร์ซัลโฟน ใช้ DEG เป็นสารเติมแต่งและ NMP เป็นตัวทำละลาย อัตราส่วน PES/NMP/DEG เท่ากับ 18/42/40 เตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยกระบวนการ wet spinning ระยะห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสเท่ากับ 0 cm สารละลายที่ไหลภายในสปินเนอร์ ประกอบด้วย NMP/น้ำ อัตราส่วนเท่ากับ 86/14 ใช้น้ำเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังนอกท่อแข็งตัวมีอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายเมมเบรนกับสารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวมีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 ให้อัตราการไหลของสารละลายเมมเบรนเพิ่มขึ้นจาก 2.0 - 17.2 m/min โดยไม่มี

การดึงเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงภายหลังจากสารละลายเมมเบรนผ่านหัวสปินเนอร์ ขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่อุณหภูมิ 25°C ความชื้นสัมพัทธ์ 60 % พบว่าอัตราการไหลของสารละลายเมมเบรนเพิ่มขึ้น ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงและแน่นขึ้น เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลดีขึ้น ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และความเครียด ณ จุดขาดลดลงแต่ความสามารถในการกักกัน มอดุลัสของยั้ง (young's modulus) และค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ไม่มีผลต่อค่า Tg โดยค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ลดลงจาก 300 - 74 l.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>.bar<sup>-1</sup>

Sanchez, Basurto และ Fuente [27] ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิอีเทอร์ซัลโฟน 20 % โดยน้ำหนัก ใช้น้ำ PVP และ PEG เป็นสารเติมแต่ง PVP และ PEG มีน้ำหนักโมเลกุล 10 kDa ปริมาณ 5 %, 7.5 % และ 10 % โดยน้ำหนัก และใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย เตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยกระบวนการ dry - wet spinning ระยะระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟสเท่ากับ 60 cm ใช้น้ำเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวและเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังนอกท่อแข็งตัว โดยมีอุณหภูมิ 28 และ 30°C ตามลำดับ ขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่อุณหภูมิ 28°C พบว่าค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่งที่ใช้ โดย PEG เป็นสารเติมแต่งที่เหมาะสมกับกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันมากกว่า PVP และน้ำ ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนที่เติม PEG มีค่ามากที่สุดประมาณ 254 l.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเข้มข้นสารเติมแต่งเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ลดลงและความสามารถในการกักกันเพิ่มขึ้น

Wienk, Scholtenhuis, Boomgaard และ Smolders [28] ศึกษากระบวนการเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจากพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง เช่น องค์ประกอบของสารละลายพอลิเมอร์ ระยะห่างระหว่างสปินเนอร์กับอ่างแยกเฟส อัตราการดันสารละลายเมมเบรนผ่านสปินเนอร์ และความชื้นสัมพัทธ์ขณะเตรียมเมมเบรน สารละลายเมมเบรนประกอบด้วย พอลิอีเทอร์ซัลโฟน 20 % โดยน้ำหนัก ใช้น้ำ PVP และน้ำเป็นสารเติมแต่ง โดย PVP มีน้ำหนักโมเลกุล 18,000 และ 507,000 Da ปริมาณ 7.5 %, 10 %, 12.5 % โดยน้ำหนัก และใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย เตรียมเมมเบรนด้วยกระบวนการ dry - wet spinning สารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวประกอบด้วย NMP/PVP/น้ำ อัตราส่วนเท่ากับ 78/3/19 และใช้น้ำเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังนอกท่อแข็งตัว จากนั้นรักษาสภาพเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ความเข้มข้น 4000 ppm เป็นเวลา 48 h จากการศึกษพบว่าปัจจัยต่างๆมีผลต่อโครงสร้างเมมเบรน โดยระยะห่างระหว่างสปินเนอร์จะควบคุมขนาดรูพรุนบริเวณผิวหนังนอกเมมเบรนและความชื้นสัมพัทธ์ก็มีผลต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เตรียมขณะมีความชื้นสัมพัทธ์มากจะทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณ PVP ที่เพิ่มขึ้น ส่วนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เตรียมขณะมีความชื้นสัมพัทธ์น้อยจะทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ลดลงตามปริมาณ PVP ที่ลดลง

Xu และ Qusay [3] ศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของ PEG ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟน 18 % และ 20 % โดยน้ำหนัก สารเติมแต่งได้แก่ PEG น้ำหนักโมเลกุล 200, 600, 2000, 6000, 10,000 Da และ PVP น้ำหนักโมเลกุล 40,000 Da สารทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณ 0 % - 7 % โดยน้ำหนัก และใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย อัตราส่วนสารละลายพอลิเมอร์ PES/PEG/NMP เท่ากับ 20/5/75 หรือ PES/(PEG600+PVP40,000)/NMP เท่ากับ 18/7/75 เตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยกระบวนการ dry - wet spinning ใช้น้ำเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวและเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังนอกท่อแข็งตัวมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง รักษาสภาพเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยสารละลายกลีเซอรอลความเข้มข้น 50 % โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 48 h เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES/PEG/NMP ที่แปรน้ำหนักโมเลกุลของ PEG พบว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างรูพรุนที่มีลักษณะทรงกระบอกเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะทรงกลมและยังทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจาก 22.0 - 64.0  $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  และสมบัติทางกลลดลง ในกรณี PES/(PEG600+PVP 40,000) /NMP เมื่อความเข้มข้นของ PEG600 ลดลงจาก 7 % - 0 % โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ลดลงจาก 30 - 36  $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมระหว่าง PEG/PVP จะทำให้ผิวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้งภายนอกและภายในเรียบกว่าการผสม PEG เพียงอย่างเดียว

Xu และ Qusay [29] ศึกษาอิทธิพลชนิดของสารเติมแต่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง สารละลายเมมเบรนประกอบด้วยพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟน 18 % โดยน้ำหนัก สารเติมแต่งได้แก่ เอทานอล เมทานอล n - โพรพานอล และน้ำ ปริมาณ 0 % - 25 % โดยน้ำหนัก และใช้ NMP เป็นตัวทำละลาย ขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยกระบวนการ wet spinning และ dry - wet spinning ระยะระหว่างสปีนเนอร์กับอ่างแยกเฟสเท่ากับ 0 และ 3 cm ตามลำดับ ใช้น้ำและ NMP/H<sub>2</sub>O อัตราส่วนเท่ากับ 90/10 เป็นสารที่ทำให้ผิวหนังในท่อแข็งตัวและใช้น้ำเป็นสารที่ทำให้ผิวหนังนอกท่อแข็งตัวมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มีการดึงเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงภายหลังจากสารละลายเมมเบรนผ่านหัวสปีนเนอร์ รักษาสภาพเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยสารละลายกลีเซอรอล 50 % โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 h พบว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เติมเมทานอลหรือเอทานอลปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการ dry - wet spinning จะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์และ

ความสามารถในการกักกันคึกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เตรียมจากกระบวนการ wet spinning นอกจากนั้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่มีปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้นที่เตรียมจากกระบวนการ wet spinning จะทำให้โครงสร้างที่มีลักษณะทรงกระบอกเปลี่ยนเป็น โครงสร้างที่มีลักษณะทรงกลม ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจาก  $47 - 167 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  และค่าการกักกันระดับน้ำหนัก โมเลกุลของ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีค่าประมาณ  $10,000 \text{ Da}$

### 2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำอ้อย

อรรดวรรณ [30] ศึกษาการใช้ไคอะทอไมด์กำจัดสีและความขุ่นในน้ำอ้อย โดยใช้ น้ำอ้อยรวม (mixed juice) ที่ได้จากเครื่องหีบน้ำอ้อยและน้ำอ้อยผสมปูนขาว (limed juice) ซึ่ง น้ำอ้อยทั้ง 2 ชนิดนี้ได้จากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลทราย จากการศึกษาพบว่าการใช้ไคอะทอไมด์ 4 % หรือใช้ไคอะทอไมด์ 2 % ผสมกับแอนไอออนิก พอลิเมอร์  $1 \text{ mg/l}$  และทำการทดสอบที่ อุณหภูมิ  $90 - 103^{\circ}\text{C}$  เป็นสภาวะเหมาะสมที่สุดในการกำจัดสีและความขุ่นของน้ำอ้อย โดยพบว่าน้ำ อ้อยที่ผ่านกระบวนการข้างต้นมีสี ความขุ่น และปริมาณน้ำตาลใกล้เคียงกับน้ำอ้อยใสจาก อุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลทราย

Bhattacharya, Agarwal, De และ Gopal [7] ศึกษาค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยและ การกักกันน้ำตาลในการกรองน้ำอ้อยด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เซลลูโลสอะซิเตดเมมเบรน ชนิดแผ่นสูตรมี M1 มีค่าการกักกันระดับน้ำหนัก โมเลกุล  $10,000 \text{ Da}$  เมมเบรนสูตร M2 มีค่า การกัก กันระดับน้ำหนัก โมเลกุล  $1,500 \text{ Da}$  และเมมเบรนสูตร M3 มีค่าการกักกันระดับน้ำหนัก โมเลกุล  $20,000$  นำน้ำอ้อยสดมาเติมปูนขาวที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  จากนั้นปล่อยให้เกิดการตกตะกอน นำน้ำอ้อย ใสที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนไปเตรียมเป็นสารป้อน โดยให้มีความเข้มข้นของสารป้อน 10, 13 และ  $16^{\circ}\text{brix}$  ทำการทดสอบที่ความดัน 476, 680 และ  $884 \text{ kPa}$  จากการศึกษาพบว่าเมมเบรนสูตร M3 มีประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยดีที่สุด เนื่องจากเมมเบรนทั้ง 3 สูตร มีค่าฟลักซ์การกรองน้ำ อ้อยในช่วงเดียวกันประมาณ  $3 - 6 \text{ m}^3.\text{m}^2.\text{s}$  แต่เมมเบรนสูตร M3 มีการกักกันน้ำตาลน้อยที่สุด ประมาณ 4 % - 9 %

Balakrishnan, Dua และ Bhagat, [31] ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการกรองน้ำอ้อย เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลทราย เช่น ความดัน อัตราการไหลของสารป้อน ค่าความเป็นกรด - ค่าของสารป้อนและการรักษาสภาพสารป้อนเบื้องต้น พอลิซัลโฟเนเมมเบรนและพอลิอีเทอร์ ซัลโฟเนเมมเบรนชนิดแผ่นมีค่าการกักกันระดับน้ำหนัก โมเลกุล 50 และ  $20 \text{ kDa}$  ตามลำดับ จาก การศึกษาพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก  $0.5 - 2.0 \text{ kg/cm}^2$  และอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก  $3.7 - 6.8 \text{ l/min}$  จะทำให้ค่าฟลักซ์น้ำอ้อยมีแนวโน้มลดลงจาก  $30 - 10 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และ  $25 - 17 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ตามลำดับ น้ำอ้อยที่มีค่าความเป็นกรด - ค่าระหว่าง 7 - 8.5 จะทำให้ค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยเพิ่มขึ้น

ประมาณ 20 % - 50 % เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำอ้อยที่มีค่าความเป็นกรด - ด่างระหว่าง 5.5 - 6.5 และ ยังพบว่า การบำบัดน้ำอ้อยเบื้องต้น โดยการเติมปูนขาวที่อุณหภูมิ 70°C จากนั้นนำไปต้มให้เดือดและ ปลดปล่อยให้ตกตะกอนก่อนที่จะนำมากรองด้วยเมมเบรนจะทำให้ค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยเพิ่มขึ้น

Ghosh, Balakrishnan, Dua และ Bhagat [32] ศึกษาประสิทธิภาพของเมมเบรน ชนิดท่อม้วนที่ใช้ในการกรองน้ำอ้อยในระดับอัตราฟิลเตรชัน พอลิเอเทอร์ซัลโฟน ได้แก่ PPE0106 (40 mil), PPE0106 (60 mil) และ PPE0106 (80 mil) พอลิซัลโฟนและ Cellpore มีค่าการกักกัน ระดับน้ำหนักโมเลกุล 20 kDa น้ำอ้อยที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ น้ำอ้อยสดและน้ำอ้อยใสที่ผ่านการ ตกตะกอนด้วยการเติมปูนขาว น้ำอ้อยทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นน้ำอ้อยที่นำมาจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ทราซ ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยและคุณภาพของน้ำอ้อย เช่น ความดัน 1- 6 kg.cm<sup>-1</sup> เวลาในการกรองน้ำอ้อยและอุณหภูมิของน้ำอ้อยในช่วง 50 - 67°C จาก การศึกษาพบว่าเมื่อความดันและเวลาในการกรองเพิ่มขึ้นทำให้ค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยลดลง เนื่องจากความดันและระยะเวลาในการกรองที่เพิ่มขึ้นทำให้ชั้นอนุภาคที่เคลือบบนผิวเมมเบรนจะ อัดตัวแน่นขึ้นเป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้นดังนั้นค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยจึง ลดลงและยังพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการกรองเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยเพิ่มขึ้น น้ำอ้อยทั้ง 2 ชนิดเมื่อกรองผ่านเมมเบรนจะทำให้สีจางลง มีความใสมากขึ้น และปริมาณแคลเซียม ออกไซด์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำอ้อยสด

Saha, Balakrishnan และ Ulbricht [33] ศึกษาผลของพอลิแซคาไรด์ต่อการอุดตัน ในเมมเบรนที่ใช้กรองน้ำอ้อยด้วยกระบวนการอัตราฟิลเตรชัน พอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนและ พอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นมีค่าการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล 30, 50 และ 100 kDa โดยใช้น้ำ อ้อยสดและน้ำอ้อยใสที่ผ่านการเติมปูนขาวซึ่งน้ำอ้อยทั้ง 2 ชนิดเป็นน้ำอ้อยจากอุตสาหกรรม ผลิตน้ำตาลทราซ จากการศึกษาพบว่าในน้ำอ้อยประกอบด้วยสารที่มีองค์ประกอบ 2 กลุ่มได้แก่ สาร ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก (130 kDa) เช่น พอลิแซคาไรด์ โปรตีน สารอีกกลุ่มได้แก่สารที่มีน้ำหนัก โมเลกุลน้อย(1 kDa) สารทั้ง 2 กลุ่มนี้จะมีอยู่ในน้ำอ้อยทั้ง 2 ชนิดและทำให้เกิดการอุดตันในเมม เบรนโดยทำให้ค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยลดลง 10 - 28% เมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนใหม่ที่ไม่ใช่ ในการกรองน้ำอ้อย

Tako และ Nakamura [34] ศึกษาชนิดของเมมเบรนที่มีผลต่อค่าฟลักซ์การกรอง น้ำอ้อยและคุณภาพของน้ำอ้อยด้วยกระบวนการกรองอัตราฟิลเตรชัน เซลลูโลสเมมเบรนและพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นใช้สัญลักษณ์ YM และ PM ตามลำดับ โดยมีค่าการกักกันระดับน้ำหนัก โมเลกุล 5,000 Da (เมมเบรนสูตร YM-5), การกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da (เมมเบรน สูตร YM - 10 และ PM - 10) และการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล 30,000 Da (เมมเบรนสูตร YM - 30 และ PM - 30) ใช้น้ำอ้อยสดและน้ำอ้อยใสที่ผ่านการเติมปูนขาวเป็นสารป้อน ทำการกรองที่

ความดัน  $4 \text{ kg.cm}^{-2}$  อุณหภูมิสารป้อน  $67^{\circ}\text{C}$  จากการศึกษาพบว่าเมมเบรน YM - 5 และ YM - 30 เป็นเมมเบรนที่เหมาะสมสำหรับการกรองน้ำอ้อยสดและน้ำอ้อยใสที่ผ่านการเติมปูนขาว โดยมีค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยมากที่สุดประมาณ  $0.09$  และ  $0.14 \text{ ml.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$  ตามลำดับ และสามารถกักกั้นน้ำตาลซูโครสได้ประมาณ  $5\% - 7\%$  และ  $0\% - 1.2\%$  ตามลำดับ



## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. พอลิซัลโฟน (polysulfone, PSF) จำหน่ายโดยบริษัท Tianjin Motian Membrane Eng.& Tech.Co.,Ltd.
2. พอลิเอเทอร์ซัลโฟน (polyethersulfone, PES) (Radel<sup>®</sup> A 100) จำหน่ายโดยบริษัท Solvay Advanced Polymers, L.L.C.
3. เอ็น-เมทิล-2-ไพโรโรลิโดน (n-methyl-2-pyrrolidone, NMP) ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายผลิตโดยบริษัท Lab Scan Analytical Science
4. สารเติมแต่ง: พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) และสารก่อรูพรุน คือ
  - 4.1 พลาสติไซเซอร์มี 2 ชนิด คือ
    1. 1, 2 - โพรเพนไดออล (1, 2 - propandiol, 1, 2 - PD) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba Reagenti เป็นพลาสติไซเซอร์ที่ใช้กับวัสดุที่เกี่ยวข้องกับอาหาร ตัวอย่างเช่น จุกไม้ก๊อก [35]
    2. ไตรอะซิทีน (triacetin) ความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ผลิตโดยบริษัท Fluka ไตรอะซิทีนเป็นพลาสติไซเซอร์ที่นิยมใช้กับเซลล์โอสอะซิเตด [36]
  - 4.2 สารก่อรูพรุนมี 5 ชนิด คือ
    1. พอลิไวนิลไพโรโรลิโดน ชนิด K15 น้ำหนักโมเลกุล 10,000 (Da) ผลิตโดยบริษัท Fluka
    2. พอลิไวนิลไพโรโรลิโดน ชนิด K30 น้ำหนักโมเลกุล 40,000 Da ผลิตโดยบริษัท Fluka
    3. พอลิไวนิลไพโรโรลิโดน ชนิด K90 น้ำหนักโมเลกุล 360,000 Da ผลิตโดยบริษัท Fluka
    4. พอลิไวนิลไพโรโรลิโดน น้ำหนักโมเลกุล 1,300,000 Da ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich, Inc
    5. พอลิเอทรีนไกลคอล น้ำหนักโมเลกุล 2,000 4,000 6,000 และ 10,000 Da ผลิตโดยบริษัท Merck-Schuchardt

5. สารทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล ผลิตโดยบริษัท Acros Organics มี 2 ชนิด  
คือ

1. เปปซิน (pepsin) น้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da
2. โบวี ซีรัม แอลบูมิน (bovine serum albumin, BSA) น้ำหนักโมเลกุล 67,000 Da
6. กลีเซอรอล (glycerol) ทำหน้าที่เป็นสารละลายเพื่อรักษาสภาพเมมเบรน จำหน่ายโดย

บริษัท Itamar (Thailand) Co.,Ltd.

7. น้ำอ้อยสด ช่วงเดือนพฤศจิกายน ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ 2549 เป็นน้ำอ้อยที่มี  
จำหน่ายตามท้องตลาด

### 3.2 อุปกรณ์การวิจัย

1. กระจกใส ขนาด 25×25 cm
2. มีดปาดฟิล์ม
3. นาฬิกาจับเวลา
4. เครื่องชั่ง ความละเอียด 2 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท A&D รุ่น HF2000G
5. เครื่องชั่ง ความละเอียด 4 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Mettler toledo รุ่น AB304-S
6. บีกเกอร์ ขนาด 50, 250, 1,000 และ 2,000 ml
7. กระจกตวง ขนาด 50 และ 100 ml
8. บีเปต ขนาด 0.5, 5 และ 10 ml
9. ขวดวัดปริมาตร 25 และ 500 ml
10. ขวดเก็บตัวอย่าง ขนาด 25 ml
11. เทอร์โมมิเตอร์ ช่วงอุณหภูมิ 0-100°C
12. ตัวกวนแท่งแม่เหล็ก
13. แผ่นความร้อนพร้อมเครื่องกวนระบบแม่เหล็กหมุน ผลิตโดยบริษัท Labinco รุ่น L-81

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ชุดทดสอบการกรองโมดูลชนิดแผ่นที่พัฒนาขึ้นเองในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ชุดทดสอบการกรองโมดูลชนิดเส้นใยกลางที่พัฒนาขึ้นเองในระดับห้องปฏิบัติการ
3. เครื่องเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง ผลิตโดยบริษัท Tianjin Motian Membrane Eng.

& Tech.Co.,Ltd.

4. ตู้อบความร้อน ผลิตโดยบริษัท Memmert รุ่น UE 400
5. เครื่องวัดความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ ผลิตโดยบริษัท Anton Paar รุ่น DV-3D
6. เครื่องยูวี - วิสซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV - Visible spectrophotometer) ผลิตโดยบริษัท Shimadzu รุ่น UV-1700
7. เครื่องหาขนาดรูพรุนโดยใช้ปรอท ผลิตโดยบริษัท Quantachrome Instruments รุ่น Pore Master
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ผลิตโดยบริษัท Jeol รุ่น JSM-5800 LV
9. กล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) ผลิตโดยบริษัท Olympus Optical Co., Ltd. รุ่น GX 71
10. เครื่องทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง (universal testing machine) ผลิตโดยบริษัท Lloyd รุ่น CS2060
11. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายได้ (refractometer) ผลิตโดยบริษัท Shilac
12. เครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีของเหลวประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) ผลิตโดยบริษัท Shimadzu รุ่น LC-6A

### 3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมเมมเบรนชนิดแผ่น

การเตรียมพอลิซัลโฟนเมมเบรนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น มีขั้นตอนดังนี้

1. นำพอลิซัลโฟนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟนผสมกับสารเคมีในปริมาณต่างๆตามสูตรดังแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ เตรียมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยเครื่องกวนที่อุณหภูมิ 40°C
2. ขึ้นรูปเมมเบรนชนิดแผ่นโดยการเทสารละลายพอลิเมอร์บนแผ่นกระจกเรียบ ใช้มีดปาดฟิล์มปาดสารละลายพอลิเมอร์บนแผ่นกระจกให้ความหนาประมาณ 50  $\mu\text{m}$  เวลาระเหยตัวทำละลาย 10 s จากนั้นแช่แผ่นกระจกที่มีสารละลายพอลิเมอร์ติดอยู่ลงในอ่างน้ำเพื่อให้สารละลายเกิดการแข็งตัว แช่น้ำต่อไปอีก 24 h เพื่อกำจัดตัวทำละลายที่อาจตกค้างอยู่ในเมมเบรน อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเมมเบรน 22°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %

3. รักษาสภาพเมมเบรนเพื่อป้องกันการ โครงสร้างรูพรุนเกิดการยุบตัว โดยการนำเมมเบรนแช่ในสารละลายกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 h จากนั้นนำมาตั้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (22°C) ก่อนที่จะนำเมมเบรนไปทดสอบสมบัติอื่นๆต่อไป

#### 3.4.2 การเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

การเตรียมพอลิซัลโฟนเมมเบรนและพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

1. นำพอลิซัลโฟนและพอลิเอเทอร์ซัลโฟนผสมกับสารเคมีในปริมาณต่างๆตามสูตรดังแสดงในตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ

2. ขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยเครื่องเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยมีสภาวะการขึ้นรูปดังนี้

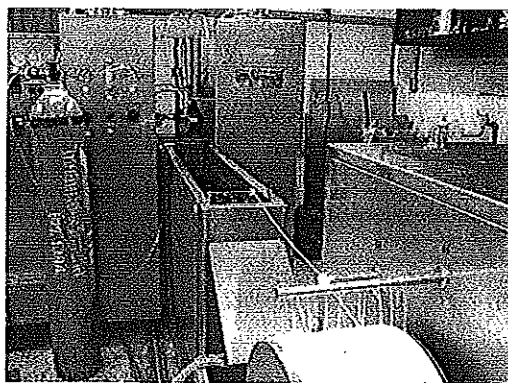
1. อุณหภูมิผสมสารละลาย (mixer temperature)	40°C
2. อุณหภูมิของหัวสปินเนอร์ (spinneret temperature)	40°C
3. ความเร็วในการดันสารละลายพอลิเมอร์ (Dope extrusion speed)	10 m/min
4. สารที่ทำให้ผิวด้านในท่อแข็งตัว (bore liquid composition)	น้ำ
5. ความดันของสารที่ทำให้ผิวด้านในท่อแข็งตัว (bore liquid pressure)	0.1 MPa
6. อัตราการไหลของสารที่ทำให้เมมเบรนแข็งตัวภายใน (bore liquid flow rate)	7 ml/min
7. สารที่ทำให้ผิวด้านนอกท่อแข็งตัว (external coagulant)	น้ำ
8. อุณหภูมิของสารที่ทำให้เมมเบรนแข็งตัว (coagulant temperature)	22°C
9. ระยะห่างระหว่างหัวสปินเนอร์กับอ่างน้ำ (air gap distance)	20 cm
10. ความเร็วการดึงเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (take up speed)	210 m/min

11. อุณหภูมิการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง 22°C  
(room temperature)
12. ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %  
(relative humidity)

3. รักษาสภาพเมมเบรนเพื่อป้องกัน โครงสร้างรูพรุนเกิดการยุบตัว โดยการนำเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแช่ในสารละลายกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 h จากนั้นนำมาตั้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะนำเมมเบรนไปทดสอบสมบัติอื่นๆต่อไป เครื่องเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงในรูปที่ 3.1 เปรียบเทียบผลการรักษาสภาพเมมเบรนแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.1 สูตรของพอลิซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดแผ่น (หน่วยเป็น wt%)

สูตร	สารเคมี				
	PSF	1,2 - PD	PVP(K90)	PVP(1300K)	NMP
P1	19	-	-	-	81
P2	19	4	-	-	77
P3	19	-	2	-	79
P4	19	-	-	2	79
P5	19	4	2	-	75
P6	19	4	-	2	75



รูปที่ 3.1 เครื่องเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง



ตารางที่ 3.3 สูตรต่างๆของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง (หน่วยเป็น wt%)

สูตร	สารเคมี				
	PSF	1,2-PD	Triacetin	PVP(1300K)	NMP
PSF1	19	-	-	-	81
PSF2	19	4	-	-	77
PSF3	19	-	4	-	77
PSF4	19	-	-	1	80
PSF5	19	-	-	2	79
PSF6	19	-	-	4	77
PSF7	19	4	-	1	76
PSF8	19	-	4	1	76
PSF9	19	4	-	2	75

ตารางที่ 3.4 สูตรต่างๆของพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง (หน่วยเป็น wt%)

สูตร	สารเคมี				
	PES	Triacetin	PEG 10,000	PVP (K30)	NMP
PES1	19	2	-	-	79
PES2	19	10	-	-	71
PES3	19	2	5	-	74
PES4	19	10	5	-	66
PES5	21	2	5	-	72
PES6	21	10	5	-	64
PES7	21	2	-	5	72

#### 3.4.3 การประกอบโมดูล

การประกอบโมดูล (module) จะประกอบด้วยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางจำนวน 15 เส้น แต่ละเส้นมีความยาว 50 cm นำเมมเบรนใส่ลงในท่อพลาสติกจากนั้นหล่ออีพ็อกซีเรซินที่ปลายทั้ง 2 ข้างของท่อพลาสติก เติมน้ำลงในท่อโมดูลที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว เป็นเวลา 24 h

เพื่อล้างสารละลายกอลลีเซอรอลที่เคลือบอยู่บนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง และเป็นเวลาเพียงพอที่จะ  
ทำให้เรซินแข็งตัวพร้อมที่จะทำการทดสอบการกรอง

#### 3.4.4 การทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนชนิดแผ่น

1. นำเมมเบรนแช่น้ำสะอาด เป็นเวลา 24 h เพื่อล้างสารละลายกอลลีเซอรอลที่เคลือบอยู่บน  
เมมเบรน จากนั้นนำเมมเบรนมาประกอบเข้ากับชุดทดสอบการกรอง โมดูลชนิดแผ่นดังแสดงในรูป  
ที่ 3.2a เดินเครื่องชุดทดสอบการกรองประมาณ 30 min เพื่อล้างสารละลายกอลลีเซอรอลที่อาจจะ  
ตกค้างอยู่ในเมมเบรน

2. ศึกษาฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ที่ผ่านเมมเบรน โดยใช้ระบบการกรองแบบไหลขวาง (cross  
flow filtration) ภายใต้อัตราความดัน 1 bar ทำการทดสอบ 3 ครั้งต่อตัวอย่าง รายงานค่าเฉลี่ย ค่าฟลักซ์น้ำ  
บริสุทธิ์คำนวณได้ตามสมการที่ 3.1 [2]

$$\text{flux} = \frac{Q}{A \cdot t} \quad (3.1)$$

เมื่อ	flux	คือ ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น $\text{lm}^2\text{h}^{-1}$
	Q	คือ ปริมาตรของน้ำบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น l
	A	คือ พื้นที่ของเมมเบรน มีหน่วยเป็น $\text{m}^2$
	t	คือ เวลาที่เก็บน้ำบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น h

#### 3.4.5 การทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

1. นำโมดูลเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่แช่น้ำแล้ว 24 h มาประกอบเข้ากับชุดทดสอบ  
การกรอง โมดูลชนิดเส้นใยกลวงดังแสดงในรูปที่ 3.2b เดินเครื่องชุดทดสอบการกรองประมาณ 30  
min เพื่อล้างสารละลายกอลลีเซอรอลที่อาจยังตกค้างอยู่ในเมมเบรน

2. ศึกษาฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ที่ผ่านเมมเบรนโดยใช้ระบบการกรองแบบไหลขวาง (cross  
flow filtration) ภายใต้อัตราความดัน 1, 2 และ 3 bar ทำการทดสอบ 2 ครั้งต่อตัวอย่าง รายงานค่าเฉลี่ย ค่า  
ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์คำนวณได้ตามสมการที่ 3.2 [2]

$$\text{flux} = \frac{Q}{A \cdot t} = \frac{Q}{N\pi dt} \quad (3.2)$$

เมื่อ	flux	คือ ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น $\text{lm}^2\text{h}^{-1}$
-------	------	---

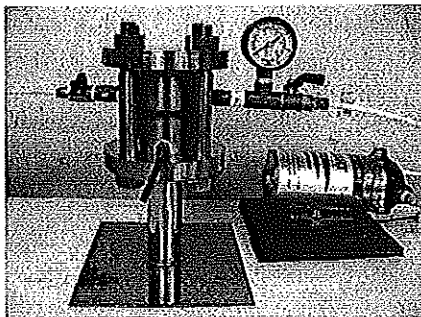


- Q คือ อัตราการไหลของน้ำบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น l  
 N คือ จำนวนเส้นของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง  
 d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง มีหน่วยเป็น m  
 l คือ ความยาวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง มีหน่วยเป็น m  
 t คือ เวลาที่เก็บน้ำบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น h

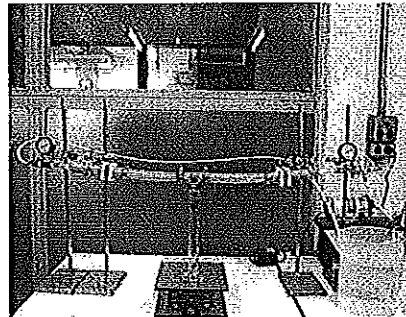
3. การหาค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ (permeability,  $L_p$ ) คำนวณได้จากความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์กับความดัน ค่าความต้านทานการแพร่ผ่านของเมมเบรน (membrane resistance,  $R_m$ ) คำนวณได้ตามสมการที่ 3.3 [17]

$$L_p = \frac{1}{\mu R_m} \quad (3.3)$$

- เมื่อ  $L_p$  คือ สภาพการซึมผ่านได้ ( $l \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot bar^{-1}$ )  
 $\mu$  คือ ความหนืดของน้ำ (1 Pa.s)  
 $R_m$  คือ ความต้านทานการแพร่ของเมมเบรน ( $m^{-1}$ )



(a)



(b)

รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบการกรอง (a) โมดูลชนิดแผ่น (b) โมดูลชนิดเส้นใยกลวง

3.4.6 การทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (Molecular weight cut off, MWCO)

MWCO ของเมมเบรน คือค่าน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลายที่เมมเบรนสามารถกักกันได้ 90% ขึ้นไป [10] เมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันส่วนใหญ่จะรายงานค่า MWCO แทนขนาดรูพรุน มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1. เตรียมสารละลายความเข้มข้น 100 mg/l โดยใช้ตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน ได้แก่ เปปซิน มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da และ BSA มีน้ำหนักโมเลกุล 67,000 Da
2. ทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยใช้ระบบการกรองแบบไหลขวาง (cross flow filtration) ภายใต้ความดัน 1 bar
3. วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารป้อนและเพอมีเอทด้วยเครื่อง UV – Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 280 nm ค่าการกักกันคำนวณได้ตามสมการที่ 3.4 [2]

$$\text{การกักกัน (\%)} = \left( 1 - \frac{C_p}{C_f} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $C_f$  คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบในสารป้อน มีหน่วยเป็น mg/l  
 $C_p$  คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบในเพอมีเอท มีหน่วยเป็น mg/l

#### 3.4.7 การทดสอบการกรองน้ำอ้อยของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

1. ประกอบโมดูลตามวิธีที่ 3.4.3
2. กรองน้ำอ้อยสดที่ได้จากการผ่านลูกหีบโดยใช้ผ้าขาวบางซ้อนกัน 3 ชั้น ทำการกรอง 1 ครั้ง เพื่อกำจัดเศษขานอ้อยที่ปะปนอยู่ในน้ำอ้อยให้หมดไป
3. ทดสอบการกรองน้ำอ้อยตามวิธีที่ 3.4.5 ภายใต้ความดัน 1 bar ทำการทดสอบ 2 ครั้ง ต่อตัวอย่าง รายงานค่าเฉลี่ย
4. วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid) คือ ความขุ่น และปริมาณน้ำตาลของสารป้อน เพอมีเอท และรีเทนเทท

#### 3.4.8 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

นำตัวอย่างน้ำอ้อยมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ด้วยเครื่อง refractometer ซึ่งเป็นการวัดการหักเหของแสง โดยหยดตัวอย่างน้ำอ้อยลงบนแผ่นรับตัวอย่างของเครื่อง จากนั้นอ่านค่าที่ได้มีหน่วยเป็น °brix

#### 3.4.9 การวิเคราะห์สีของน้ำอ้อย

วิเคราะห์สีของน้ำอ้อยด้วยเครื่อง UV – Visible spectrophotometer โดยวัดการดูดกลืนแสงของน้ำอ้อยที่ความยาวคลื่น 560 nm ใช้น้ำเป็น blank ค่ารายงานเป็นหน่วย absorbance [8]

#### 3.4.10 การวิเคราะห์ความขุ่นของน้ำอ้อย

วิเคราะห์ความขุ่นของน้ำอ้อยด้วยเครื่อง UV – Visible spectrophotometer โดยวัดการดูดกลืนแสงของน้ำอ้อยที่ความยาวที่ความยาวคลื่น 900 nm ความขุ่นของน้ำอ้อยคำนวณได้ตามสมการที่ 3.5 [8]

$$\text{ความขุ่น} = \text{ABS}_{900} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\text{ABS}_{900}$  คือ ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 900 nm

#### 3.4.11 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลของน้ำอ้อย

การวิเคราะห์น้ำตาลในน้ำอ้อยส่วนมากจะทำการวิเคราะห์น้ำตาลซูโครสเนื่องจากในน้ำอ้อยมีปริมาณน้ำตาลซูโครส 70-88% ซึ่งเป็นน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำอ้อย ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลซูโครสด้วยเครื่อง HPLC ที่ศูนย์ทดสอบและมาตรฐาน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและสภาวะการวิเคราะห์ดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 g ละลายน้ำ 50 ml นำมากรองด้วยตัวกรองไนลอนที่มีขนาดรูพรุน  $0.45 \mu\text{m}$  จากนั้นจึงฉีดเข้าเครื่อง HPLC
2. เครื่องจับสัญญาณ (detector): Reference Index Detector RID-6A
3. เฟสที่อยู่กับที่ (column): Aminex™ HPX-87C
4. อุณหภูมิเฟสที่อยู่กับที่ (column temperature):  $85^{\circ}\text{C}$
5. เฟสเคลื่อนที่ (mobile phase): 0.0001 M calcium disodium ethylene diamine tetra acetate (CaEDTA)
6. อัตราการไหล (flow rate): 0.5 ml/min

#### 3.4.12 การทดสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์

1. เทสารละลายพอลิเมอร์ลงในกระบอกทดสอบความหนืดประมาณ 13 ml จากนั้นนำไปประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบความหนืด ปรับอุณหภูมิสารละลายพอลิเมอร์ให้มีอุณหภูมิคงที่ประมาณ  $40^{\circ}\text{C}$
2. ใช้หัวเข็มในการทดสอบความหนืด 4 ขนาด ทำการทดสอบที่อัตราเลื่อน 0.3, 10, 50, 100 และ 200 rpm

3. บันทึกค่าความหนืด และเปอร์เซ็นต์ทอร์ค ในแต่ละหัวเข็มที่อัตราเร็วต่างๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์

3.4.13 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (tensile properties)

นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการดึงโดยใช้หัวจับทดสอบการดึงแบบเส้นใย ระยะห่างระหว่างหัวจับ (gauge length) 50 mm ความเร็วในการดึงยึด 50 mm/min [24] บันทึกค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break) และความเครียด ณ จุดขาด (elongation at break)

3.4.14 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (morphology)

ทำการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยกล้อง SEM เตรียมตัวอย่างเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยแช่ในไนโตรเจนเหลวจากนั้นหักเมมเบรนเป็นชิ้นเล็กๆนำไปติดบนแท่นทองเหลืองแล้วนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อนจะนำไปส่องดูด้วยเครื่อง SEM ทำการวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.15 การหาขนาดรูพรุนโดยการใช้ปรอท (mercury intrusion)

เป็นวิธีที่ใช้บอกขนาดของรูพรุนอีกวิธีหนึ่งโดยใช้ปรอทแทนของเหลวอื่น ทำการวิเคราะห์หาขนาดรูพรุน ที่ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและสภาวะการวิเคราะห์ดังนี้

1. ตัดตัวอย่างเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงให้มีความยาวประมาณ 1.5 cm นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 h

2. ชั่งน้ำหนักกระเปาะเปล่า จากนั้นใส่ตัวอย่างลงในกระเปาะประมาณ 2/3 ของกระเปาะและนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

3. ประกอบชุดกระเปาะให้เรียบร้อยและนำไปทดสอบที่สภาวะความดันต่ำ ความดันไม่เกิน 50 psi

4. เมื่อทดสอบที่สภาวะความดันต่ำเรียบร้อยแล้ว นำกระเปาะออกจากเครื่องมาชั่งน้ำหนักซึ่งกระเปาะจะมีปรอทบรรจุอยู่ จากนั้นนำกระเปาะนี้ไปทดสอบที่สภาวะความดันสูงต่อความดันไม่เกิน 33,000 psi

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 พอลิซัลโฟนเมมเบรน

##### 4.1.1 ผลการทดสอบฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น

การศึกษาพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง ผลทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น ภายใต้ความดัน 1 bar อัตราการไหลของสารป้อน 0.15 l/h อุณหภูมิ น้ำบริสุทธิ์ประมาณ 22 - 25°C แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น

สูตร	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ ( $l.m^{-2}.h^{-1}$ )
P1	100
P2	191
P3	121
P4	166
P5	124
P6	251

พอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นเตรียมโดยวิธี dry - wet process คือ มีการระเหยตัวทำละลายบางส่วนในอากาศจากนั้นแช่ลงในอ่างแยกเฟสเพื่อทำให้เมมเบรนแข็งตัว โดยอาศัยกระบวนการเปลี่ยนเฟส (phase inversion process) ระหว่างกระบวนการเปลี่ยนเฟสจะทำให้สารละลายที่อยู่ในสภาพเฟสเดียวเกิดการแยกเป็น 2 เฟส คือ เฟสที่มีปริมาณพอลิเมอร์มากจะเกิดการแข็งตัวเป็นส่วนเนื้อเมมเบรนขณะที่เฟสที่มีปริมาณพอลิเมอร์น้อยจะกลายเป็นรูภายในเมมเบรน [37]

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P1 มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดแผ่นสูตรอื่น เนื่องจากเมมเบรนชนิดแผ่นสูตรนี้

ไม่มีการผสมสารเติมแต่งมีเพียงพอลิซัลโฟเนเท่านั้น ในขณะที่เมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P2-P6 มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P1 เนื่องจากเมมเบรนกลุ่มนี้มีการผสมสารเติมแต่งลงไปคาดว่าจะทำให้รูพรุนเพิ่มมากขึ้น

เมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P2, P3 และ P4 ใช้ศึกษาชนิดสารเติมแต่งที่มีต่อฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ สารเติมแต่งที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์ PVP(K90) และ PVP (1300K) ตามลำดับ โดย 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์เป็นพลาสติกไซเซออร์และ PVP เป็นสารก่อรูพรุน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P2 ที่ผสม 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากกว่าเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P3 และ P4 ซึ่งผสมสารก่อรูพรุนกลุ่ม PVP เนื่องจากระหว่างกระบวนการผลิตเมมเบรนในขั้นตอนของการทำให้เมมเบรนเกิดการแข็งตัวจะเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างตัวทำละลายที่อยู่ในเมมเบรนจะแพร่ออกไปยังอ่างแยกเฟสและตัวไม่ทำละลาย (น้ำ) จะแพร่เข้ามายังเมมเบรน ซึ่งอัตราการแพร่ของสารทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีผลต่อโครงสร้างเมมเบรน เมมเบรนที่มีการผสม 1,2-โพรเพนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่มีลักษณะเป็นตัวไม่ทำละลายจะทำให้เมมเบรนเกิดการแยกเฟสอย่างรวดเร็ว โครงสร้างเมมเบรนที่เกิดขึ้นจะมีชั้นผิวหนังด้านบน (top layer) ที่บางมากและชั้นรูพรุนด้านล่าง (sublayer) ขนาดใหญ่ การเติมสารเติมแต่งนอกจากจะทำให้เมมเบรนมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นแล้วยังทำให้เมมเบรนมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นด้วย [17, 38] จากโครงสร้างของเมมเบรนดังกล่าวทำให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเมมเบรนที่ผสม 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์จึงมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากขึ้น นอกจากนั้นน้ำหนักโมเลกุลของสารก่อรูพรุนก็มีผลต่อฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เช่นกัน เมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P3 และ P4 ผสมสารก่อรูพรุน PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P4 ซึ่งผสม PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า (1,300K) จะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P3 ซึ่งผสม PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า (K90) เนื่องจาก PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะกระจายตัวบริเวณผิวเมมเบรนได้ง่ายขึ้น ขณะที่เมมเบรนสัมผัสกับน้ำ PVP จะเกิดการบวมตัวและปกคลุมบริเวณผิวเมมเบรนได้ทั่วถึงเป็นการช่วยปรับปรุงสมบัติของผิวเมมเบรนทำให้บริเวณผิวเมมเบรนมีมุมสัมผัส (contact angle) ตกลง นอกจากนั้นหมู่ฟังก์ชัน N-C=O ที่อยู่ในโมเลกุล PVP จะช่วยให้เกิดรูพรุนในเมมเบรนได้ง่ายขึ้น [39, 38] ดังนั้นโมเลกุลน้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ดีขึ้นเป็นผลให้เมมเบรนที่ผสม PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากขึ้น

เมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P5 และ P6 เป็นเมมเบรนที่ผสม 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์ และ PVP เข้าด้วยกัน พบว่าเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P6 ซึ่งเป็นเมมเบรนที่ผสม PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่ายังคงมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเช่นเดิม จากผลการศึกษาในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่ผสมสารเติมแต่งจะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนที่มีพอลิ-

ซัลโฟนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าสารเติมแต่งประเภทพลาสติกไซเซอร์จะมีผลทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเติมสารก่อรูพรุน เมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P6 ซึ่งเป็นสูตรที่มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากที่สุดมาทำการศึกษาต่อ โดยเตรียมเป็นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

#### 4.1.2 ผลการทดสอบฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

พอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเตรียมโดยวิธี dry - wet spinning คือ มีการระเหยตัวทำละลายบางส่วนในอากาศ จากนั้นแช่ลงในอ่างแยกเฟสเพื่อทำให้เมมเบรนแข็งตัวโดยอาศัยกระบวนการเปลี่ยนเฟสเช่นเดียวกับการผลิตเมมเบรนชนิดแผ่น ผลการทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ ภายใต้ความดัน 1, 2 และ 3 bar อัตราการไหลของสารป้อน 0.01, 0.02, 0.02 l/h ตามลำดับ อุณหภูมิน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 22 - 25°C แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ ( $l \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )			สภาพให้ซึมผ่านได้ ( $l \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot bar^{-1}$ )	ความต้านทานการ แพร่ของเมมเบรน ( $m^{-1}$ )
	1 บาร์	2 บาร์	3 บาร์		
PSF1	14.35	30.48	43.25	14.33	0.07
PSF2	85.51	166.80	249.70	83.04	0.01
PSF3	81.35	155.61	247.75	81.75	0.01
PSF4	55.89	104.56	161.17	53.22	0.02
PSF5	20.64	39.79	57.09	19.04	0.05
PSF6	6.32	12.96	18.95	6.35	0.16
PSF7	60.93	130.12	193.91	65.10	0.02
PSF8	110.76	234.29	341.48	114.80	0.009
PSF9	27.82	61.31	92.80	31.19	0.03

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF1, PSF2 และ PSF3 ใช้ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งที่มีต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF1 เป็นเมมเบรนที่ไม่มีสารผสมสารก่อรูพรุน มีเพียงพอลิซัลโฟนเพียงอย่างเดียว เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF2

และ PSF3 เป็นเมมเบรนที่มีการผสม 1, 2 - โพรเพนไดออกอลและไตรอะซิทีน ตามลำดับ ซึ่งเป็นสารเติมแต่งชนิดพลาสติกไซเซอร์ มีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ 1, 2 - โพรเพนไดออกอลเป็นสารเติมแต่งในเมมเบรน [23] แต่ยังไม่มียางานการวิจัยที่ใช้ไตรอะซิทีนเป็นสารเติมแต่งในเมมเบรน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF1 มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้น้อยกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงอีก 2 สูตร เนื่องจากธรรมชาติของพอลิซัลโฟนมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จากสาเหตุดังกล่าวทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้ลำบาก จึงทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรนี้มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้น้อย เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงกลุ่มที่มีการผสมสารเติมแต่งจะทำให้เมมเบรนมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนที่มีพอลิซัลโฟนเพียงอย่างเดียวเนื่องจากสารก่อรูพรุนที่ผสมลงไปจะช่วยให้โครงสร้างเมมเบรนมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1.1 และจากค่าความต้านทานการแพร่ของเมมเบรนในตารางที่ 4.2 ยังแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่มีการผสมสารเติมแต่งจะมีความต้านทานการแพร่ของเมมเบรนลดลงทำให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ที่เพิ่มขึ้น

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF4, PSF5 และ PSF6 ใช้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณ PVP ที่มีต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ PVP เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) และยังมีสมบัติเป็นสารก่อรูพรุน นิยมใช้ PVP เป็นสารเติมแต่งในพอลิซัลโฟนเมมเบรน เพื่อปรับปรุงสมบัติความชอบน้ำของเมมเบรนให้ดีขึ้น [3, 23] ระหว่างกระบวนการผลิตเมมเบรน ในขั้นตอนของการทำให้เมมเบรนเกิดการแข็งตัว PVP เป็นสารเติมแต่งพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำจึงสามารถละลายออกไปในน้ำได้ ทำให้บริเวณที่ PVP ละลายออกไปมีรูพรุนเกิดขึ้น [41] แต่เนื่องจากพอลิซัลโฟนมีสมบัติไม่ชอบน้ำและมีปริมาณมากในสารละลาย จึงทำให้เมมเบรนเกิดการแข็งตัวได้เร็ว อีกทั้ง PVP มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ดังนั้น PVP บางส่วนยังคงหลงเหลือและกระจายตัวอยู่ในเมมเบรน บางส่วนก็กระจายตัวอยู่บริเวณผนังรูพรุน [24] เป็นผลทำให้เมมเบรนที่เติม PVP มีสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้น [42, 43] จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF4, PSF5 และ PSF6 มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ลดลง เมื่อปริมาณ PVP เพิ่มขึ้นตามลำดับ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่สัมผัสกับน้ำจะทำให้ PVP ที่กระจายตัวอยู่ในเมมเบรนเกิดการบวมตัว งานวิจัยนี้ใช้ PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (น้ำหนักโมเลกุล 1,300,000 Da) จึงทำให้เกิดการบวมตัวได้มากขึ้น จากปรากฏการณ์นี้จะทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง [24] ดังนั้นเมื่อเติม PVP ในปริมาณมากขึ้น รูพรุนของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจึงมีขนาดเล็กลง [41] เป็นผลให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ลดลง ตามลำดับ และจากตารางที่ 4.2 ยังแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่มีการผสม PVP ในปริมาณมากขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานการแพร่ของเมมเบรนเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ที่ลดลง



เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF7, PSF8 และ PSF9 เป็นกลุ่มที่นำชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF4 ซึ่งมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้มากที่สุด ในกลุ่มของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เติม PVP มาผสมกับ 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์และไตรอะซิติก ตามลำดับ ยกเว้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF9 ซึ่งเป็นสูตรที่นำมาจากเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P6 พบว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF7 และ PSF8 มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF4 แม้ว่า PVP จะทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง แต่ 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์และไตรอะซิติก จะพยายามช่วยให้รูพรุนภายในโครงสร้างเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้โมเลกุลน้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF7 และ PSF8 จึงมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF9 เป็นเมมเบรนที่มีการผสม 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์และ PVP พบว่าค่าสภาพให้ซึมผ่านได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF5 ซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีการผสมสารก่อรูพรุน PVP เพียงอย่างเดียว จากผลการศึกษาในหัวข้อนี้ยังคงแสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งประเภทพลาสติกไซเซอร์มีผลทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น

#### 4.1.3 ผลทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

ลักษณะที่สำคัญของเมมเบรนนอกจากความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนซึ่งทดสอบโดยวิธีการกรองน้ำบริสุทธิ์แล้วยังมีการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของเมมเบรนแสดงในตารางที่ 4.3 การทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลทดสอบภายใต้ความดัน 1 bar อัตราการไหลของสารป้อน 0.01 l/h อุณหภูมิสารละลายประมาณ 22 - 25°C ทำการทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลภายใต้ความดัน 1 bar เพื่อป้องกันให้เกิด การอุดตันในเมมเบรนน้อยที่สุดซึ่งคาดว่าจะทำให้ผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงน้อยที่สุด

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF1, PSF2 และ PSF3 มีความสามารถในการกักกันค่อนข้างมากและจากตารางที่ 4.2 ยังแสดงว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงกลุ่มนี้มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้มากด้วยเช่นกัน ยกเว้นสูตร PSF1 ที่มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้น้อยกว่า เนื่องจากเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF1 มีเพียงพอลิซัลโฟนเท่านั้น ในขณะที่เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF2 และ PSF3 มีสารเติมแต่งผสมอยู่ สมบัติที่เหมือนกันของเมมเบรนทั้ง 3 สูตร คือ มีสมบัติไม่ชอบน้ำเหมือนกัน เมื่อนำไปทดสอบการกักกันสารละลายโปรตีน ได้แก่ สารละลายเปปซินและสารละลาย BSA จึงเกิดการอุดตันได้ง่าย ถ้าอนุภาค โปรตีนมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุน อนุภาค โปรตีนจะเข้าไปอยู่ภายในรูพรุนซึ่งมีส่วนทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมี

ขนาดรูพรุนเล็กลงจึงสามารถกักกันสารได้ดีขึ้น หรือถ้าอนุภาคโปรตีนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุน จะเกิดการอุดตันอนุภาคบนผิวหน้าเมมเบรน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดชั้นอนุภาคโปรตีนบนผิวหน้า เมมเบรนชั้นนี้เสมือนเป็นเมมเบรนอีกชั้นหนึ่งทำหน้าที่ช่วยในการคัดกรองสาร ดังนั้นเมมเบรน ชนิดเส้นใยกลวงจึงสามารถกักกันสารได้ดีขึ้น [10] จากเหตุผลดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงกลุ่มนี้มีความสามารถในการกักกันได้ดี

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการกักกันของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	การกักกัน(%)	
	เปปซิน (MW 35,000 Da)	BSA (MW 67,000 Da)
PSF1	33.63	88.38
PSF2	26.64	83.58
PSF3	71.75	93.24
PSF4	44.09	88.28
PSF5	34.35	89.95
PSF6	37.84	90.41
PSF7	25.97	89.74
PSF8	32.70	93.73
PSF9	35.59	88.49

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF4, PSF5 และ PSF6 พบว่ามีความสามารถในการกักกันเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PVP ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการบวมตัวของ PVP เมื่อเมมเบรนสัมผัสกับน้ำจะทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง ดังนั้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจึงสามารถกักกันสารได้ดีขึ้น การทดลองนี้ช่วยสนับสนุนการทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ที่พบว่าค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ลดลงตามปริมาณ PVP ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็กลง อีกทั้งเมมเบรนกลุ่มนี้มีสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้น จึงไม่ยอมให้อนุภาคโปรตีนผ่านไปได้ ดังนั้นเมื่อนำมาทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลจึงทำให้สามารถกักกันอนุภาคได้ดีขึ้น

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF7, PSF8 และ PSF9 เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงกลุ่มนี้มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้มากและมีความสามารถในการกักกันที่มากด้วยเช่นกันเนื่องจากการเติมสารเติมแต่ง 2 ชนิด ได้แก่ 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์ผสมกับ PVP และ ไตรอะซิติกผสมกับ PVP

จากเหตุผลข้างต้นดังกล่าวไปแล้วจึงทำให้มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้และความสามารถในการกักกันที่ดี

ถ้าการกักกันระดับน้ำหนัก โมเลกุลของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสามารถใช้แทนขนาดรูพรุนของเมมเบรนได้ซึ่งค่านี้หมายถึงความสามารถในการกักกันอนุภาคที่มีน้ำหนักโมเลกุลนั้นได้มากกว่า 90 % การทดลองนี้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF3, PSF6 และ PSF8 สามารถกักกันสารละลาย BSA ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 67,000 Da ได้มากกว่า 90 % ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีค่าการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 67,000 Da ซึ่งเป็นค่าการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชัน

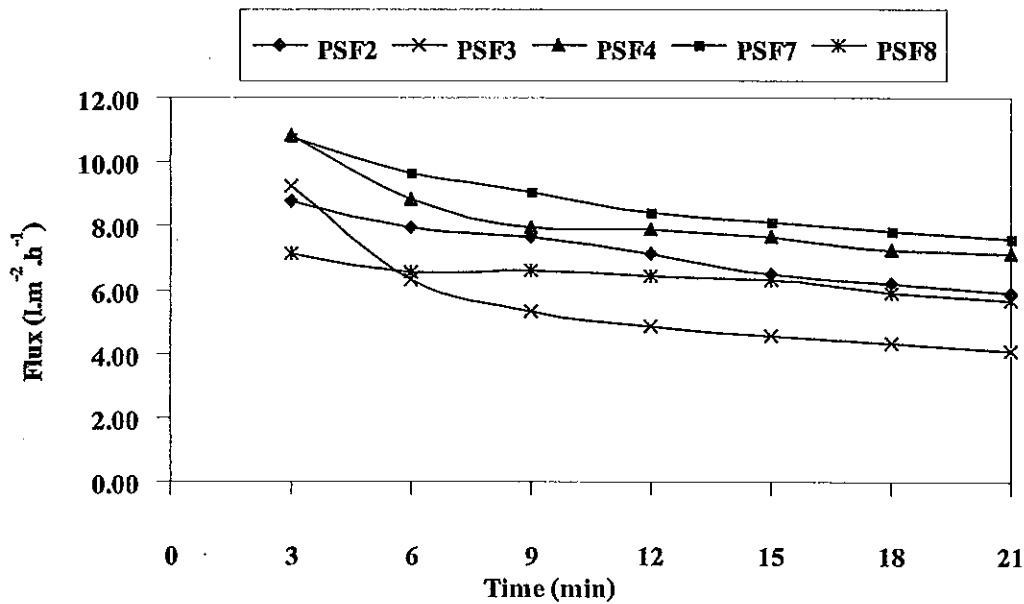
#### 4.1.4 ผลทดสอบการกรองน้ำอ้อยของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

##### 4.1.4.1 ผลประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยเทียบกับเวลาแสดงในรูปที่ 4.1 ทำการทดสอบการกรองน้ำอ้อยภายใต้ความดัน 1 bar อัตราการไหลของสารป้อน 0.1 l/h อุณหภูมิ น้ำอ้อยประมาณ 22-25°C

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 5 สูตร มีค่าประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยใกล้เคียงกัน โดยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF7 มีค่าประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยมากกว่าสูตรอื่นๆเล็กน้อย ยังพบว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่มีการผสมสารก่อก้อน PVP จะทำให้ค่าประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยมีแนวโน้มมากกว่าค่าประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ไม่มีการผสมสารก่อก้อน PVP เล็กน้อย เนื่องจากสารก่อก้อน PVP จะทำให้เมมเบรนมีสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อนำเมมเบรนนี้ไปกรองน้ำอ้อยที่มีสารคอลลอยด์ปะปนอยู่มาก อนุภาคเหล่านี้จะเกิดการอุดตันได้น้อยกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ไม่มีการผสมสารก่อก้อน PVP ดังนั้นจึงทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่มีการผสมสารก่อก้อน PVP มีแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยเพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยเทียบกับเวลาในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยลดลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 6 นาทีแรกและจะลดลงอย่างช้าๆจนมีแนวโน้มคงที่ การลดลงของประสิทธิภาพการกรองน้ำอ้อยเกิดจากปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน เนื่องจากน้ำอ้อยมีของแข็งละลายได้ (soluble solid) ที่ไม่ใช่น้ำตาล เช่น โปรตีน แป้ง ยาง และสารคอลลอยด์อื่นๆสารเหล่านี้จะทำให้เกิดชั้นเจลและเกิดการอุดตันในเมมเบรน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เมมเบรนมีความต้านทาน

การไหลเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ฟลักซ์น้ำอ้อยลดลง [7, 31, 44] พฤติกรรมการลดลงของฟลักซ์น้ำอ้อยแบ่งได้ 2 ระยะ คือ ระยะ แรกฟลักซ์น้ำอ้อยลดลงอย่างรวดเร็วจากนั้นจะลดลงอย่างช้าๆเนื่องจากขณะที่นำเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงไปกรองน้ำอ้อย เมมเบรนจะดูดซับอนุภาคคอลลอยด์และเริ่มมีคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันเกิดขึ้นจะทำให้ระยะนี้มีฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยจะลดลงอย่างรวดเร็วจากนั้นเมื่อเข้าสู่สมดุลฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยจะลดลงช้าๆและมีแนวโน้มคงที่



รูปที่ 4.1 ฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

#### 4.1.4.2 ผลการวิเคราะห์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

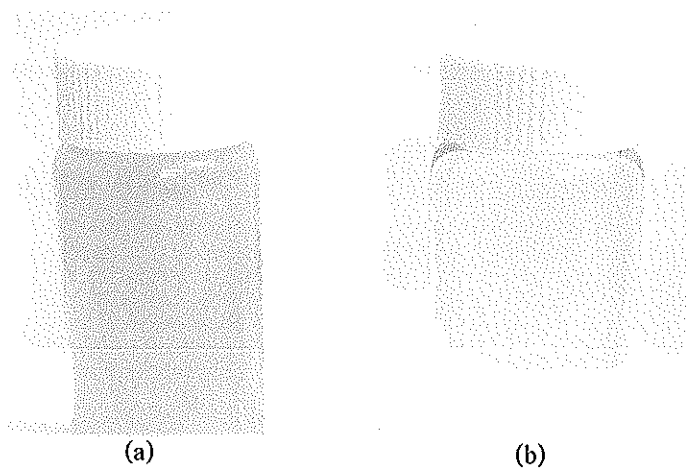
น้ำอ้อยที่จะนำมาผลิตน้ำตาลทรายส่วนใหญ่จะทำการวิเคราะห์ทางด้าน สี ความขุ่นและปริมาณน้ำตาลของน้ำอ้อย [8] ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด สี และความขุ่นของน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงในตารางที่ 4.4 น้ำอ้อยมีของแข็งละลายได้ทั้งหมดหลายชนิดประกอบด้วย น้ำตาล สารอินทรีย์ และสารอื่นที่ไม่ใช่ น้ำตาล จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า สารป้อน (น้ำอ้อยเริ่มต้นที่ใช้ในการกรอง) และเพอมีเอท (น้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรน) ของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 5 สูตรมีปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดใกล้เคียงกัน ในขณะที่สีและความขุ่นมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากของแข็งละลายได้ที่ไม่ใช่ น้ำตาลจะทำให้ น้ำอ้อยขุ่นและมีสีเข้ม เมื่อนำน้ำอ้อยมากรองด้วยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทำ

ให้อนุภาคเหล่านี้ไม่สามารถแพร่ผ่านไปได้ เพราะมีอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นน้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรนจึงมีความเข้มข้นลดลงและมีความใสเพิ่มขึ้นและอนุภาคอื่นที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงได้ทำให้ปริมาณของแข็งละลายได้ในสารป้อนและเพอมีเอทมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด ที และความขุ่นของน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด (°Brix)			ที (absorbance)			ความขุ่น (absorbance)		
	สารป้อน	เพอมีเอท	รีเทนเทท	สารป้อน	เพอมีเอท	รีเทนเทท	สารป้อน	เพอมีเอท	รีเทนเทท
PSF2	17.70	17.20	17.70	1.46	0.02	1.50	65.80	0.20	68.20
PSF3	17.80	17.40	17.70	1.47	0.02	1.49	67.50	0.10	68.90
PSF4	17.70	17.40	17.80	1.46	0.02	1.50	67.70	0.10	69.50
PSF7	17.60	17.40	17.60	1.45	0.02	1.53	65.40	0.10	68.70
PSF8	17.70	17.40	17.70	1.45	0.02	1.61	67.90	0.20	77.70

จากผลการศึกษาฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยและการวิเคราะห์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF7 มีค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยมากที่สุด ในขณะที่ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด ที และความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกับพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรอื่น เมื่อพิจารณาผลการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล แสดงให้เห็นว่า พอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสามารถกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล 67,000 Da ได้ใกล้เคียงกัน จึงคาดว่าน้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงน่าจะมีโมเลกุลของน้ำตาลหลุดออกมาสูงกว่าของแข็งละลายได้ชนิดอื่น เนื่องจากน้ำตาลมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 180.2-342.2 Da ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าระดับน้ำหนักโมเลกุลที่เมมเบรนสามารถกักกันได้ ดังนั้นจึงนำน้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF7 ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลซูโครสซึ่งเป็นชนิดน้ำตาลหลักที่ใช้ในการผลิตน้ำตาลทราย ลักษณะของน้ำอ้อยก่อนกรองและหลังกรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 น้ำอ้อยก่อนกรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (a) น้ำอ้อยหลังกรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (b)

#### 4.1.4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลซูโครส เนื่องจากน้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลที่มีองค์ประกอบมากในน้ำอ้อยมีค่าประมาณ 70 % - 88 % ของของแข็งละลายได้ทั้งหมด และมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสประมาณ 2 % - 4 % และน้ำตาลฟรุกโตสประมาณ 2% - 4 % ของของแข็งละลายได้ทั้งหมด [18] ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	ปริมาณน้ำตาล (g/100 g)		
	สารป้อน	เพอมีเอท	รีเทนเทท
PSF7	14.60	14.51	14.61

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารป้อนและเพอมีเอทมีปริมาณน้ำตาลซูโครสใกล้เคียงกันสอดคล้องกับตารางที่ 4.4 ที่แสดงว่าสารป้อนและเพอมีเอทมีปริมาณของแข็งละลายได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าน้ำอ้อยสดเริ่มต้นและน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีความหวานใกล้เคียงกันเนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลซูโครสใกล้เคียงกัน

#### 4.1.5 ผลการทดสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์

สารละลายพอลิเมอร์เป็นของไหลแบบนอนนิวทอนเนียน (non - newtonian fluid) และมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic fluid) คือ สารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดลดลงเมื่ออัตราเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น การแปรรูปพลาสติกที่มีความจำเป็นต้องศึกษาความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เนื่องจากความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์มีผลต่อกระบวนการแปรรูปและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ความหนืดของสารละลายพอลิซัลโฟนแสดงในตารางที่ 4.6 จากการศึกษาพบว่าความหนืดที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงในโครงการวิจัยนี้ ควรมีค่าไม่เกิน 4,800 mPa.s ถ้าสารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดมากกว่าที่กำหนดจะทำให้สารละลายพอลิเมอร์มีฟองอากาศเกิดขึ้นมากเป็นผลทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีผิวขรุขระไม่เรียบเนียนและยังทำให้เมมเบรนเกิดการแตกหักหรือฉีกขาดได้ระหว่างกระบวนการผลิตเมมเบรนนอกจากนั้นยังทำให้สารละลายพอลิเมอร์เกิดการอุดตันภายในหัวสปินเนอร์ได้ง่าย

ตารางที่ 4.6 ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดแผ่นและชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	ความหนืด (mPa.s)
P1	1,014
P2	1,385
P3	2,858
P4	2,345
P5	2,860
P6	2,917
PSF1	998
PSF2	1,274
PSF3	1,013
PSF4	1,331
PSF5	2,098
PSF6	4,858
PSF7	1,628
PSF8	1,642
PSF9	2,925

#### 4.1.6 ผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

การศึกษาความแข็งแรงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยทำการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.7 จากตารางแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 9 สูตร มีค่าความเค้น ณ จุดขาดแตกต่างกันเล็กน้อยในขณะที่ค่าความเครียด ณ จุดขาดแตกต่างกันมากขึ้นแต่ยังอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน (35 % - 60%) นอกจากนี้ยังพบว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF2 และ PSF3 มีสมบัติความทนแรงดึงมากกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรอื่นๆเล็กน้อย การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจะแสดงในหัวข้อต่อไปดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าบริเวณชั้นนอกของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 2 สูตร มีความหนาแน่นของโครงสร้างรูพรุนแบบทรงกระบอกน้อยกว่าทำให้บริเวณนี้มีความพรุนตัวน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรอื่นจึงสามารถรับแรงดึงได้มากขึ้นเล็กน้อย [24] เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง 2 สูตรดังกล่าว มีการเติม 1, 2 - โพลีเพนไดออกไซด์และไตรอะซิทีน นอกจากช่วยให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้และความสามารถในการกักเก็บเพิ่มขึ้นแล้วยังช่วยให้สมบัติความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยด้วย

ตารางที่ 4.7 สมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	ความเค้น ณ จุดขาด (MPa)	ความเครียด ณ จุดขาด (%)
PSF1	4.05 ± 0.27	43.25 ± 2.57
PSF2	5.28 ± 0.15	56.96 ± 3.21
PSF3	4.59 ± 0.25	61.86 ± 5.401
PSF4	3.53 ± 0.38	35.55 ± 2.27
PSF5	4.05 ± 0.38	47.11 ± 4.95
PSF6	4.49 ± 0.26	55.58 ± 4.35
PSF7	3.97 ± 0.23	52.78 ± 3.85
PSF8	3.12 ± 0.13	48.22 ± 2.06
PSF9	4.17 ± 0.27	57.86 ± 3.26

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF4, PSF5 และ PSF6 ศึกษาอิทธิพลปริมาณ PVP ต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อปริมาณ PVP เพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่มีเพียงเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF6 เท่านั้น ที่มี

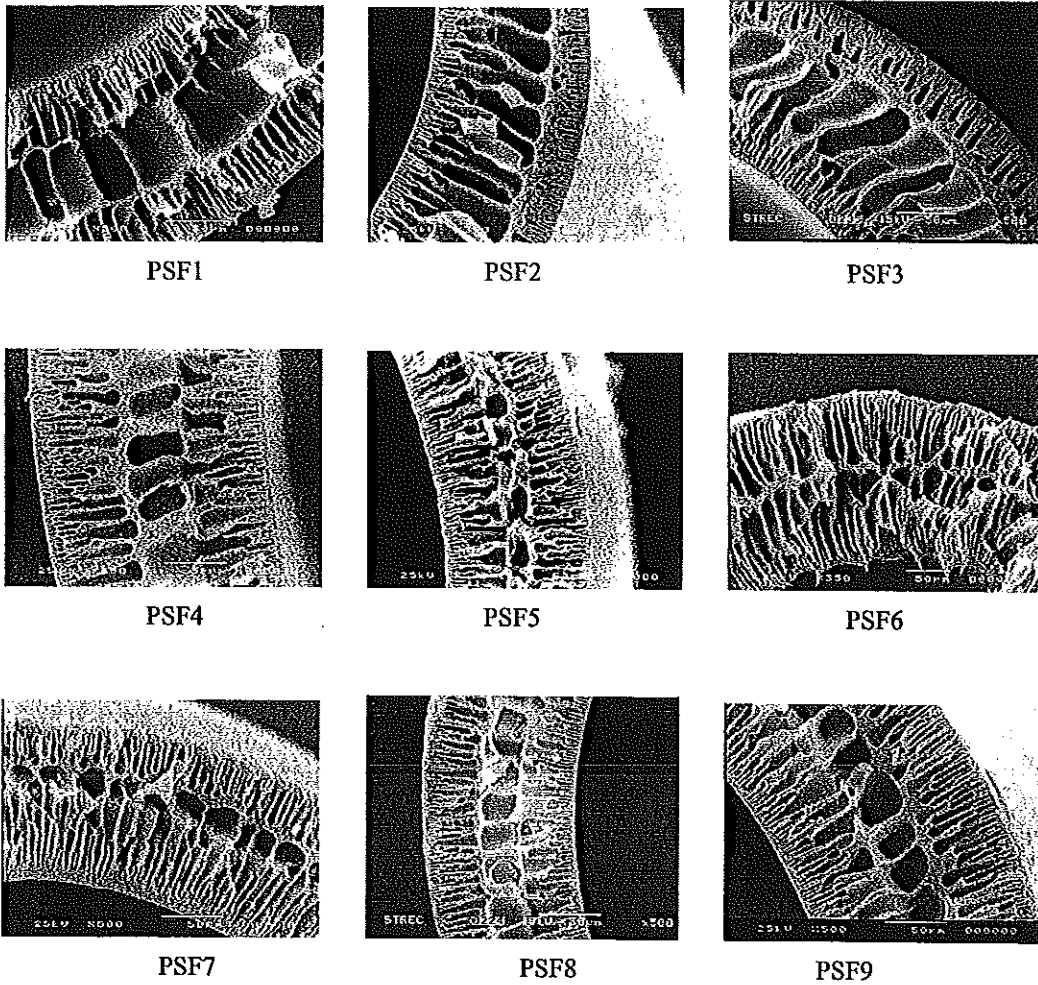


สมบัติความทนต่อแรงดึงมากกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF1 ที่มีพอลิซัลโฟนเพียงอย่างเดียว PVP เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับพอลิซัลโฟน [19] ถ้าผสมแล้วทำให้มีสมบัติดีขึ้นเรียกว่า compatible blend เช่น เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF6 จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ PVP เพิ่มขึ้น (PSF4, PSF5 และ PSF6 ตามลำดับ) รูพรุนขนาดใหญ่บริเวณตรงกลางมีขนาดเล็กลงและหายไปในที่สุดทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยสามารถรับแรงดึงได้มากขึ้นเนื่องจากความพรุนตัวที่ลดลง

#### 4.1.7 ผลการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

การศึกษาพื้นฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงให้ข้อมูลที่สำคัญข้อมูลหนึ่งทำให้สามารถมองเห็น โครงสร้างของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงได้ชัดเจนขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.3 ภาพจากกล้อง SEM แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 9 สูตร มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร (asymmetric) ภาพภาคตัดขวางของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนมีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ตรงกลางระหว่างชั้นรูพรุนแบบทรงกระบอก สาเหตุที่ทำให้โครงสร้างของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีลักษณะเช่นนี้เนื่องจากอัตราการแข็งตัวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ช้ากว่า สารละลายพอลิเมอร์เมื่อผ่านหัวสปินเนอร์บริเวณภายในเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่สัมผัสกับสารที่ทำให้เมมเบรนแข็งตัวภายในจะเกิดการแยกเฟสอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงลงในอ่างแยกเฟส บริเวณภายนอกจะเกิดการแยกเฟสอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกันจึงเกิดโครงสร้างรูพรุนแบบทรงกระบอกบริเวณภายในและภายนอกเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง อัตราการแข็งตัวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงลดลงจากผิวเข้าสู่ตรงกลางของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง ดังนั้นบริเวณตรงกลางจึงมีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ [23, 45] นอกจากนั้นการแข็งตัวอย่างรวดเร็วบริเวณภายในเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทำให้มีชั้นรูพรุนแบบแน่นเกิดขึ้น [21] ซึ่งใช้ในการคัดกรองสารผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF4, PSF5 และ PSF6 ใช้ศึกษาอิทธิพลปริมาณ PVP จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่ารูพรุนขนาดใหญ่บริเวณตรงกลางมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF1, PSF2 และ PSF3 การเติม PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงอีกทั้ง PVP ยังช่วยให้การเชื่อมต่อกันของโครงสร้างรูพรุน (pore interconnect) ดีขึ้น [42, 46]



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของพอลิซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจากกล้อง SEM

#### 4.1.8 ผลการหาขนาดรูพรุนและความพรุนตัวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยการใช้พรอท

ผลการหาขนาดรูพรุนและความพรุนตัวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยการใช้พรอทแสดงในตารางที่ 4.8 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 6 สูตรมีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกันแต่มีความพรุนตัวแตกต่างกัน จากผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลยืนยันผลการทดลองข้างต้นที่พบว่า เมมเบรนที่เติมสารก่อรูพรุนจะทำให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการกักกันใกล้เคียงกันเนื่องจากสารเติมแต่งที่ผสมในสารละลายพอลิเมอร์จะช่วยให้เมมเบรนมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อขนาดรูพรุนของเมมเบรนขนาดรูพรุน

และความพรุนตัวของเมมเบรนที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้เป็นลักษณะของทั้งชั้นทดสอบไม่ใช่เฉพาะเพียงผิวหน้าของเมมเบรน

ตารางที่ 4.8 ขนาดรูพรุนและความพรุนตัวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	ขนาดรูพรุน ( $\mu\text{m}$ )	ความพรุนตัว (%)
PSF1	0.17	63.09
PSF2	0.13	63.09
PSF3	0.12	74.81
PSF4	0.10	84.44
PSF7	0.12	83.28
PSF8	0.14	64.63

จากการทดสอบประสิทธิภาพและสมบัติของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสามารถสรุปภาพรวมทั้งหมดได้ว่า อิทธิพลของสารเติมแต่งมีผลต่อโครงสร้างของเมมเบรนได้ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะเฉพาะของเมมเบรน เช่น ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ สภาพให้ซึมผ่านได้ การกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของเมมเบรน สัณฐานวิทยาและสมบัติความทนต่อแรงดึง สารเติมแต่ง 1, 2 - โพรเพนไดคอล ไตรอะซิติก และ PVP จะช่วยปรับปรุงให้เมมเบรนมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้นแต่ในขณะเดียวกันจะไม่มีผลมากต่อความสามารถในการกักกัน นอกจากนี้ PVP ที่ผสมในเมมเบรนจะช่วยปรับปรุงให้เมมเบรนมีสมบัติความชอบน้ำเพิ่มขึ้น แต่เมมเบรนที่ผสม PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะทำให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ลดลงตามความเข้มข้นของ PVP ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเมมเบรนที่สัมผัสกับน้ำจะทำให้ PVP ที่อยู่ในเมมเบรนเกิดการบวมตัวเป็นผลทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงแต่ทำให้ความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น

พอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่นำมาประยุกต์ใช้ในการกรองน้ำอ้อยจะมีปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพราไรเซชัน เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำอ้อยจะทำให้เกิดการอุดตันภายในเมมเบรนเป็นสาเหตุให้ค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาในการกรองเพิ่มขึ้น

## 4.2 พอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรน

### 4.2.1 ผลการทดสอบฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่น

#### 4.2.1.1 การแปรชนิดและปริมาณสารเติมแต่ง 1, 2 - โพรเพนไดออลและไตรอะซิติก

ผลการศึกษาฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นแสดงในตารางที่ 4.9 ทำการทดสอบภายใต้ความดัน 1 bar อัตราการไหลของสารป้อน 0.15 l/h อุณหภูมิน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 22 - 25 °C

ตารางที่ 4.9 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นแปรชนิดและปริมาณสารเติมแต่ง 1, 2 - โพรเพนไดออลและไตรอะซิติก

สูตร	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ (l.m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup> )
E1	103.33
E2	194.18
E3	347.03
E4	263.01
E5	354.82
E6	471.81

เมมเบรนสูตร E1 - E3 ผสม 1, 2 - โพรเพนไดออล เมมเบรนสูตร E4 - E6 ผสมไตรอะซิติก สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดเป็นสารเติมแต่งประเภทพลาสติกไซเซอร์ เมมเบรนทั้ง 2 กลุ่มมีปริมาณสารเติมแต่ง 2 %, 4 % และ 6% ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่มีการผสมสารเติมแต่งเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นซึ่งสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ระหว่างการผลิตเมมเบรนโดยใช้วิธีการเปลี่ยนเฟสในขั้นตอนของการทำให้เมมเบรนแข็งตัว การผสมสารเติมแต่งที่มีลักษณะไม่ใช่ตัวทำละลายจะทำให้เมมเบรนเกิดการแยกเฟสอย่างรวดเร็วเป็นผลให้โครงสร้างเมมเบรนมีชั้นผิวที่บางมากและมีชั้นรูพรุนด้านล่างขนาดใหญ่ การเติมสารเติมแต่งนอกจากจะทำให้เมมเบรนมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นแล้วยังทำให้เมมเบรนมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นด้วย [17, 38] ถ้ามีการเติมสารเติมแต่งในปริมาณเพิ่มขึ้นยิ่งทำให้อัตราการแข็งตัวของเมมเบรนเร็วขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบสารเติมแต่ง 2 ชนิด พบว่าการเติมไตรอะซิติกมีความเหมาะสม

กับระบบมากกว่าการเติม 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์ เนื่องจากไตรอะซิติกมีน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า อาจทำให้เมมเบรนมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น ดังนั้นเมมเบรนที่ผสม ไตรอะซิติกจึงมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากกว่าเมมเบรนที่ผสม 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์ จากผลการศึกษาในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่า สารเติมแต่งประเภทพลาสติกไซเซอร์มีผลทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

#### 4.2.1.2 การแปรน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณสารก่อรูพรุนกลุ่ม PEG และ PVP

ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นที่ผสมสารก่อรูพรุน PEG และ PVP แสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11 ทำการทดสอบภายใต้ความดัน 1 bar อัตราการไหลของสารป้อน 0.15 l/h อุณหภูมิน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 22 - 25 °C

สารก่อรูพรุน PVP และ PEG เป็นสารเติมแต่งพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการผลิตเมมเบรน สารทั้ง 2 ชนิดเป็นที่ยอมรับว่าไม่เป็นอันตราย (non toxic) ต่อสิ่งมีชีวิต [39] อีกทั้งยังสามารถเข้ากันได้ดีกับวัสดุที่นำมาผลิตเมมเบรนหลายชนิด สารทั้ง 2 ชนิดมีสมบัติชอบน้ำจึงทำให้สามารถละลายน้ำได้ดี จากงานวิจัย [41] ยังแสดงให้เห็นว่าสารก่อรูพรุนนี้จะทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนภายในเมมเบรนด้วย จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของสารก่อรูพรุนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น ยกเว้นเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร E13 และ E14 ที่พบว่าเมื่อปริมาณ PVP เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าระหว่างกระบวนการผลิตเมมเบรน โดยอาศัยหลักการของกระบวนการเปลี่ยนเฟส สารก่อรูพรุน PVP และ PEG ที่มีสมบัติชอบน้ำจะละลายออกไปบางส่วนและบางส่วนยังคงหลงเหลืออยู่ในเมมเบรน บริเวณที่สารก่อรูพรุนละลายออกไปจะทำให้บริเวณนั้นมีรูพรุนเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของสารก่อรูพรุนเพิ่มขึ้นจึงทำให้เมมเบรนมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้น การเชื่อมต่อกันของรูพรุนดีขึ้น และยังช่วยปรับปรุงสมบัติของผิวเมมเบรนให้ดีขึ้น [47] เป็นสาเหตุให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้นเมมเบรนจึงมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น ในกรณีของเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร E13 และ E14 ที่พบว่าไม่เป็นไปตามแนวโน้มข้างต้น เนื่องจากสารก่อรูพรุนมีน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณมากเพียงพอที่จะไปยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ ขณะนำเมมเบรนไปทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ เมื่อเมมเบรนสัมผัสกับน้ำจะทำให้สารก่อรูพรุนที่อยู่ภายในเมมเบรนเกิดการบวมตัว ดังนั้นสารก่อรูพรุนที่มีน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณมากจะเกิดการบวมตัวมากด้วยเช่นกัน จึงทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง [24, 25, 41] จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า PVP และ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากัน PEG จะเป็นก่อรูพรุนที่เหมาะสมกับระบบมากกว่า PVP เนื่องจากมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากกว่า จากผลการศึกษาเบื้องต้นของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นแสดงให้เห็น

ว่าสารเติมแต่ง ไตรอะซีดีน, PEG น้ำหนัก โมเลกุล 10,000 Da และ PVP (K30) ทำให้เมมเบรนมีค่า ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากที่สุด

ตารางที่ 4.10 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอทีเทอร์ซัล โฟนเมมเบรนชนิดแผ่นแปรน้ำหนัก โมเลกุลและ ปริมาณสารก่อรูพรุนกลุ่ม PEG

สูตร	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ ( $l.m^{-2}.h^{-1}$ )	
	2% PEG	5% PEG
E7	-	-
E8	-	5.61
E9	104.89	200.42
E10	185.60	276.65

หมายเหตุ: “-” หมายความว่า ที่ความดัน 1 บาร์ น้ำบริสุทธิ์ไม่สามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้

ตารางที่ 4.11 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอทีเทอร์ซัล โฟนเมมเบรนชนิดแผ่นแปรน้ำหนัก โมเลกุลและ ปริมาณสารก่อรูพรุนกลุ่ม PVP

สูตร	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ ( $l.m^{-2}.h^{-1}$ )	
	2% PVP	5% PVP
E11	49.91	255.79
E12	163.38	290.10
E13	140.76	111.91
E14	233.18	194.77

#### 4.2.2 ผลการทดสอบฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอทีเทอร์ซัล โฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

##### 4.2.2.1 การแปรปริมาณพอลิเอทีเทอร์ซัล โฟนและปริมาณสารเติมแต่ง ไตรอะซีดีน

พอลิเอทีเทอร์ซัล โฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเตรียมโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนเฟส เช่นเดียวกับพอลิซัล โฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง ศึกษาประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใย กลวงโดยทำการทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์เพื่อศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่แพร่ผ่านเมมเบรน ชนิดเส้นใยกลวงสูตรต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.12 พอลิเอทีเทอร์ซัล โฟนมีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณ

230°C และมีสมบัติไม่ชอบน้ำเช่นเดียวกับพอลิซัลโฟเนอเมมเบรน ทำการทดสอบภายใต้ความดัน 1, 2 และ 3 bar อัตราการไหล 0.1, 0.02, 0.02 l/h ตามลำดับ อุณหภูมิน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 22 - 25 °C

ตารางที่ 4.12 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรปริมาณพอลิอีเทอร์ซัลโฟนและปริมาณสารก่อรูพรุนไตรอะซิติก

สูตร	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ ( $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ )			สภาพให้ซึมผ่านได้ ( $\text{l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$ )	ความต้านทานการแพร่ ของเมมเบรน ( $\text{m}^{-1}$ )
	1 บาร์	2 บาร์	3 บาร์		
PES1	85.45	185.57	-	92.79	0.01
PES2	107.81	235.22	364.90	122.21	$8.18 \times 10^{-3}$
PES3	324.64	642.79	979.33	325.61	$3.07 \times 10^{-3}$
PES4	338.62	634.35	1002.31	333.88	$3.00 \times 10^{-3}$
PES5	120.85	228.89	323.83	107.95	$9.26 \times 10^{-3}$
PES6	297.52	543.64	861.95	283.20	$3.53 \times 10^{-3}$

หมายเหตุ: “ - ” ไม่สามารถทำการทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ได้เนื่องจากเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเกิดการแตกหัก

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES3, PES4, PES5 และ PES6 ใช้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณพอลิอีเทอร์ซัลโฟนที่มีต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ โดยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES3 และ PES4 มีปริมาณของพอลิอีเทอร์ซัลโฟน 19 % ในขณะที่เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5 และ PES6 มีปริมาณของพอลิอีเทอร์ซัลโฟน 21% จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES3 และ PES4 ซึ่งเป็นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรที่มีปริมาณพอลิเมอร์น้อยกว่าจะมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้มากกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5 และ PES6 เนื่องจากเมมเบรนที่มีปริมาณของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความพรุนตัวของเมมเบรนลดลงเป็นสาเหตุทำให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ลดลงด้วย [48]

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 - PES6 ใช้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณของสารเติมแต่งไตรอะซิติกที่มีต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ โดยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1, PES3 และ PES5 มีปริมาณไตรอะซิติก 2 % และเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES2, PES4 และ PES6 มีปริมาณไตรอะซิติก 10 % จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรที่มีปริมาณสารเติมแต่งไตรอะซิติกมากจะมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้มากกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรที่มีปริมาณไตรอะซิติกน้อย การเติมไตรอะซิติกสามารถควบคุมโครงสร้างของเมมเบรนได้

อย่างไร ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.2.1.1 จากสาเหตุข้างต้นจึงทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสุตรที่มีปริมาณไตรอะซิติกมากมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้มากขึ้น นอกจากนั้นค่าความต้านทานการแพร่ของเมมเบรนในตารางที่ 4.12 ยังแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่มี ค่าความต้านทานการแพร่เพิ่มขึ้นจะมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ลดลง จากผลการศึกษาในหัวข้อนี้แสดง ให้เห็นว่าสารเติมแต่งประเภทพลาสติกไซเซอร์มีผลทำให้ความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้น

#### 4.2.2.2 การแปรชนิดสารก่อรูพรุน PEG และ PVP

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนมีหลายสาเหตุ นอกจากปริมาณของพอลิเมอร์และสารเติมแต่งแล้ว ชนิดของสารเติมแต่งก็มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่มีการเติมสารก่อรูพรุน PEG และ PVP แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรชนิดสารก่อรูพรุน

สูตร	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ ( $l.m^{-2}.h^{-1}$ )			สภาพให้ซึมผ่านได้ ( $l.m^{-2}.h^{-1}.bar^{-1}$ )	ความต้านทานการแพร่ ของเมมเบรน ( $m^{-1}$ )
	1 บาร์	2 บาร์	3 บาร์		
PES5	120.85	228.89	323.83	107.95	$9.26 \times 10^{-3}$
PES7	34.31	74.94	106.51	36.02	0.03

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5 และ PES7 ใช้ศึกษาอิทธิพลชนิดสารก่อรูพรุนที่มีต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ โดยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5 เติมสารก่อรูพรุน PEG น้ำหนัก โมเลกุล 10,000 Da และเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES7 เติมสารก่อรูพรุน PVP(K30) น้ำหนัก โมเลกุล 40,000 Da จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5 มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้มากกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES7 มาก อาจเป็นไปได้หลายสาเหตุ เช่น สารก่อรูพรุน PEG ที่เติมลงไปอาจทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น หรือสารก่อรูพรุน PVP ที่เติมลงไปอาจทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง เนื่องจาก PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะไปยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ [41] นอกจากการทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์แล้ว ยังมีการทดสอบสมบัติของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้านอื่นๆอีก ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลขึ้นชั้นผลการทดลองได้



#### 4.2.3 ผลทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักรวมของพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

##### 4.2.3.1 การแปรปริมาณพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟเนอและปริมาณสารก่อรูพรุนไตรอะซิติก

ศึกษาประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักรวมของพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการกักกันของพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรปริมาณพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟเนอและปริมาณสารก่อรูพรุน

สูตร	การกักกัน(%)	
	เปปซิน	BSA
PES1	44.21	83.20
PES2	68.78	98.12
PES3	37.23	90.13
PES4	43.80	90.87
PES5	41.14	92.08
PES6	34.44	90.46

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES3-PES6 มีการเติมสารเติมแต่ง 2 ชนิด เข้าด้วยกันระหว่างไตรอะซิติกและ PEG โดยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES3 และ PES4 มีปริมาณพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟเนอ 19 % และมีปริมาณไตรอะซิติก 2 % และ 10 % ตามลำดับ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5 และ PES6 มีปริมาณพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟเนอ 21 % และมีปริมาณไตรอะซิติก 2 % และ 10 % ตามลำดับ เช่นเดียวกัน เมมเบรนทั้ง 4 สูตรผสมกับสารก่อรูพรุน PEG ปริมาณ 5 % จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 4 สูตร มีความสามารถในการกักกันใกล้เคียงกันแม้มีปริมาณของพอลิเอทีเธอร์ซัลโฟเนอและปริมาณของสารเติมแต่งไตรอะซิติกแตกต่างกัน นั่นหมายถึงเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 4 สูตร สามารถกักกันอนุภาคที่มีระดับน้ำหนักรวมใกล้เคียงกันได้ ดังนั้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 4 สูตรน่าจะมีรูพรุนขนาดใกล้เคียงกัน จากการศึกษาประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง ได้แก่ ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ สภาพให้ซึมผ่านได้และการกักกันระดับน้ำหนักรวม พบว่าสภาพให้ซึมผ่านได้ที่แพร่ผ่านเมมเบรนไม่เพียง

สัมพันธ์กับขนาดของรูพรุนภายในเมมเบรนเท่านั้น แต่ยังสัมพันธ์กับความพรุนตัวของเมมเบรนด้วย ในขณะที่ความสามารถในการกักกันจะสัมพันธ์กับขนาดของรูพรุน ดังนั้นแม้ว่าสภาพให้ซึมผ่านได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่จำเป็นว่าเมมเบรนต้องมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นแต่เมมเบรนอาจมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นก็ได้

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 และ PES2 มีเพียงปริมาณของไตรอะซิติกที่แตกต่างกันเท่านั้น โดยมีปริมาณ 2 % และ 10 % ตามลำดับ จากตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณของสารก่อรูพรุนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการกักกันเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณไตรอะซิติกที่มากขึ้นมีผลทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นดังได้กล่าวแล้วข้างต้น อีกทั้งพอลิอีเทอร์ซัลโฟนมีสมบัติไม่ชอบน้ำเมื่อนำไปกรองสารละลายโปรตีนทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันได้ง่าย การอุดตันที่เกิดขึ้นมีผลทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงเนื่องจากอนุภาคโปรตีนที่ถูกดูดซับจะเกาะที่บริเวณภายในรูพรุนและบริเวณผิวหน้ารูพรุน จากปรากฏการณ์นี้ทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีความสามารถกักกันสารได้ดีขึ้น

#### 4.2.3.2 การแปรชนิดสารก่อรูพรุน PEG และ PVP

การกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่แปรชนิดสารก่อรูพรุน PEG และ PVP แสดงในตารางที่ 4.15 เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5 และ PES7 ใช้ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งที่มีต่อการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5 และ PES7 เติมสารก่อรูพรุน PEG และ PVP ตามลำดับ จากตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 2 สูตรมีความสามารถในการกักกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายถึงเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 2 สูตรสามารถกักกันอนุภาคที่มีระดับน้ำหนักโมเลกุลเดียวกันได้ ดังนั้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 2 สูตรน่าจะมีรูพรุนขนาดใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองในตารางที่ 4.13 และ 4.15 ศึกษาชนิดของสารก่อรูพรุน PEG และ PVP ที่มีต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง ได้แก่ ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ สภาพให้ซึมผ่านได้ และการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล สามารถสรุปได้ว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เติมสารก่อรูพรุน PEG จะทำให้เมมเบรนมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้มากขึ้น ในขณะที่สารก่อรูพรุนทั้ง 2 ชนิดทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีรูพรุนขนาดใกล้เคียงกัน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัย [49] ที่พบว่าพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เติมสารก่อรูพรุน PEG จะทำให้เมมเบรนมีโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไมโครฟิลเตรชันมากกว่าจึงทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงนี้มีสมบัติที่ดีกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่เติมสารก่อรูพรุน PVP จากตารางที่ 4.14 และ 4.15 เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES2 -

PES7 สามารถกักกันสารละลาย BSA ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 67,000 Da ได้มากกว่า 90% ดังนั้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 6 สูตร มีการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 67,000 Da ยกเว้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 ไม่สามารถกักกันสารละลาย BSA ได้ถึง 90 % จึงไม่ถือว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรนี้มีการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล 67,000 Da

ตารางที่ 4.15 ความสามารถในการกักกันของพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรชนิดสารก่อรูพรุน PEG และ PVP

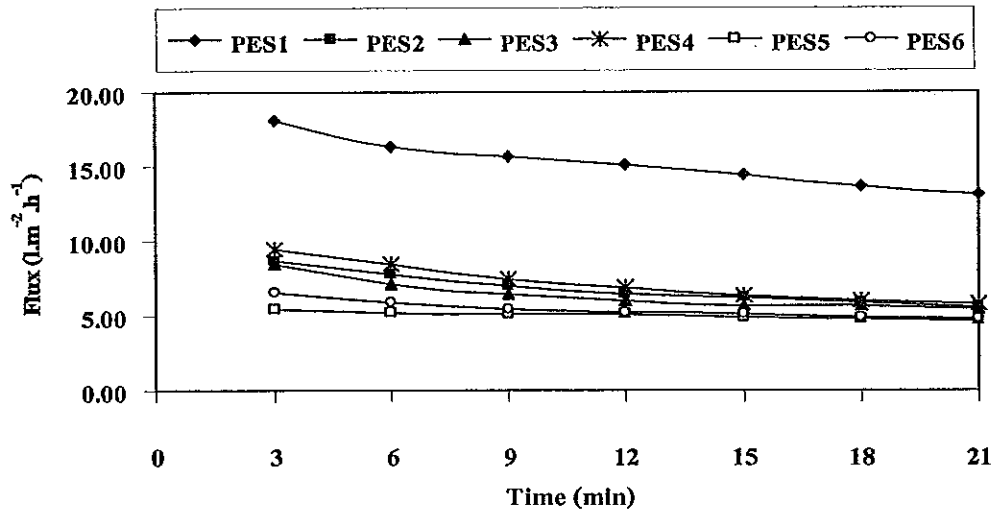
สูตร	การกักกัน(%)	
	เปปซิน	BSA
PES5	41.14	92.08
PES7	38.35	93.31

#### 4.2.4 ผลทดสอบการกรองน้ำอ้อยของพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

##### 4.2.4.1 ผลฟลักซ์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเมมเบรนที่ผลิตขึ้น โดยนำไปประยุกต์ใช้ในการกรองน้ำอ้อย ฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยแสดงในรูปที่ 4.3 จากผลทดสอบการกรองน้ำอ้อยแสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 6 สูตรมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 6 นาทีแรก จากนั้นค่าฟลักซ์จะลดลงช้าๆจนมีแนวโน้มคงที่ สาเหตุที่เกิดปรากฏการณ์ลักษณะนี้ขึ้นได้กล่าวแล้วในหัวข้อการใช้พอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงกรองน้ำอ้อย น้ำอ้อยมีของแข็งละลายได้และอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆปะปนอยู่ ขณะที่ทำการทดสอบการกรองน้ำอ้อย เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจะดูดซับอนุภาคต่างๆเหล่านี้ อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนจะเกิดการดูดซับบริเวณภายในรูพรุนในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนจะเกิดการดูดซับบริเวณผิวหน้าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง [10] ทำให้เมมเบรนมีความต้านทานการแพร่ผ่านมากขึ้น ดังนั้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจึงมีค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยลดลงเมื่อเทียบกับฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ที่ได้จากการทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 และ PES2 เติบโตอะซิติกเพียงอย่างเดียว ส่วนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES3 - PES6 เติบโตอะซิติกพร้อมกับสารก่อรูพรุน PEG เพื่อคาดหวังว่าสารก่อรูพรุน PEG ที่เติมไปจะช่วยปรับปรุงให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อนำเมม

เบรณไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับทางด้านชีวภาพจะช่วยลดการอุดตันที่จะเกิดแก่เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงซึ่งจะทำให้ค่าฟลักซ์ไม่ลดลงมากนัก [28] จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารก่อรูปรูพรุน PEG ที่เติมลงไปไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อย



รูปที่ 4.4 ฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยของพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

การทดสอบการกรองน้ำอ้อยสามารถประมาณค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยได้ 2 ช่วง ได้แก่ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES2 - PES6 มีค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยใกล้เคียงกัน มีค่าประมาณ  $5 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ส่วนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 มีค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยมากกว่ากลุ่มแรกอย่างชัดเจน มีค่าประมาณ  $15 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$

#### 4.2.4.2 ผลการวิเคราะห์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใย

กลวง

คุณภาพของน้ำอ้อยที่ใช้ในการผลิตน้ำตาลทรายจะพิจารณาจากสมบัติต่อไปนี้ ผลการวิเคราะห์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงในตารางที่ 4.16

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายได้แสดงให้เห็นว่าสารป้อนและเพอมีเอท มีปริมาณของแข็งละลายได้ใกล้เคียงกัน ของแข็งละลายได้ที่มีอยู่ในน้ำอ้อยมีหลายชนิด เช่น น้ำตาล 75 % - 79 % เกลือ 3 % - 7.5 % สารอื่นที่ไม่ใช่น้ำตาล 3.8 % - 6.5 % กรดอินทรีย์อิสระ 0.5 % - 2.5 % และสารอื่นที่ไม่ทราบแน่ชัด 3 % - 5 % [18] การวิเคราะห์สีและความขุ่นของน้ำอ้อยแสดงให้เห็นว่าสารป้อนและเพอมีเอทมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเพอมีเอทมีค่าลดลงเมื่อ

เปรียบเทียบกับสารป้อนซึ่งหมายความว่าน้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจะมีสีจางลง และมีความใสเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.16 วิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด สี และความขุ่นของน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	ปริมาณของแข็งละลายได้ (°Brix)			สี (absorbance)			ความขุ่น (absorbance)		
	สาร ป้อน	เพอ มิเอท	รีเทน เทท	สาร ป้อน	เพอ มิเอท	รีเทน เทท	สาร ป้อน	เพอ มิเอท	รีเทน เทท
PES1	15.00	14.81	14.90	1.09	0.01	1.14	45.90	0.00	48.05
PES2	13.90	13.50	13.80	1.11	0.01	1.14	47.30	0.10	48.80
PES3	15.00	14.70	14.90	1.10	0.01	1.18	52.50	0.05	57.45
PES4	14.70	14.30	14.60	1.20	0.01	1.25	52.40	0.15	55.65
PES5	12.10	11.95	12.20	1.09	0.01	1.21	43.78	0.10	49.67
PES6	14.80	14.50	14.70	1.21	0.01	1.23	55.35	0.10	56.00

จากผลการทดลองเกี่ยวกับฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยและการวิเคราะห์น้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 มีค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยมากที่สุดแต่ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด สี และความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกับเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรอื่นๆที่ใช้ในการทดสอบการกรองน้ำอ้อย อีกทั้งจากผลการทดลองในหัวข้อการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลแสดงให้เห็นว่าพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสามารถกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล 67,000 Da ได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงคาดว่าน้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงน่าจะมีโมเลกุลของน้ำตาลหลุดออกมามากกว่าของแข็งละลายได้ชนิดอื่น เนื่องจากน้ำตาลมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 180.2 - 342.2 Da ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าระดับน้ำหนักโมเลกุลที่เมมเบรนสามารถกักกันได้จึงนำเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลซูโครส

#### 4.2.4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอเทอร์ซัลโฟเนมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยวิธีการต่างๆแสดงในตารางที่ 4.17 ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทรายส่วนใหญ่จะวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลซูโครสที่มีในน้ำอ้อยเนื่องจากในน้ำอ้อยมีปริมาณน้ำตาลซูโครส 70 % - 88 % น้ำตาลกลูโคส 2 % - 4 % และน้ำตาลฟรุกโตส 2 % - 4 % [18] เห็นได้ชัดเจนว่าน้ำอ้อยมีน้ำตาลซูโครสเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลจึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลซูโครสเป็นหลัก จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารป้อน และเพอมีเอทมีปริมาณน้ำตาลซูโครสใกล้เคียงกันซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 4.16 เกี่ยวกับการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าน้ำอ้อยเริ่มต้นและน้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีปริมาณน้ำตาลซูโครสใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.17 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำอ้อยที่กรองผ่านพอลิเอเทอร์ซัลโฟเนมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	ปริมาณน้ำตาล (g/100 g)		
	สารป้อน	เพอมีเอท	รีเทนเทท
PESI	14.63	14.63	14.61

#### 4.2.5 ผลการทดสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์

ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเอเทอร์ซัลโฟเนมเบรนชนิดแผ่นและชนิดเส้นใยกลวงแสดงในตารางที่ 4.18 - 4.21 กระบวนการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีความจำเป็นต้องทำการตรวจสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ เนื่องจากความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความยาก - ง่ายของกระบวนการผลิตและยังมีผลต่อคุณภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วย งานวิจัยนี้ศึกษาชนิดและปริมาณของสารก่อรูพรุนจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าสารละลายพอลิเมอร์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของสารก่อรูพรุนเพิ่มขึ้น ทำการขึ้นรูปพอลิเอเทอร์ซัลโฟเนมเบรนชนิดเส้นใยกลวงพบว่าความหนืดที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงภายใต้สภาวะที่กำหนดมีค่าไม่เกิน 4,800 mPa.s ถ้าสารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดมากกว่าค่าที่กำหนดจะทำให้ขณะขึ้นรูปเมม

เบรนนชนิดเส้นใยกลวงสารละลายพอลิเมอร์มีฟองอากาศเกิดขึ้นมากมายเป็นผลให้ผิวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีลักษณะขรุขระไม่เรียบเนียนและขณะฉีดสารละลายพอลิเมอร์ผ่านหัวสปินเนอร์จะทำให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวสปินเนอร์ได้ง่ายอีกทั้งถ้าสารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดมากจะทำให้อัตราเร็วระหว่างสารละลายพอลิเมอร์ที่ไหลผ่านหัวสปินเนอร์กับสารที่ทำให้เมมเบรนแข็งตัวภายในไม่สัมพันธ์กันดังนั้นจึงทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเกิดการแตกหรือฉีกได้ง่ายระหว่างกระบวนการผลิต

ตารางที่ 4.18 ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดแผ่นแปรชนิดและปริมาณสารเติมแต่ง 1, 2 - โพรเพนไดออลและไตรอะซิติก

สูตร	ความหนืด (mPa.s)
E1	546
E2	628
E3	628
E4	625
E5	674
E6	711

ตารางที่ 4.19 ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดแผ่นแปรน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณสารก่อรูพรุนกลุ่ม PEG

สูตร	ความหนืด (mPa.s)	
	2% PEG	5% PEG
E7	984	1,214
E8	994	1,248
E9	997	1,307
E10	1,049	1,432

ตารางที่ 4.20 ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดแผ่นแปรน้ำหนัก โมเลกุลและปริมาณสารก่อ  
รูพรุนกลุ่ม PVP

สูตร	ความหนืด (mPa.s)	
	2% PVP	5% PVP
E11	1,052	1,493
E12	1,460	1,990
E13	3,891	8,629
E14	2,791	8,352

ตารางที่ 4.21 ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ชนิดเส้นใยกลาง

สูตร	ความหนืด (mPa.s)
PES1	519
PES2	647
PES3	896
PES4	1,106
PES5	1,405
PES6	1,835
PES7	1,834

#### 4.2.6 ผลการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลาง

##### 4.2.6.1 การแปรปริมาณพอลิอีเทอร์ซัลโฟนและปริมาณไตรอะซิติก

การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง เป็นการทดสอบสมบัติของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ทราบถึงความแข็งแรงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางแสดงในตารางที่ 4.22 - 4.23

ทำการศึกษาปริมาณของพอลิอีเทอร์ซัลโฟนที่มีผลต่อสมบัติความทนแรงดึง เมมเบรนชนิดเส้นใยกลางสูตร PES3 และ PES4 มีปริมาณพอลิอีเทอร์ซัลโฟน 19 % เมมเบรนชนิดเส้นใยกลางสูตร PES5 และ PES6 มีปริมาณพอลิอีเทอร์ซัลโฟน 21 % จากผลการทดลองในตารางที่ 4.22 โดยทำการเปรียบเทียบเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางแต่ละคู่ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อ



ปริมาณของพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนเพิ่มขึ้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงทั้ง 2 กลุ่มสามารถทนแรงดึงได้ใกล้เคียงกัน แต่ความเครียด ณ จุดขาดจะเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจะมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นและภาพถ่ายจากกล้อง SEM ในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้รูพรุนบริเวณตรงกลางเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีขนาดเล็กลงเป็นเหตุให้เมมเบรนสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาปริมาณไดอะซิติลซึ่งใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1, PES3 และ PES5 มีปริมาณสาร 2 % เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES2, PES4 และ PES6 มีปริมาณสาร 10 % จากผลการทดลองในตารางที่ 4.22 โดยทำการเปรียบเทียบเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแต่ละคู่ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซออร์เพิ่มขึ้น ผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณของพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนและภาพถ่ายจากกล้อง SEM ในรูปที่ 4.5 สามารถช่วยยืนยันผลการทดลองในส่วนนี้ได้เป็นอย่างดีเนื่องจากเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจะมีขนาดรูพรุนบริเวณตรงกลางเล็กลงตามปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงจึงสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.22 สมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรปริมาณพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนและปริมาณไดอะซิติล

สูตร	ความเค้น ณ จุดขาด (MPa)	ความเครียด ณ จุดขาด (%)
PES1	2.58±0.18	27.60±2.02
PES2	4.00±0.62	46.00±3.33
PES3	2.51±0.50	22.72±1.58
PES4	3.40±0.55	58.21±3.03
PES5	5.25±0.38	46.27±2.29
PES6	5.73±0.24	62.17±3.14

#### 4.2.6.2 การแปรชนิดสารก่อรูพรุน PEG และ PVP

ศึกษาชนิดสารก่อรูพรุนที่มีผลต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง แสดงในตารางที่ 4.23 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารก่อรูพรุน PEG และ PVP ที่เติมลงไปไม่มีผลต่อสมบัติความทนแรงดึงแต่จากผลการทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง เช่น การทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์และการกักกันระดับน้ำหนกโมเลกุลแสดงให้เห็นว่าสารก่อรูพรุน PEG

มีผลต่อความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนและประสิทธิภาพการกรองของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.23 สมบัติความทนต่อแรงดึงของพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแปรชนิดสารก่อรูพรุน PEG และ PVP

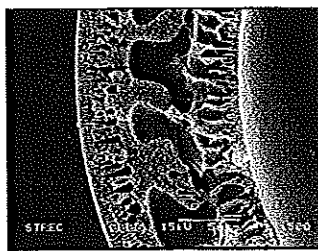
สูตร	ความเค้น ณ จุดขาด (MPa)	ความเครียด ณ จุดขาด (%)
PES5	5.25±0.38	46.27±2.29
PES7	5.13±0.42	44.36±4.04

#### 4.2.7 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

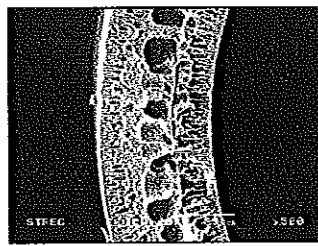
ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงในรูปที่ 4.5 ภาพภาคตัดขวางที่ถ่ายจากกล้อง SEM แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร เมมเบรนมีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่อยู่ตรงกลางระหว่างชั้นรูพรุนแบบทรงกระบอก สาเหตุที่ทำให้โครงสร้างของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีลักษณะเช่นนี้เนื่องจากอัตราการแข็งตัวของบริเวณตรงกลางของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่ช้ากว่าบริเวณภายนอกและภายในเมมเบรนคั้งได้กล่าวแล้วข้างต้น นอกจากนี้อัตราการแข็งตัวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่มีผลต่อขนาดรูพรุนของเมมเบรนแล้วยังมีสาเหตุอื่นที่พบว่าสามารถยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ได้ เช่น ปริมาณของพอลิเมอร์มาก ปริมาณของสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย (non solvent) มาก และในสารละลายเมมเบรนมีสารเติมแต่งประเภทพอลิเมอร์ซึ่งในกรณีนี้สารเติมแต่งพอลิเมอร์ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลมากเพียงพอที่สามารถยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ได้และมีปริมาณมากด้วย [25]

ภาพ SEM ของเมมเบรนทั้ง 7 สูตร แสดงให้เห็นว่ารูพรุนบริเวณตรงกลางมีขนาดแตกต่างกัน เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 มีรูพรุนบริเวณตรงกลางขนาดใหญ่กว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตรอื่นๆงานวิจัยนี้ใช้สารเติมแต่งประเภทสารก่อรูพรุน PEG และ PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 และ 40,000 Da ปริมาณ 5 % แม้ว่าปริมาณของสารเติมแต่งจะไม่มากนักแต่น้ำหนักโมเลกุลของสารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดมากเพียงพอที่จะสามารถยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ได้ เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES3 และ PES4 มีปริมาณของพอลิเมอร์น้อยกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5, PES6 และ PES7 จึงทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง 2 สูตรข้างต้นมีรูพรุนบริเวณตรงกลางขนาดใหญ่กว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงอีก 3 สูตร ยังพบว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES3 และ PES4 มีขนาดรูพรุนบริเวณตรงกลางแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมมเบรน

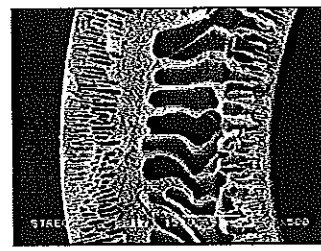
ชนิดเส้นใยกลางทั้ง 2 สูตรมีปริมาณของพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุลและปริมาณ PEG เท่ากันแต่มีปริมาณของสารเติมแต่งไทรอะซิติกแตกต่างกัน โดยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางสูตร PES2 มีปริมาณของสารเติมแต่งไทรอะซิติกมากกว่าจึงทำให้รูพรุนบริเวณตรงกลางมีขนาดเล็กกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางสูตร PES1 และ PES2 ที่มีปริมาณของสารเติมแต่งไทรอะซิติก 2 % และ 10 % ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของสารเติมแต่งเพิ่มขึ้นจะสามารถช่วยยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ได้



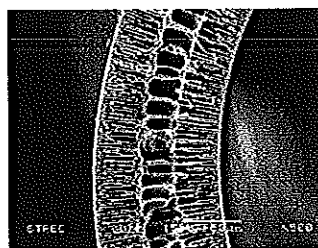
PES1



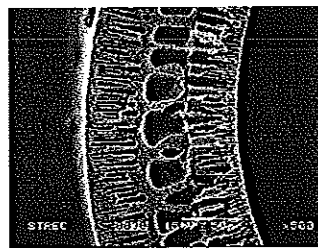
PES2



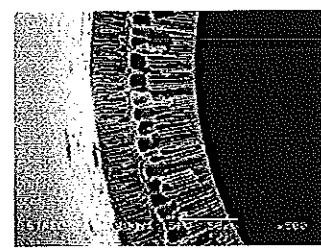
PES3



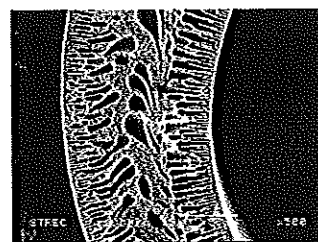
PES4



PES5



PES6



PES7

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางจากกล้อง SEM

นอกจากนั้นยังพบว่าชนิดของสารเติมแต่งมีผลต่อ โครงสร้างรูพรุน เมมเบรนชนิดเส้นใยกลางสูตร PES5 และ PES7 มีโครงสร้างรูพรุนแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมมเบรนทั้ง 2 สูตรมีเพียงชนิดของสารเติมแต่งที่แตกต่างกันเท่านั้น โดยเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางสูตร PES5 ใช้ PEG ที่

มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da เป็นสารเติมแต่ง ในขณะที่เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES7 ใช้ PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 40,000 Da เป็นสารเติมแต่ง จะเห็นว่า PVP มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า PEG มาก ดังนั้นจึงทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES5 มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า

#### 4.2.8 ผลการหาขนาดรูพรุนของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงโดยการใช้ปรอท

การหาขนาดรูพรุนของพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงในตารางที่ 4.24 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES2 - PES4 มีรูพรุนขนาดใกล้เคียงกันแต่มีความพรุนตัวแตกต่างกัน ยกเว้นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 ที่มีขนาดรูพรุนและความพรุนตัวแตกต่างออกไป เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES1 และ PES2 มีปริมาณ ไตรอะซิติก 2 % และ 10 % จากตารางที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ ไตรอะซิติกเพิ่มขึ้นจะทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงและมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้นจะยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่แต่จะช่วยให้เมมเบรนมีความพรุนตัวมากขึ้น ดังนั้นจากการศึกษาในหัวข้อนี้สามารถช่วยยืนยันได้ว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES2 ซึ่งมีปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์และความสามารถในการกักกันเพิ่มขึ้น

เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PES3 และ PES4 มีการเติมไตรอะซิติกร่วมกับสารก่อรูพรุน PEG โดยมีปริมาณ ไตรอะซิติก 2 % และ 10 % ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณ ไตรอะซิติกเพิ่มขึ้นจะทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณของไตรอะซิติกที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อขนาดรูพรุน จากการศึกษาในหัวข้อนี้สามารถใช้ยืนยันค่าสภาพให้ซึมผ่านได้และการกักกันระดับน้ำหนัก โมเลกุลที่พบว่าการเติมสารก่อรูพรุนจะทำให้เมมเบรนมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อความสามารถในการกักกัน

ตารางที่ 4.24 ขนาดรูพรุนและความพรุนตัวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สูตร	ขนาดรูพรุน ( $\mu\text{m}$ )	ความพรุนตัว (%)
PES1	1.87	44.76
PES2	0.08	64.64
PES3	0.09	58.23
PES4	0.09	82.17

จากการศึกษาพอลิอิเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสามารถสรุปภาพรวมทั้งหมดได้ว่า การผลิตเมมเบรนมีปัจจัยหลายสาเหตุที่มีผลต่อ โครงสร้างและประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง เช่น ปริมาณของพอลิเมอร์ ปริมาณและชนิดของสารเติมแต่ง การเติมสารเติมแต่งลงในสารละลายเมมเบรน จะทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อขนาดรูพรุนของเมมเบรน เมมเบรนที่ผสมสารก่อรูพรุน PEG ยังทำให้เมมเบรนมีโครงสร้างเหมาะสมกับระบบมากกว่าการเติมสารก่อรูพรุน PVP

การใช้พอลิอิเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงในการกรองน้ำอ้อยมีแนวโน้มเกิดการอุดตันในเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเนื่องจากค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่มากขึ้น น้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีปริมาณน้ำตาลซูโครสไม่แตกต่างจากน้ำอ้อยเริ่มต้นแต่ความเข้มข้นของสีลดลงและมีความใสมากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

กระบวนการผลิตเมมเบรนที่อาศัยหลักการของกระบวนการเปลี่ยนเฟสเป็นวิธีที่นิยมใช้ผลิตเมมเบรนทางการค้า พอลิซัลโฟนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเป็นวัสดุที่นิยมนำมาผลิตเมมเบรนทางการค้าเช่นกัน นอกจากนี้แล้วยังมีสารเติมแต่งที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเมมเบรน เช่น PVP และ PEG เนื่องจากสารทั้ง 2 ชนิดเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมผลิตเมมเบรนว่าสามารถเข้ากันได้ดีกับวัสดุที่นำมาผลิตเมมเบรน ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติของเมมเบรนให้มีความชอบน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน เช่น ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ การกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล สมบัติความทนต่อแรงดึงและสัญญาณวิทยาของเมมเบรน

การศึกษาเบื้องต้นโดยเตรียมพอลิซัลโฟนเมมเบรนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นเพื่อเป็นการประหยัดสารเคมี ประหยัดเวลาในการทดสอบและทำให้ทราบแนวโน้มอิทธิพลของสารเติมแต่งที่มีต่อค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของเมมเบรนได้สะดวกกว่าการเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง จากขั้นตอนนี้ได้นำเอาสูตรที่ดีที่สุดไปทำการศึกษาต่อ โดยเตรียมเป็นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

สารก่อรูพรุนจะมีผลควบคุมโครงสร้างเมมเบรนซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน ได้แก่ ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ การกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล สมบัติความทนต่อแรงดึงและสัญญาณวิทยา เมมเบรนที่ผสมสารก่อรูพรุนจะเกิดการแยกเฟสเร็วขึ้นทำให้โครงสร้างของเมมเบรนมีชั้นผิวที่บางมากมีชั้นรูพรุนด้านล่างขนาดใหญ่และมีความพรุนตัวมากขึ้น โครงสร้างของเมมเบรนลักษณะนี้จะมีความเหมาะสมกับกระบวนการไมโครฟิลเตรชันเพื่อใช้สำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือองค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากในสารละลาย [36] นอกจากนี้เมมเบรนที่ผสมสารก่อรูพรุน PVP อนุภาค PVP จะช่วยปรับปรุงสมบัติชอบน้ำของเมมเบรนให้ดีขึ้นโดย PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะกระจายตัวบริเวณผิวเมมเบรนได้ทั่วถึงกว่า PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยจากสาเหตุข้างต้นทำให้โมเลกุลน้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ดีขึ้นดังนั้นเมมเบรนจึงมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนที่ไม่มีการเติมสารก่อรูพรุน พอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร PI ซึ่งเป็นสูตรที่ไม่เติมสารก่อรูพรุนมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์  $100 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  เมมเบรน

ชนิดแผ่นสูตร P2 - P6 เป็นสูตรที่มีการเติมสารเติมแต่ง 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์ PVP(K90) และ PVP(L300K) เมมเบรนกลุ่มนี้มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P1 โดยมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ประมาณ 191 - 251  $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  และเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร P6 เป็นสูตรที่มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากที่สุดจึงได้นำสูตรนี้ไปเตรียมเป็นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางเพื่อใช้ทำการศึกษาต่อ

พอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางสูตร PSF1 มีพอลิซัลโฟนเพียงอย่างเดียวจะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์น้อยกว่าเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางที่มีการเติมสารก่อรูพรุนเนื่องจากพอลิซัลโฟนมีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้ยาก เมมเบรนชนิดเส้นใยกลางสูตร PSF2 และ PSF3 ที่เติมสารเติมแต่ง 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์และไตรอะซิติกจะมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ 83.04 และ 81.75  $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้นเกือบ 6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางสูตร PSF1 เมมเบรนชนิดเส้นใยกลางที่ผสม PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากและมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ลดลงจาก 53.22 ถึง 6.35  $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  เนื่องจากการบวมตัวของ PVP ทำให้เมมเบรนมีขนาดรูพรุนเล็กลงและจากการตรวจสอบโดยใช้เทคนิค mercury intrusion พบว่าสารเติมแต่งที่ผสมลงไปยังช่วยให้เมมเบรนมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อขนาดรูพรุนมากนักโดยมีความพรุนตัวประมาณ 63 % - 84 % และมีขนาดรูพรุนประมาณ 0.1 - 0.17  $\mu\text{m}$  จึงทำให้เมมเบรนชนิดเส้นใยกลางมีความสามารถในการกักกันเกลือเดียวกันและมีการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 67,000 Da นอกจากนี้สมบัติข้างต้นดังได้กล่าวมาแล้วยังทำการศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางโดยมีค่าความเค้น ณ จุดขาด 3 - 5 MPa และความเครียด ณ จุดขาด 35 % - 60% และจากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางพบว่าอัตราการแข็งตัวมีผลต่อโครงสร้างรูพรุน บริเวณที่เมมเบรนแข็งตัวเร็ว โครงสร้างรูพรุนจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกบริเวณที่เมมเบรนแข็งตัวช้า โครงสร้างรูพรุนจะมีลักษณะทรงกลม สิ่งที่สำคัญมากในการเตรียมเมมเบรนชนิดเส้นใยกลางคือความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ ความหนืดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมือเตรียมเมมเบรนในโครงการนี้คือความหนืดที่ไม่เกิน 4,800 mPa.s

พอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นที่ผสมสารเติมแต่ง ได้แก่ 1, 2 - โพรเพนไดออกไซด์ ไตรอะซิติก PVP และ PEG แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของสารเติมแต่งมีผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารเติมแต่งเพิ่มขึ้นจะทำให้เมมเบรนชนิดแผ่นมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น เมมเบรนชนิดแผ่นสูตร E1 - E6 มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ 103 - 470  $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  สารก่อรูพรุน PEG จะทำให้เมมเบรนมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณ PEG ที่มากขึ้นมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ประมาณ 5 - 276  $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  โดยเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร E10 ซึ่งผสม PEG น้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da ปริมาณ 5 % จะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากที่สุด สารก่อรูพรุน

PVP ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากและผสมในเมมเบรนในสัดส่วนที่มากขึ้นจะทำให้ PVP เกิดการบวมตัวมากขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กลงดังนั้นจึงทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ลดลง เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร E12 ซึ่งผสมสารก่อรูพรุน PVP น้ำหนักโมเลกุล 40,000 Da ปริมาณ 5 % มีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์มากที่สุดประมาณ  $290 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  จากผลการศึกษาในส่วนนี้จึงนำเมมเบรนชนิดแผ่นสูตร E10 และ E12 ที่มีปริมาณ 5 % ไปทำการศึกษาโดยเตรียมเป็นเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

การศึกษาเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงให้เห็นว่าปริมาณของพอลิเมอร์ ปริมาณและชนิดของสารเติมแต่งมีผลต่อโครงสร้างเมมเบรน ปริมาณของพอลิเมอร์และสารก่อรูพรุนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ประมาณ  $92 - 333 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$  แต่การเติมสารเติมแต่งไม่มีผลต่อขนาดรูพรุนของเมมเบรน จึงทำให้ความสามารถในการกักกันมีค่าไม่แตกต่างกัน พอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 67,000 Da และยังพบว่าอิทธิพลของปัจจัยทั้ง 2 อย่างนี้มีผลทำให้เมมเบรนมีสมบัติความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นและจากการศึกษาด้วย mercury intrusion ที่แสดงว่าปริมาณของสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เมมเบรนมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 44 % - 82 % ขนาดของรูพรุนมีค่าประมาณ  $0.08 \mu\text{m}$  สามารถสรุปได้ว่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของเมมเบรนไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนเท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับความพรุนตัวของเมมเบรนด้วย ชนิดสารเติมแต่งมีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าปัจจัยอื่นๆ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารก่อรูพรุน PEG ทำให้เมมเบรนมีคุณสมบัติเหมาะสมกับระบบมากกว่าสารก่อรูพรุน PVP นอกจากนี้ การศึกษาสัณฐานวิทยาซึ่งใช้เป็นข้อมูลประกอบการศึกษาลักษณะเฉพาะของเมมเบรนอื่นๆ ยังพบว่าหลายสาเหตุที่สามารถยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ได้ เช่น ปริมาณของพอลิเมอร์ที่มาก ปริมาณของสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายที่มากและสารเติมแต่งประเภทพอลิเมอร์ต้องมือน้ำหนักโมเลกุลมากเพียงพอที่สามารถยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ได้และมีในปริมาณมากด้วย พอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีความเค้น ณ จุดขาดประมาณ 2 - 5 MPa และมีความเครียด ณ จุดขาดประมาณ 27 % - 62 % การศึกษาสัณฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงแสดงให้เห็นว่า อัตราการแข็งตัวของเมมเบรน ปริมาณและชนิดสารเติมแต่งมีผลต่อสัณฐานวิทยาของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่มีสารเติมแต่งมากจะยับยั้งการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงในโครงการนี้ควรมีค่าไม่เกิน 4,800 mPa.s

จากการศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งได้แก่ สารเพิ่มความยืดหยุ่นและสารก่อรูพรุนที่ใช้ในการเตรียมพอลิซัลโฟนและพอลิเอเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดแผ่นและชนิดเส้นใยกลวงแสดงให้เห็นว่าพลาสติกไซเซอร์ได้แก่ 1, 2 - โพรเพนไดออกอลและไตรอะซิติกและสารก่อ



รูปพรุน PEG และ PVP มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของเมมเบรนมากกว่าการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุล สมบัติความทนต่อแรงดึงของเมมเบรนและสัณฐานวิทยาของเมมเบรนจากการศึกษายังพบว่าเมมเบรนที่มีการผสมสารเติมแต่งจะทำให้เมมเบรนมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นจึงทำให้เมมเบรนกลุ่มนี้มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น

นำพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงและพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมาประยุกต์ใช้ในการกรองน้ำอ้อยพบว่าค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นแล้วมีค่าคงที่เนื่องจากการอุดตันภาคคอลลอยด์บริเวณผิวเมมเบรนทำให้เกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน จากปรากฏการณ์นี้บริเวณผิวหน้าเมมเบรนจะมีชั้นเจลเกิดขึ้นทำหน้าที่ช่วยในการกักกันสารทำให้อุณหภูมิคอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำอ้อยไม่สามารถแพร่ผ่านเมมเบรนไปได้และน้ำอ้อยที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนจึงมีความใสเพิ่มขึ้นแต่ปริมาณน้ำตาลซูโครสของน้ำอ้อยสดและน้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรนมีค่าใกล้เคียงกัน พอลิซัลโฟนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงสูตร PSF7 และ PES1 มีค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยมากที่สุดในแต่ละกลุ่ม มีค่าประมาณ 10 และ 15  $\text{L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  ตามลำดับ ทั้งยังได้เพอมีเอทที่มีสีและความใสใกล้เคียงกัน จึงคาดว่าน่าจะเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กรองน้ำอ้อยมากที่สุด

เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง พอลิซัลโฟนเมมเบรนและพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงพบว่าพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์น้อยกว่า มีค่าฟลักซ์การกรองน้ำอ้อยน้อยกว่า แต่มีสีและความขุ่นของน้ำอ้อยที่กรองผ่านเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง สมบัติความทนต่อแรงดึงและความพรุนตัวในช่วงเดียวกับพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง ดังนั้นพอลิอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงน่าจะมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้กรองน้ำอ้อยมากกว่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อัตราเร็วของสารละลายพอลิเมอร์ที่ผ่านหัวสปินเนอร์อัตราเร็วของของเหลวที่ทำให้เมมเบรนแข็งตัวภายในและอัตราเร็วของการดึงเมมเบรนไม่ควรช้าเกินไปหรือเร็วเกินไปเพราะจะทำให้เมมเบรนขาดขณะทำการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง
2. ควรศึกษาการลดการอุดตันที่เกิดขึ้นในเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กรองน้ำอ้อย
3. ควรศึกษาสมบัติของเมมเบรนหลังล้างแล้วเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขึ้นรูปครั้งแรกจึงใช้ระยะเวลาในการศึกษานานประกอบด้วยมีระยะเวลาการวิจัยจำกัด)

### บรรณานุกรม

- [1] George, S.C. and Thomas, S. 2001. "Transport phenomena through polymeric systems", Progress in polymer science. 26 (2001) 985 - 1017.
- [2] Qin, J.J., Li, Y., Lee, L.S. and Lee, H. 2003. "Cellulose acetate hollow fiber ultrafiltration membranes made from CA/PVP 360K/NMP/water", Journal of membrane science. 218 (2003) 173 - 183.
- [3] Xu, Z.L. and Qusay, F.A. 2004. "Effect of polyethylene glycol molecular weights and concentrations on polyethersulfone hollow fiber ultrafiltration membranes", Journal applied polymer science. 91 (2004) 3398 - 3407.
- [4] อัสวิทย์ ปัทมเวณ. 2544. ตามรอยน้ำตาล. กรุงเทพฯ : ที.พี.พรินท์ จำกัด.
- [5] กสิกรไทย, ธนาคาร. ฝ่ายวิชาการ. 2521. น้ำตาล. กรุงเทพฯ : เกษมการพิมพ์.
- [6] สืบค้นจาก: <http://www.wangkanai.co.th/cane4.htm> (1/8/2549).
- [7] Bhattacharya, P.K., Agarwal, S., De, s. and Rama Gopal , U.V.S. 2001. "Ultrafiltration of sugar cane juice for recovery of sugar: analysis of flux and retention", Separation and purification technology. 21 (2001) 247 - 259.
- [8] Ghosh, A.M. and Balakrishnan, M. 2003. "Pilot demonstration of sugar cane juice ultrafiltration in an Indian sugar factory", Journal of food engineering. 58 (2003) 143 - 150.
- [9] Kishihara, S., Fujii, s. and Komoto, M. 1981. "Ultrafiltration of cane juice influence of flux and quality of permeate", Int sugar journal. 83 (1981) 35 - 39.
- [10] Mulder, M. 1996. Basic principle of membrane technology. Netherlands : Kluwer academic publishers.

- [11] สืบค้นจาก: [http://lyre.mit.edu/research/poster\\_bozhou.pdf](http://lyre.mit.edu/research/poster_bozhou.pdf) (7/3/50).
- [12] สืบค้นจาก: [http://www.nirosoft.com/site/item.php?ln=en&item\\_id=189&main\\_id=110](http://www.nirosoft.com/site/item.php?ln=en&item_id=189&main_id=110)  
(7/3/50).
- [13] Ho, W.S.W. and Sirkar, K.K. 1992. Membrane handbook, New York : Van nostrand reinhold.
- [14] Askeland, D.R. 1996. The science and engineering of materials. 3<sup>rd</sup> ed., UK : Chapman & hall.
- [15] เจริญ นาคะสรรค์. 2546. เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [16] Charrier, M.J. 1991. Polymeric materials and processing. New York : Hanser publisher.
- [17] รัตนา จิระรัตนานนท์. 2543. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. กรุงเทพฯ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [18] วิชาการเกษตร, กรม. กองแผนงาน. 2523. อ้อย. กรุงเทพฯ : ธนประดิษฐ์การพิมพ์.
- [19] Han, M.I. and Nam, S.T. 2002. "Thermodynamic and rheological variation in polysulfone solution by PVP and its effect in the preparation of phase inversion membrane", Journal of membrane science. 202 (2002) 55 - 61.
- [20] Kim, I.C. and Lee, K.H. 2003. "Effect of various additive on pore size of polysulfone membrane by phase inversion process", Journal applied polymer science. 89 (2003) 2562 - 2566.
- [21] Aptel, P., Abidine, F., Ivaldi, F. and Lafaille, J.P. 1985. "Polysulfone hollow fibers effect of spinning conditions on ultrafiltration properties", Journal applied polymer science. 22 (1985) 199 - 215.

- [22] Qin, J.J., Gu, J. and Chung, T. S. 2001. "Effect of wet and dry-jet wet spinning on the shear-induced orientation during the formation of ultrafiltration hollow fiber membrane", Journal applied polymer science. 182 (2001) 57 - 75.
- [23] Qin, J.J., Wong, F.S., Li, Y. and Liu, Y.T. 2003. "A high flux ultrafiltration membrane spun from PSU/PVP(K90)/DMF/1,2-propanediol", Journal of Membrane Science. 211 (2003) 139 - 147.
- [24] Xu, Z.L., Chung, T.S. and Huang, Y. 1999. "Effect of polyvinylpyrrolidone molecular weights on morphology, oil/water separation, mechanical and thermal properties of polyetherimide/polyvinylpyrrolidone hollow fiber membrane", Journal applied polymer science. 74 (1999) 2220 - 2233.
- [25] Lin, Y., K, G.H. and Strathmann, H. 2003. "Characterization of morphology controlled polyethersulfone hollow fiber membranes by the addition of polyethylene glycol to the dope and bore liquid solution". Journal applied polymer science. 223 (2003) 187 - 199.
- [26] Qin, J.J. and Chung, T.S. 1999. "Effect of dope flow rate on the morphology, separation performance, thermal and mechanical properties of ultrafiltration hollow fiber membranes". Journal applied polymer science. 157 (1999) 35 - 51.
- [27] Sanchez, B.T., Basurto, R.I.O. and Fuente, E.B.D.L. 1999. "Effect of nonsolvents on properties of spinning solutions and polyethersulfone hollow fiber ultrafiltration membrane", Journal of membrane science. 152 (1999) 19 - 28.
- [28] Wienk, I.M., Olde Scholtenhvis, F.H.A., Boomgard, T.V.D. and Smolders, C.A. 1995. "Spinning of hollow fiber ultrafiltration membranes from a polymer blend", Journal of membrane science. 106 (1995) 233 - 243.
- [29] Xu, Z.L., and Qusay, F.A. 2004. "Polyethersulfone (PES) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared by PES/non-solvent/NMP solution", Journal of membrane science. 233 (2004) 101 - 111.

- [30] อรรถวรณ เภญมาส. 2547. “การใช้ไดอะทอไมต์กำจัดสีและความขุ่นในอุตสาหกรรมน้ำตาลทราย”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [31] Balakrishnan, M., Dua, M. and Bhagat, J.J. 2000. “Effect of operating parameter on sugar cane juice ultrafiltration : Result of a field experience”, Separation and purification technology. 19 (2000) 209 - 220.
- [32] Ghosh, A.M., Balakrishnan, M., Dua, M. and Bhagat, J.J. 2000. “Ultrafiltration of sugar cane juice with spiral wound moduls : on-site pilot trials”, Journal of membrane science. 174 (2000) 205 - 216.
- [33] Saha, N.K., Balakrishnan, M. and Ulbricht, M. 2006. “Polymeric membrane fouling in sugar cane juice ultrafiltration : role of juice polysaccharide”, Desalination. 189 (2006) 59 - 70.
- [34] Tako, M. and Nakamura, S. 1986. “Membrane permeability of cane juice on ultrafiltration with several kinds of membranes”, Biol. chem. 50 (4) (1986) 833 - 838.
- [35] สืบค้นจาก: <http://www.dow.com/propyleneglycol/app/> (19/5/50)
- [36] สืบค้นจาก: <http://www.polymer-additives.de/pma/de/products/plasticizers/triacetin/> (19/5/50)
- [37] ชันทอง สุนทรภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [38] van de Witte, P., Dijkstra, P.J., van den Berg, J.W.A. and Feijen, J. 1996. “Phase separation process in polymer solution in relation to membrane formation”, Journal of membrane science. 117 (1996) 1 - 31.
- [39] Hayama, M., Yamamota, K.I., Kohori, F., Uesaka, T., Ueno, Y., Sugaya, H., Itagaki, I. and Sakai, K. 2004. “Nanosopic behavior of polyvinylpyrrolidone particals on polysulfone/polyvinylpyrrolidone film”, Biomaterials. 25 (2004) 1019 - 1028.

- [40] Ochoa, N.A., Pradanos, P., Palacio, L., Pagliero, C., Marchese, J. and Hernandez, A. 2001. "Pore size distributions based on AFM imaging and retention of multidisperse polymer solute characterization of polyethersulfone UF membranes with dopes containing different PVP", Journal of membrane science. 187 (2001) 227 - 237.
- [41] Jung, B., Yoon, J.K., Kim, B. and Rhee, H.W. 2004. "Effect of molecular weight of polymeric additive on formation, permeation properties and hypochlorite treatment of asymmetric polyacrylonitrile membranes", Journal of membrane science. 243 (2004) 45 - 57.
- [42] Wienk, I.M., Boom, R.M., Beerlage, M.A.M., Bulte, A.M.W., Smolders, C.A., Strathmann, H. 1996. "Recent advances in the formation of phase inversion membranes made from amorphous or semi-crystalline polymer", Journal of membrane science. 113 (1996) 361 - 371.
- [43] Qin, J.J., Oo, M.H. and Li, Y. 2005. "Hollow fiber ultrafiltration membranes with enhanced flux for humic acid removal", Journal Applied Polymer Science. 247 (2005) 119 - 125.
- [44] Nene, S., Kaur, S., Sumad, K., Joshi, B. and Raghavarao, K.S.M.S. 2002. "Membrane distillation for the concentration of raw cane-sugar syrup and membrane clarified sugarcane juice", Desalination. 147 (2002) 157 - 160.
- [45] Kesting, R.E. 1985. Synthetic Polymeric Membranes, 2<sup>nd</sup> ed., New York : Wiley.
- [46] Mok, S., Worsfold, D.J., Fouda, A.E., Matsura, T., Wang, S. and Chan, K. 1995. "Study on the effect of spinning conditions and surface treatment on the geometry and performance of polymeric hollow fibre membrane", Journal of membrane science. 100 (1995) 183 - 192.
- [47] Sanchez, B.T., Basurto, R.I.O. and Fuent, E.B.E.L. 1999. "Effect of nonsolvents on properties of spinning solution and polyethersulfone hollow fiber ultrafiltration membranes", Journal of membrane science. 152 (1999) 19 - 28.

- [48] Jimenez, D.B.M. Narbaitz, R.M., Matsuura, T., Chowdhury, G., Pleizier, G. and Santerre, J.P. 2004. "Influence of processing conditions on the properties of ultrafiltration membranes", Journal of membrane science. 231 (2004) 209 - 224.
- [49] Xu, Z.L. and Qusay, F.A. 2004. "Polyethersulfone (PES) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared by PES/non-solvent/NMP solution", Journal of membrane science. 233 (2004) 101 - 111.

**ภาคผนวก**



## ภาคผนวก ก

### เปรียบเทียบการรักษาสภาพพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง ด้วยสารละลายกลีเซอรอล

#### จุดประสงค์

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของการรักษาสภาพเมมเบรนที่มีต่อประสิทธิภาพของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง

#### วิธีดำเนินการทดลอง

1. เตรียมพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง และรักษาสภาพเมมเบรนด้วยสารละลายกลีเซอรอล ตามวิธีที่ 3.4.2 เมมเบรนที่ไม่ทำการรักษาสภาพให้นำมาล้างให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (22°C) สูตรต่างๆของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง แสดงในตารางที่ ก1
2. ประกอบโมดูล ตามวิธีที่ 3.4.3
3. ทดสอบประสิทธิภาพของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง โดยทดสอบการกรองน้ำบริสุทธิ์ และทดสอบการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลสาร ตามวิธีที่ 3.4.5 และ 3.4.6 ตามลำดับ

#### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การรักษาสภาพเมมเบรน เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีนิยมใช้ในกระบวนการผลิตเมมเบรนเพราะมีความต้องการให้โครงสร้างของเมมเบรนมีความเสถียรตั้งแต่เมมเบรนที่ผลิตเสร็จเรียบร้อยจนถึงมือผู้ใช้ เนื่องจากโครงสร้างของเมมเบรนจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน ดังนั้นถ้าโครงสร้างเมมเบรนเกิดการเปลี่ยนแปลง จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน

ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์และค่าการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลสารของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่รักษาสภาพเมมเบรนด้วยสารละลายกลีเซอรอลและไม่รักษาสภาพเมมเบรน แสดงในตารางที่ ก2 และ ก3 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่รักษาสภาพเมมเบรนด้วยสารละลายกลีเซอรอลจะมีค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์

มากขึ้นอย่างชัดเจนและมีความสามารถในการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของสารลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนที่ไม่ผ่านการรักษาสภาพด้วยสารละลายกลีเซอรอล เนื่องจากสารละลายกลีเซอรอลที่เคลือบบนเมมเบรนจะป้องกันไม่ให้โครงสร้างเมมเบรนเกิดการยุบตัวขณะเมมเบรนแห้ง [47] ดังนั้นจึงทำให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้สะดวกขึ้นและโมเลกุลของสารก็สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้สะดวกขึ้นเช่นกันจึงทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของสารลดลงในขณะเดียวกันถ้าโครงสร้างรูพรุนเกิดการยุบตัวลงจะทำให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ลำบากขึ้นและโมเลกุลของสารก็สามารถผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้ลำบากขึ้นเช่นกันจึงทำให้ค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ลดลงแต่ความสามารถในการกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ ก1 สูตรต่างๆของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (wt%)

สูตร	สารเคมี					
	PSF	Triacetin	PVP(K15)	PVP(K90)	PVP(1300K)	NMP
PSF8	19	4	-	-	1	76
PSF10	19	4	1	-	-	76
PSF11	19	-	-	1	-	80

ตารางที่ ก2 ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ของพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่รักษาสภาพเมมเบรนด้วยสารละลายกลีเซอรอลและไม่รักษาสภาพเมมเบรน

สูตร	รักษาสภาพ				ไม่รักษาสภาพ			
	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ ( $l.m^{-2}.h^{-1}$ )			สภาพการ ซึมผ่านได้ ( $l.m^{-2}.h^{-1}.bar^{-1}$ )	ฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ ( $l.m^{-2}.h^{-1}$ )			สภาพการ ซึมผ่านได้ ( $l.m^{-2}.h^{-1}.bar^{-1}$ )
	1 บาร์	2 บาร์	3 บาร์		1 บาร์	2 บาร์	3 บาร์	
PSF8	110.76	234.29	341.48	114.80	1.34	2.74	4.38	1.45
PSF10	106.82	246.93	356.71	121.02	2.70	6.78	13.17	4.36
PSF11	68.11	143.90	208.33	70.08	0.89	1.94	3.21	1.07

ตารางที่ ก3 การกักกันระดับน้ำหนักโมเลกุลสารของพอลิซัลโฟเนอเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงที่  
รักษาสภาพเมมเบรนด้วยสารละลายกลีเซอรอลและไม่รักษาสภาพเมมเบรน

สูตร	รักษาสภาพ		ไม่รักษาสภาพ	
	การกักกัน (%)		การกักกัน (%)	
	เปปซิน	BSA	เปปซิน	BSA
PSF8	32.70	93.73	42.54	97.04
PSF10	12.14	88.61	27.95	93.42
PSF11	41.41	91.77	43.80	92.40

สรุปผลการทดลอง

การรักษาสภาพเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยสารละลายกลีเซอรอลจะไม่ทำให้  
โครงสร้างเมมเบรนเกิดความเสียหายระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นจึงนิยมทำการรักษาสภาพเม  
มเบรนภายหลังการผลิตเมมเบรนเรียบร้อยแล้ว

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวศิริรัตน์ ตั้งสถิตพร	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4722076	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2547

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- การเตรียมและสมบัติของพอลิซัลโฟนแมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเพื่อการกรองน้ำอ้อยระดับอัลตรา, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วทท.) ครั้งที่ 32, 10-12 ตุลาคม พ.ศ. 2549 ณ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์