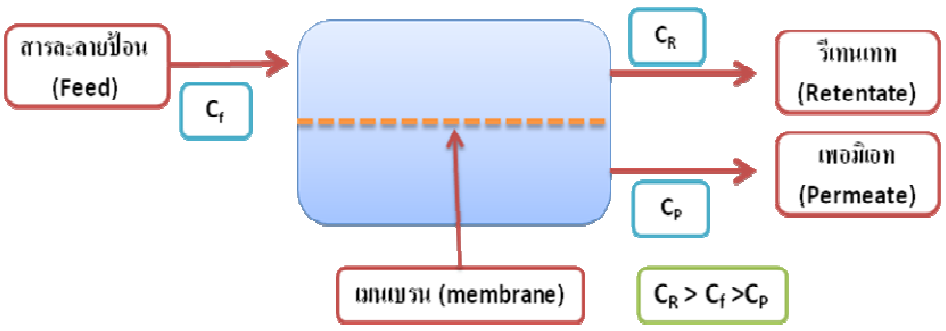
บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) [1]

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับแยกสารที่มีโมเลกุลเล็ก (ขนาดของมวลโมเลกุลน้อยกว่า 1,000) ออกมาจากสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (ขนาดของมวลโมเลกุลมากกว่า 1,000) โดยสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่น ขณะที่สารโมเลกุลขนาดเล็กจะสามารถผ่านเยื่อแผ่นออกไปได้ ตัวอย่างเช่น การแยกโปรตีนหรือเอมไซน์ออกจากน้ำ การทำโปรตีนให้เข้มข้นขึ้น หรือแม้แต่การแยกสารปฏิชีวนะออกจากน้ำหมัก เป็นต้น กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันจะใช้เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-20 นาโนเมตร ในการดำเนินงานจะใช้แรงขับดันคือผลต่างของความดันประมาณ 2-10 บรรยากาศ

วัสดุที่ใช้ผลิตเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันจะผลิตจากวัสดุอินทรีย์ (โพลิเมอร์) และวัสดุอนินทรีย์ (เซรามิก) แม้ว่าวัสดุเซรามิกสามารถใช้งานได้ดีกว่า สามารถทนความร้อนได้สูง ทนต่อความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อสารเคมีต่างๆ ได้ดี และมีความคงตัวมากกว่าเยื่อแผ่นโพลิเมอร์ก็ตาม แต่มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ราคาแพงกว่าวัสดุโพลิเมอร์มาก เปราะและแตกหักง่าย ความสามารถในการกักกันโมเลกุลอยู่ในช่วงแคบ ดังนั้น เยื่อแผ่นที่ทำจากวัสดุโพลิเมอร์จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้งานมากกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ ความเหมาะสม และสภาวะที่ใช้ในการแยกสาร ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการเลือกชนิดของเยื่อแผ่นได้ถูกต้อง

หลักการที่สำคัญของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน แสดงดังรูปที่ 2.1 คือ เมื่อป้อนสารละลายเข้าสู่กระบวนการเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นจะยอมให้ตัวทำละลายและตัวถูกที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่นผ่านไปได้ สารละลายส่วนที่ผ่านเยื่อแผ่นไปได้นี้ เรียกว่า เพอมิเอท ส่วนตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะถูกกักไว้ เรียกส่วนที่ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นไปได้นี้ว่า รีเทนเทท



รูปที่ 2.1 หลักการของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

2.2 การบอกคุณลักษณะของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน [1], [12], [13]

2.2.1 เพอมิเอชันฟลักซ์ (Permeation Flux)

ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ฟลักซ์จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบ โดยแสดงถึงปริมาตรของตัวทำละลายที่ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นต่อพื้นที่การกรองต่อเวลา มีหน่วยเป็น $Lm^{-2}h^{-1}$

ฟงักซ์ของน้ำสะอาด (ในกรณีที่ไม่มีตัวถูกละลาย) ที่ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่น สามารถแสดงในรูปของความต้านทานต่อการซึมผ่านด้วยสมการของ Hagen-Poileuille ดังนี้

$$J_w = \frac{(\Delta P)}{\mu_w R_m} \tag{2.1}$$

เมื่อ J_w = ฟลักซ์ของน้ำสะอาด ($m^3/m^2.s$)
ΔP = ผลต่างความดันที่ให้กับน้ำ (Pa)
μ_w = ความหนืดของน้ำ (Pa.s)
R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (m^{-1})

สำหรับสารละลายสามารถคำนวณค่าฟลักซ์ได้จากสมการ

$$J_v = \frac{(\Delta P - \Delta \pi)}{\mu_v R_t} \tag{2.2}$$

เมื่อ J_v = ฟลักซ์ของสารละลายผ่านเยื่อแผ่น ($m^3/m^2.s$)
ΔP = ผลต่างความดันที่ให้กับสารละลาย (Pa)
$\Delta \pi$ = ผลต่างความดันออสโมติกของสารละลาย (Pa)
μ_v = ความหนืดของสารละลาย (Pa.s)
R_t = ความต้านทานรวมต่อการไหลผ่าน (m^{-1})

สำหรับสารละลายของสารโมเลกุลใหญ่จะมีค่าความดันออสโมติกต่ำมากเมื่อเทียบกับความดันที่ให้ระบบ ($\Delta \pi << \Delta P$) จึงสามารถตัดเทอม $\Delta \pi$ ทิ้งได้ สมการที่ 2.2 จะลดรูปได้เป็น

$$J_v = \frac{(\Delta P)}{\mu_v R_t} \tag{2.3}$$

2.2.2 ความต้านทาน (Resistance)

ความต้านทานรวมต่อการไหลในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน อธิบายโดยใช้แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance-in-series model)

$$R_t = R_m + R_{cp} + R_f \tag{2.4}$$

เมื่อ R_f = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง เป็นการสะสมและอุดตันของสารที่ผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่น ซึ่งไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำสะอาด

R_{cp} = ความต้านทานภายนอก เนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน เป็นการสะสมและอุดตันของสารที่สามารถล้างออกด้วยน้ำสะอาด

ซึ่งความต้านทานต่างๆ ข้างต้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

หาค่า R_m ได้จากสมการที่ 2.1 เมื่อล้างเยื่อแผ่นที่ผ่านการใช้งานด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดชั้นโพลาไรเซชัน แล้ววัดฟลักซ์ของน้ำสะอาด ความต้านทานที่คำนวณได้ คือ ความต้านทานของเยื่อแผ่นรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$R_m + R_f = \frac{(\Delta P)}{\mu_w J'_w} \tag{2.5}$$

เมื่อ $R_m + R_f$ = ความต้านทานของเยื่อแผ่นรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงของสารป้อน (m^{-1})

J'_w = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดผ่านเยื่อแผ่นหลังกรองโปรตีนและล้างโปรตีนออกด้วยน้ำสะอาด ($m^3/m^2 s$)

ดังนั้น ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง คำนวณได้จาก

$$R_f = (R_m + R_f) - R_m \tag{2.6}$$

และคำนวณความต้านทานเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันจาก

$$R_{cp} = R_t - (R_m + R_f) \tag{2.7}$$

2.2.2 การกักกันสาร (Rejection, R)

ค่าการกักกันสาร (Rejection, R) เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการกักกันสารของเยื่อแผ่น มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 (อาจบอกเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการคูณด้วย 100) ถ้า R = 0 หมายความว่า เยื่อแผ่นไม่สามารถกักกันสารได้หรือตัวถูกละลายสามารถผ่านเยื่อแผ่นได้หมด แต่ถ้า R = 1 หมายความว่า เยื่อแผ่นสามารถกักกันตัวถูกละลายได้หมด สำหรับค่าการกักกันคำนวณเป็นเศษส่วน หรือ เปอร์เซ็นต์ ดังนี้

$$R = (1 - \frac{C_p}{C_r}) \times 100 \tag{2.8}$$

โดย C_p = ความเข้มข้นขององค์ประกอบในเพอมิเอท

และ C_r = ความเข้มข้นขององค์ประกอบในรีเทนเทท

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อฟลักซ์ และการกักกันในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

2.3.1 อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายจะลดลง ส่งผลให้ฟลักซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ดีขึ้น (เพิ่มมากขึ้น) ส่งผลให้สารละลายแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้ดีขึ้น

2.3.2 ความดันในช่วงก่อนการเกิดเจล

เมื่อเพิ่มความดันขึ้นจะส่งผลให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นด้วย แต่ในช่วงที่เกิดเจล ความดันก็จะเพิ่มมากขึ้นและทำให้ชั้นของเจลอัดกันแน่น ส่งผลทำให้ฟลักซ์ไม่เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มที่จะคงที่

2.3.3 อัตราการไหลของสายป้อน

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออัตราการไหลเพิ่มจะไปช่วยลดการเกิด CP และลดการเกิดฟาวลิง

2.3.4 ความเข้มข้นของสารละลาย

สำหรับระบบมีความเข้มข้นของสารละลายสูงโอกาสที่จะเกิด CP ก็สูงตามด้วย ผลก็คือทำให้เกิดเจลและฟาวลิงสูงกว่าระบบที่มีความเข้มข้นของสารละลายต่ำ

2.3.5 ความเป็นกรด-เบส

ค่าความเป็นกรด-เบสมีผลต่อฟลักซ์และการกักกันของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะค่าความเป็นกรด-เบสจะมีอิทธิพลต่อการละลายของสารป้อน เช่น โปรตีนจะละลายน้ำได้น้อยเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสมีค่าใกล้เคียงกับจุด Isoelectric point จะทำให้เกิดการดูดซับของโปรตีนบนผิวเยื่อแผ่นมากโอกาสที่จะเกิดฟาวลิงจึงสูงขึ้น

2.4 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นจากโพลิเมอร์ [1]

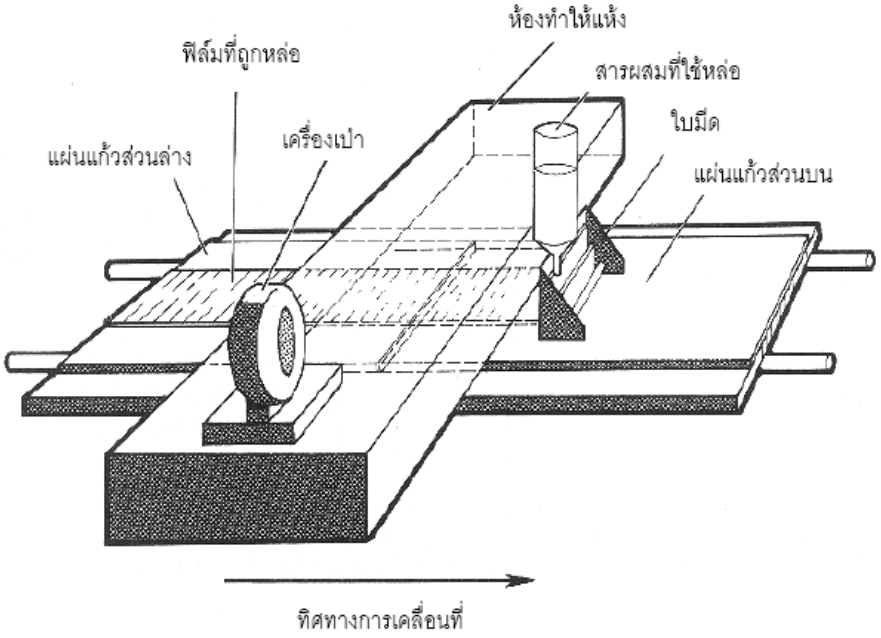
2.4.1 วิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase inversion method)

วิธีการเปลี่ยนเฟสนี้เป็นวิธีการผลิตที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการผลิตเยื่อแผ่นที่จำหน่ายทั่วไป การเปลี่ยนเฟส หมายถึง การทำให้สารละลายโพลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบหนึ่งๆ เปลี่ยนจากสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous) ที่เรียกว่าโซล 1 (Sol) ไปเป็นสารละลายเนื้อผสมหรือโซล 2 จากนั้นจะเปลี่ยนไปเป็นเจล โดยระหว่างการเปลี่ยนแปลงจะเกิดชั้นผิว และรูพรุนภายในฟิล์มหรือเจลได้

สารละลายสำหรับผลิตเยื่อแผ่นโดยทั่วไปประกอบด้วย โพลิเมอร์ ตัวทำละลาย ตัวไม่ละลาย และสารพองตัว (Swelling agent) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนปริมาณองค์ประกอบต่างๆ โดยจะส่งผลต่อสมบัติของเยื่อแผ่นที่ได้ การเปลี่ยนเฟสสามารถทำได้โดยการระเหยตัวทำละลายออกจากสารละลายโพลิเมอร์หรือการลดอุณหภูมิของสารละลายโพลิเมอร์ ซึ่งทั้ง 2 วิธีเป็นการลดความสามารถในการละลายของโพลิเมอร์ และกลไกการเกิดเยื่อแผ่นก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

เมื่อผสมสารละลายโพลิเมอร์ในสัดส่วนที่ต้องการ จะต้องปล่อยสารละลายนี้ไว้ที่อุณหภูมิคงที่พร้อมต้องกวนตลอดเวลา ช่วงเวลานี้คือการปรับตัว (Maturation time) ซึ่งตัวทำละลายจะแทรกซึมไปละลายโพลิเมอร์และในบางกรณีอาจทำให้สายโซ่โพลิเมอร์สั้นลง จากนั้นนำสารละลายโพลิเมอร์มาทำให้เป็นฟิล์มบาง (Casting) บนแผ่นแก้วหรือชั้นรองรับ โดยใช้ใบมีดที่สามารถปรับค่าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยขั้นตอนนี้ควรทำในบรรยากาศที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ขั้นตอนที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำให้เป็นฟิล์มมีดังนี้

1. การระเหยตัวทำละลาย (บางส่วนหรือทั้งหมด)
2. การเกิดเจล
3. การหดตัวของเจล
4. การลดช่องว่างแคปปิลารี



รูปที่ 2.2 การทำเยื่อแผ่นให้เป็นฟิล์ม (Casting) [14]

2.4.2 ตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของเยื่อแผ่น

ตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.4.2.1 ตัวแปรที่เกี่ยวกับส่วนประกอบของสารละลายโพลิเมอร์

- **โพลิเมอร์** จะต้องละลายในตัวทำละลายได้ดีหรือละลายได้ดีในตัวทำละลายชนิดหนึ่งมากกว่าชนิดอื่นๆ (ในกรณีที่มีตัวทำละลายมากกว่าหนึ่งชนิด) เพื่อให้ได้สารละลายเป็นสารเนื้อเดียว
- **ตัวทำละลาย** จะต้องมีความเป็นขั้ว (Polarity) ต่ำ เพื่อจะได้ไม่เกิดการแยกเฟสก่อนขั้นตอนการระเหยตัวทำละลาย เช่น อาซิโตน ไดเมททิลฟอร์มาไมด์ และไดเมททิลซัลฟ็อกไซด์ เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโพลิเมอร์
- **ตัวไม่ละลาย** ต้องใส่ในปริมาณที่พอเหมาะจะทำให้ช่องว่างในโครงสร้างของเจลเพิ่มขึ้น ตัวอย่าง เช่น น้ำ เมทานอล เอทานอล และกรดฟอร์มิก เป็นต้น
- **สารพองตัว** เป็นสารที่เติมเข้าไปเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟส และทำให้ได้เยื่อแผ่นที่เป็นเซลเปิด ซึ่งจะมีความต้านทานการไหลต่ำ ในกรณีที่ไม่เติมสารพองตัวจะไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส เยื่อแผ่นจะมีลักษณะแน่น มีความต้านทานทางการไหลสูง
- **ความเข้มข้น ของสารละลาย** จะขึ้นอยู่กับปริมาณของโพลิเมอร์และตัวทำละลาย เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายจะมีความหนืดสูงขึ้น มีผลให้ขนาดรูพรุน และฟลักซ์ผ่านเยื่อแผ่นที่ได้ลดลง แสดงว่ามีตัวทำละลายไม่เพียงพอที่จะละลายโพลิเมอร์ เมื่อคาสท์เป็นแผ่นฟิล์ม ตัวทำละลายเริ่ม

ระเหยจะเกิดเป็นหยดกลมได้ยากขึ้น การที่รูพรุนจะติดต่อทะลุถึงกันเป็นไปได้ยากขึ้น ความต้านทานการไหลผ่านสูงขึ้น ขนาดรูพรุนเฉลี่ยลดลง และฟลักซ์ลดลง

2.4.2.2 ตัวแปรในการผลิต

- วิธีการเตรียมสารละลาย การเตรียมสารละลายโดยวิธีผสม (การนำเอาองค์ประกอบมาผสมกันแล้วกวน) จะให้ผลที่ดีกว่าวิธีการเตรียมโดยวิธีละลาย (ปล่อยสารละลายให้ละลายอย่างช้าๆ จนเป็นเนื้อเดียวกัน) เพราะว่าโพลิเมอร์ของเยื่อแผ่นที่เตรียมโดยวิธีผสม จะละลายได้ดีและมีแนวโน้มเกิดเป็นไมเซลได้ง่าย และเกิดเป็นโครงสร้างเซลเปิดจำนวนมากในชั้นรองรับโครงสร้างจึงแข็งแรงกว่าการเตรียมด้วยวิธีละลาย ขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่า และฟลักซ์สูงขึ้น

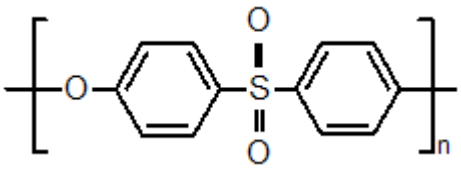
- ช่วงเวลาการปรับตัวของสารละลาย หมายถึง ช่วงเวลาที่ปล่อยสารละลายไว้หลังจากผสมด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งแล้ว ในช่วงเวลานี้ตัวทำละลายก็จะละลายโพลิเมอร์ ดังนั้นถ้ามีการปรับตัวนาน จะทำให้สายโซ่โพลิเมอร์มีขนาดสั้นลง และส่งผลให้เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่

- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ การระเหยตัวทำละลายในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ทำให้การระเหยตัวทำละลายช้าลง ชั้นผิวจะบาง ทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและความสามารถในการไหลผ่านเยื่อแผ่นสูงขึ้น

- เวลาในการระเหย เมื่อปล่อยให้เวลาในการระเหยนานจะส่งผลให้รูพรุนของเยื่อแผ่นมีขนาดเล็กฟลักซ์มีค่าต่ำ เพราะว่าตัวทำละลายถูกระเหยออกไปมากชั้นผิวจำหนาขึ้น

2.5 โพลิอีเทอร์ซัลโฟน (Polyethersulfone, PES)

ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมเยื่อแผ่นแบบ Flat sheet จาก PES ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่ไม่ชอบน้ำ โดยสูตรโครงสร้างของ PES แสดงดังรูปที่ 2.3

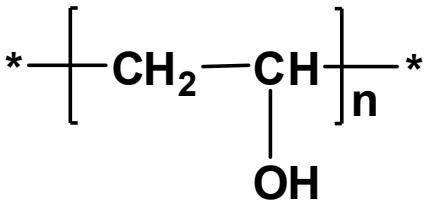


รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของ PES

PES เป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษสำหรับใช้งานเฉพาะทาง เช่นมีคุณสมบัติเชิงกลสูง, ทนความร้อนที่อุณหภูมิสูง, ทนกรด, ทนด่าง, ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมและกระบวนการสูง และมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ คุณสมบัติทางกายภาพของ PES แสดงในตารางที่ 2.1

2.6 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA)

PVA เป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ โดยสูตรโครงสร้างของ PVA แสดงดังรูปที่ 2.4



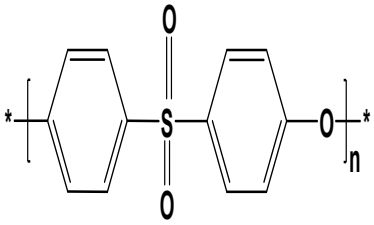
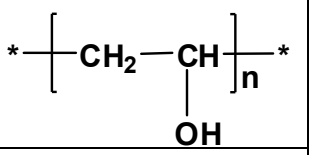
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของ PVA

PVA เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษคือ สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพ และติดไฟได้คล้ายกระดาษ นอกจากนี้ยังสามารถละลายในน้ำได้ การใช้งานของ PVA แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. อาศัยคุณสมบัติการละลายในน้ำ เช่น ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชัน และแขวนลอยต่างๆ เข้มข้นขึ้น (คือใช้ เป็น Thickening agent) และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียว และทนต่อการขีดข่วน

2. นำ PVA ไปทำปฏิกิริยาเคมีให้ไม่ละลายน้ำ แล้วจึงนำมาใช้งาน ซึ่ง PVA ที่ไม่ละลายในน้ำนี้สามารถดูดน้ำและความชื้นได้เป็นอย่างดี (ประมาณ 30% โดยน้ำหนัก) จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายได้ ผ้าที่ทำด้วยเส้นใย PVA นี้สวมใส่สบาย ซักง่าย ทนทานต่อการสึกหรอ และสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี [15], [16] คุณสมบัติทางกายภาพของ PVA แสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของโพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน [15], [17]

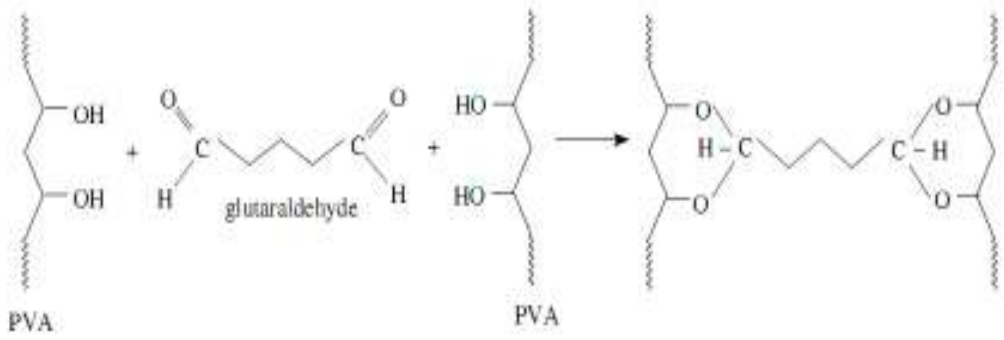
Polymer	Polyethersulfone (PES)	Polyvinyl alcohol (PVA)
โครงสร้าง		
การดูดซึมน้ำ (Water absorption, %)	0.1-0.5 Hydrophobic	Hydrophilic
T_g (Glass transition temperature)	230°C	85°C
การเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน (Heat deflection temperature)	200-250°C	200°C
ตัวทำละลาย	1. n-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) 2. Dimethylacetamide (DMAc)	ละลายได้ในน้ำ
สารเชื่อมขวาง (Crosslinking agent)	-	1. Glutaraldehyde (GA) ($HCO–C_3H_6–CHO$) 2. Borax

2.7 ตัวเชื่อมขวางโพลิเมอร์ (Crosslinker)

ตัวเชื่อมขวางโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมสายโซ่โพลิเมอร์ด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่เชื่อมระหว่าง 2 สายโพลิเมอร์ ทำให้โพลิเมอร์มีสมบัติเป็นเทอร์โมเซตโพลิเมอร์ (Thermosetting polymer) ในทางชีววิทยามีการประยุกต์การเชื่อมขวางของโพลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) ในกระบวนการ Gel Electrophoresis และโปรตีน เป็นต้น

การเชื่อมขวาง (Cross-link) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโพลิเมอร์กับตัวเชื่อมขวาง เช่น ในกระบวนการวัลคาไนส์เซชัน (Vulcanization) ตัวเชื่อมขวางคือซัลเฟอร์ (Sulfur) ทำปฏิกิริยากับโพลิไอโซ-พรีน (Polyisoprene) ทำให้คุณสมบัติของยางแข็งขึ้น และมีความทนทาน ยางนี้ไปใช้ได้ดีกับรถยนต์และรถจักรยาน เป็นต้น [18]

สำหรับในสารละลาย PVA มักมีการเพิ่มสารเชื่อมขวางเพื่อให้เกิดการรวมตัวกัน และทำให้สายโซ่ของโพลิเมอร์แข็งแรงขึ้น โดยสารเชื่อมขวางที่ใช้กับ PVA ส่วนใหญ่ได้แก่ GA และ Borax เป็นต้น ตัวอย่างการเชื่อมขวางของ PVA โดยสารเชื่อมขวางที่ใช้คือ GA แสดงดังรูป 2.5 โดยที่หมู่อัลดีไฮด์ของ GA จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ -OH group ของ PVA



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับ GA [19]

2.8 ฟาวลิง (Fouling) [13]

ฟาวลิง หมายถึงการสะสม/อุดตันของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าเยื่อแผ่นและภายในรูพรุน ทำให้ฟลักซ์ลดลงและการกักกันโมเลกุลเปลี่ยนแปลง อาจกล่าวได้ว่าในกระบวนการแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นของสารผ่านเยื่อแผ่น การเกิด CP นำไปสู่การเกิดฟาวลิง และ/หรือเจล แต่อย่างไรก็ดี ฟาวลิงจะแตกต่างกับเจลในแง่ที่ว่า ชั้นเจลเกิดจากการที่ตัวถูกละลายมีความเข้มข้นสูงถึงขีดจำกัดการละลาย หรือเกิดจากการที่โมเลกุลใหญ่เกิดพันธะเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างร่างแหเมื่อมีสภาวะเหมาะสม ส่วนฟาวลิงเกิดขึ้นด้วยกลไกอื่นและเกิดพันธะหรือแรงกระทำอย่างใกล้ชิดยึดติดแน่นกับเยื่อแผ่น เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้น ควรพิจารณาตำแหน่งการเกิดปรากฏการณ์เหล่านี้ โดยเริ่มต้นจากสารละลายใน Bulk สู่เยื่อแผ่น คือ เกิด CP, เกิดเจล และเกิดฟาวลิงตามลำดับ โดยอาจแยกได้ว่าเจลจะเกิดขึ้นบริเวณผิวเยื่อแผ่น ส่วนชั้นฟาวลิงจะเกิดการดูดซับและการอุดตันของตัวถูกละลายภายในรูพรุนและบนผิวหน้าของเยื่อแผ่นโดยตรง ในกรณีนี้เกิดจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างเยื่อแผ่นและตัวถูกละลาย ส่วนการอุดตันหมายถึงแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกละลายและตัวถูกละลาย โดยแรงกระทำดังกล่าวทำให้ฟาวลิงยึดติดแน่นกับเยื่อแผ่นมากกว่า CP และเจล

ลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของฟาวลิง คือ ไม่สามารถใช้วิธีการเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (เช่น การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล หรือการเปลี่ยนแปลงความดัน) หรือวิธีการทำความสะอาดอย่างง่ายๆ (การล้างด้วยน้ำ) ในการกำจัดชั้นฟาวลิง แต่สามารถกำจัดออกได้โดยใช้สารเคมีทำความสะอาด ซึ่ง

ตรงกันข้ามกับ CP และเจล ที่สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำสะอาด อาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า CP และเจลเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ส่วนฟาวลิงเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ผันกลับ

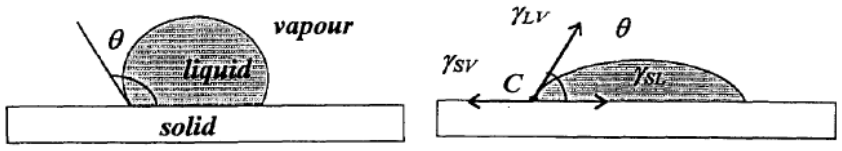
อย่างไรก็ตาม เจลและฟาวลิงก็ไม่สามารถแยกจากกันได้อย่างแท้จริงด้วยลักษณะที่ผันกลับและไม่ผันกลับ คืออาจจะมีฟาวลิงจำนวนเล็กน้อยที่สามารถผันกลับได้ ซึ่งโดยทั่วไปเยื่อแผ่นไม่สามารถกักตัวถูกละลายได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนนี้อาจแปลความหมายได้ว่า ในระหว่างการดำเนินงานของกระบวนการจะมีตัวถูกละลายหลุดออกมาจากฟาวลิงสู่เพอมิเอทอย่างช้าๆ ซึ่งคาดว่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของฟาวลิงสามารถผันกลับได้

2.9 Hydrophobic interaction (HI) [20]

Hydrophobic interaction (HI) เกิดจากแรงวันเดอวาล์วเป็นหลัก ส่วนแรงอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องไม่สามารถกำหนดได้ จึงมีความพยายามอธิบาย HI โดยใช้เทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic) แต่ก็ยังมีส่วนที่อธิบายไม่ได้มากมาย จึงทำให้ไม่สามารถแสดงแรง HI ในรูปสมการได้

คุณสมบัติที่ชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของเยื่อแผ่นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการเลือกเยื่อแผ่นมาใช้ในระบบอัลตราฟิลเตรชัน เมื่อแยกสารละลายโปรตีนที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เยื่อแผ่น Hydrophilic มีคุณสมบัติดีกว่าเยื่อแผ่น Hydrophobic คือ มีฟลักซ์ที่สูงกว่าและเกิด Fouling ต่ำกว่า เนื่องจากโปรตีนมีส่วนที่เป็น Hydrophobic จึงสามารถดูดซับกับเยื่อแผ่น hydrophobic ได้มากด้วยแรง HI และการกำจัด Fouling จากเยื่อแผ่น Hydrophobic นั้นทำได้ยากกว่าเยื่อแผ่น Hydrophilic

กลไกลการดูดซับแบบ HI ระหว่างตัวถูกละลายและเยื่อแผ่นในสารละลายเกิดจากการผลักน้ำจากผิวเยื่อแผ่นและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวถูกละลาย โดยตัวถูกละลายนำส่วน Hydrophobic ไปติดกับผิวเยื่อแผ่น Hydrophobic ซึ่งวิธีวัด Hydrophobicity และ Hydrophilicity ของเยื่อแผ่น มักใช้วิธีวัด Wettability โดยวัด Contact angle (θ) ซึ่งขึ้นกับแรงตึงผิว (Surface tension) ระหว่างเยื่อแผ่นและน้ำเป็นสำคัญ เมื่อ θ มีค่าต่ำ ผิวเยื่อแผ่นจะมีคุณสมบัติ Hydrophilic สูง ในทางตรงกันข้ามถ้า θ มีค่าสูงจะผิวเยื่อแผ่นจะมีคุณสมบัติ Hydrophobic สูงเช่นกัน



รูปที่ 2.6 มุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิวของเยื่อแผ่น

ถ้าหากว่ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90^{o} แสดงว่าสารละลายมีแรงตึงผิวสูง ดังนั้นสารละลายจะไม่สามารถเปียกเยื่อแผ่น แต่ถ้าหากมุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า 90^{o} แสดงว่าสารละลายมีแรงตึงผิวต่ำ และสามารถเปียกเยื่อแผ่นได้ สามารถแสดงสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่จุด C ระหว่างผิวสัมผัสของแข็ง-ของเหลว-ไอ โดยสมการของยัง (Young equation) ดังสมการที่ (2.10)

$$\gamma_{LV}\cos\theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \tag{2.10}$$

โดยที่ γ_{LV} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับไอ (Surface tension for liquid-vapor)

γ_{SV} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับไอ (Surface tension for solid-vapor)

γ_{SV} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว (Surface tension for solid-liquid)

θ คือ มุมสัมผัส (Contact angle)