

บทที่ 2 ทฤษฎี

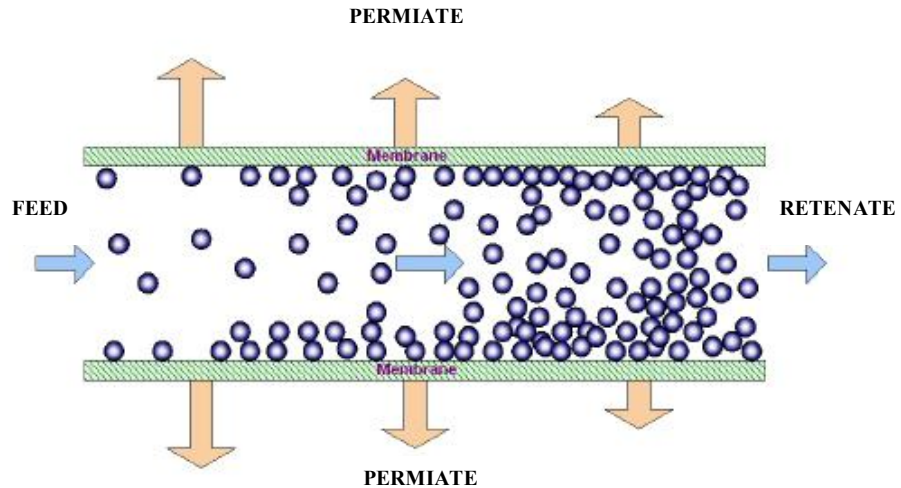
2.1 กระบวนการเมมเบรน (Membrane process) [1]

เยื่อแผ่นหรือเมมเบรน (membrane) คือ ตัวกลางที่เป็นฟิล์มบางๆ ที่ทำหน้าที่กั้นระหว่าง 2 เฟส เพื่อทำการแยกสารละลายผสมหรือก๊าซผสม หรือเพื่อเพิ่มความเข้มข้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อทำให้สารบริสุทธิ์มากขึ้น ดังนั้นเยื่อแผ่นที่ดีจะต้องมีลักษณะสำคัญ คือ มีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น (semi-permeable/permeable) โดยการเลือกผ่านของสารแต่ละชนิดจะเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีหรือลักษณะทางกายภาพของเยื่อแผ่น หลักการที่สำคัญของกระบวนการเยื่อแผ่น คือจะต้องมีแรงขับเคลื่อนที่ทำให้ของผสมหรือสารละลายไหลผ่านเยื่อแผ่นและเกิดการแยกออกจากกัน เช่น ผลต่างของความเข้มข้น หรือผลต่างของความดัน เป็นต้น

2.2 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน [21]

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการเยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกและเพิ่มความเข้มข้นของสาร หลักการของ UF แสดงดังรูปที่ 2.1 คือเมื่อป้อนสารละลายเข้าสู่ระบบของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ ตัวทำละลาย และสารโมเลกุลเล็กหรือน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะสามารถผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นไปได้ภายใต้ความดันที่ให้ ส่วนที่ผ่านเยื่อแผ่นไปได้นี้ เรียกว่าเพอเมอเทต (permeate) ในขณะที่ตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนหรือน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า MWCO ของเยื่อแผ่นจะถูกกักไว้ ทำให้รีเทนเตต (retentate) มีความเข้มข้นสูงกว่าสารละลายป้อน ซึ่งส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์อาจเป็นรีเทนเตตหรือเพอเมอเทตหรือทั้งสองส่วน

UF เป็นกระบวนการซึ่งใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 0.001-0.1 μm และสามารถกักโมเลกุลของตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 500-500,000 Da โดยมีความดันเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นของสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน, เอนไซม์ และโพลีแซคคาไรด์ เป็นต้น ซึ่งสารโมเลกุลใหญ่เหล่านี้ จะมีความดันออสโมติกต่ำมาก ดังนั้นความดันที่ใช้ประมาณ 1-10 bar ก็สามารถแยกสารโมเลกุลใหญ่เหล่านี้ได้ ตัวอย่างเช่น กระบวนการแยกและเพิ่มความเข้มข้นของ เอนไซม์และโปรตีน, กระบวนการแยกนมและหางนม (whey) และกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นน้ำผลไม้



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงหลักการของกระบวนการอัลตราฟิเตรชัน

2.3 ฟลักซ์และค่าการกักกัน (Flux and Rejection) [22]

ฟลักซ์และค่าการกักกันเป็นค่าที่แสดงสมรรถนะของกระบวนการ สมการฟลักซ์เขียนในรูปของแรงขับเคลื่อนและความต้านทานต่อการไหล ดังนี้

$$J_v = \frac{(\Delta P - \Delta \pi)}{\mu_v R_t} \quad (2.1)$$

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

สำหรับสารละลายของสารโมเลกุลใหญ่ค่า $\Delta \pi \ll \Delta P$ ลดรูปได้เป็น

$$J_v = \frac{(\Delta P)}{\mu_v R_t} \quad (2.2)$$

ความต้านทานรวมต่อการไหลในกระบวนการ UF อธิบายโดยใช้แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (resistance-in-series model)

$$R_t = R_m + R_p + R_f \quad (2.3)$$

- เมื่อ R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น
- R_f = ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง เป็นการสะสมและอุดตันของสารที่ผิวและในรูพรุนของเยื่อแผ่น ซึ่งไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำสะอาด
- R_{cp} = ความต้านทานภายนอกเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันเป็นการสะสมและอุดตันของสารที่สามารถล้างออกด้วยน้ำสะอาด

ซึ่งความต้านทานต่างๆ ข้างต้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

ความต้านทานของเยื่อแผ่น คำนวณได้จากฟลักซ์ของน้ำสะอาด

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu_w J_w} \quad (2.4)$$

- เมื่อ R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น (m^{-1})
- ΔP = ความดันที่ให้กับระบบ (Pa)
- μ_w = ความหนืดของน้ำสะอาด (Pa·s) ที่ 25 °C มีค่า 8.9793×10^{-4} Pa·s
- J_w = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดก่อนการใช้งาน

เมื่อล้างเยื่อแผ่นที่ผ่านการใช้งานด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดชั้นโพลาไรซ์ แล้ววัดฟลักซ์ของน้ำสะอาด

ความต้านทานที่คำนวณได้ คือ ความต้านทานของเยื่อแผ่นรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง ซึ่งคำนวณจากสมการ

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

- เมื่อ $R_m + R_f$ = ความต้านทานของเยื่อแผ่นรวมกับความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิงของสารป้อน (m^{-1})
- J'_w = ฟลักซ์ของน้ำสะอาดที่ผ่านเยื่อแผ่นหลังจากล้างเยื่อแผ่นด้วยน้ำสะอาด ($m^3/m^2 s$)

ดังนั้น ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิง คำนวณได้จาก

$$R_f = (R_m + R_f) - R_m \quad (2.6)$$

และคำนวณความต้านทานเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันจาก

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

ในส่วนของการกักกันเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกักสารของเยื่อแผ่น มีค่าในช่วง 0 – 100 % ซึ่งค่าการกักกันหาได้จากการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโปรตีน สำหรับค่าการกักกันสามารถคำนวณเป็นเศษส่วน หรือเปอร์เซ็นต์ ดังนี้

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

โดย C_p และ C_r เป็นความเข้มข้นขององค์ประกอบในเฟอมีอเทและรีเทนเทตามลำดับ ส่วนค่า R จากสมการข้างต้น เป็นค่าปรากฏเนื่องจากปรากฏการณ์ concentration polarization (CP) ทำให้ตัวถูกละลายโมเลกุลใหญ่สะสมอยู่ที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น ส่งผลให้ความเข้มข้นที่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่น (C_w) มีค่าสูงกว่า C_r ค่าการกักกันจริง R_{int} สูงกว่าค่าการกักกันปรากฏ โดยที่

$$R_{in} = (1 - \frac{C_p}{C_w}) \times 100 \quad (2.9)$$

2.4 ผลของตัวแปรที่มีต่อสมรรถนะของอัลตราฟิลเตรชัน [23]

ผลของตัวแปรในการดำเนินการที่มีต่อฟลักซ์และค่าการกักกันในกระบวนการ UF

2.4.1.ความดัน สำหรับสารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลใหญ่ที่สามารถเกิดเจลได้ที่มีความเข้มข้นสูง ฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นกับความดันในช่วงแรกหรือก่อนการเกิดเจล และในช่วงการเกิดเจล แรงขับเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ชั้นเจลอัดแน่น ดังนั้นฟลักซ์จึงไม่เพิ่มขึ้นแต่มีแนวโน้มคงที่ ในส่วนการกักกันจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นเจลตามที่ได้กล่าวมาแล้ว และอาจขึ้นอยู่กับเกิดการฟาวลิงด้วย สำหรับระบบที่ความเข้มข้นต่ำและตัวทำละลายไม่สามารถเกิดเจลได้ การเพิ่มความดันทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มมักจะช้าลงในช่วงความดันสูงขึ้น ซึ่งเนื่องจากผลของการเกิด CP

2.4.2.อัตราการไหล การเพิ่มอัตราการไหลหรือความเร็วในการป้อนสารละลายจะช่วยลดการเกิด CP และฟาวลิง การเพิ่มความเร็วเป็นการเพิ่มอัตราการเฉือนที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น ทำให้ชั้นของตัวถูกละลายที่สะสมอยู่หลุดออกไปได้

2.4.3.อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ฟลักซ์สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยให้ความหนืดลดลงและสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้น

2.4.4.ความเข้มข้น ฟลักซ์แปรผกผันกับความเข้มข้น เพราะในระบบที่ความเข้มข้นสูงโอกาสที่จะเกิด CP เกิดเจลและฟาวลิงสูงกว่าระบบที่มีความเข้มข้นต่ำ

2.5 ฟาวลิง (fouling) [23]

ฟาวลิง หมายถึงการสะสม/อุดตันของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าเยื่อแผ่นและภายในรูพรุน ทำให้ฟลักซ์ลดลงและการกักกันโมเลกุลเปลี่ยนแปลง อาจกล่าวได้ว่าในกระบวนการแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นของสารผ่านเยื่อแผ่น การเกิด CP นำไปสู่การเกิดฟาวลิง และ/หรือเจล แต่อย่างไรก็ดี ฟาวลิงจะแตกต่างกับเจลในแง่ที่ว่า ชั้นเจลเกิดจากการที่ตัวถูกละลายมีความเข้มข้นสูงถึงขีดจำกัดการละลายหรือเกิดจากการที่โมเลกุลใหญ่เกิดพันธะเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างร่างแหเมื่อมีสภาวะเหมาะสม ส่วนฟาวลิงเกิดขึ้นด้วยกลไกอื่นและเกิดพันธะหรือแรงกระทำอย่างใกล้ชิดยึดติดแน่นกับเยื่อแผ่นเพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้น ควรพิจารณาคำแนะนำการเกิดปรากฏการณ์เหล่านี้ โดยเริ่มต้นจากสารละลายใน bulk สู່เยื่อแผ่น คือ เกิด CP, เกิดเจล และเกิดฟาวลิงตามลำดับ โดยอาจแยกได้ว่าเจลจะเกิดขึ้นบริเวณผิวเยื่อแผ่น ส่วนชั้นฟาวลิงจะเกิดการดูดซับและการอุดตันของตัวถูกละลายภายในรูพรุนและบนผิวหน้าของเยื่อแผ่นโดยตรง ในกรณีนี้เกิดจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างเยื่อแผ่นและตัวถูกละลาย ส่วนการอุดตันหมายถึงแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างทำถูกละลายและตัวถูกละลาย โดยแรงกระทำดังกล่าวทำให้ฟาวลิงยึดติดแน่นกับเยื่อแผ่นมากกว่า CP และเจล

ลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของฟาวลิง คือ ไม่สามารถใช้วิธีการเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (เช่น การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล หรือการเปลี่ยนแปลงความดัน) หรือวิธีการทำความสะอาดอย่างง่าย ๆ (การล้างด้วยน้ำ) ในการเกิดขึ้นของฟาวลิงนั้นสามารถกำจัดออกได้โดยใช้สารเคมีทำความสะอาดซึ่งตรงกันข้ามกับ CP และเจล ความสามารถทำให้ฟลักซ์กลับคืน การเปลี่ยนสภาวะการทำงาน หรือการล้างด้วยน้ำ อาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า CP และเจลเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ส่วนฟาวลิงเป็นกระบวนการที่ผันกลับและไม่ผันกลับ

อย่างไรก็ตามเจลและฟาวลิงก็ไม่สามารถแยกจากกันได้อย่างแท้จริงด้วยลักษณะที่ผันกลับและไม่ผันกลับ คืออาจจะมีฟาวลิงจำนวนเล็กน้อยที่สามารถผันกลับได้ ซึ่งโดยทั่วไปเยื่อแผ่นไม่สามารถกักตัวถูกละลายได้ถึง 100% ในส่วนนี้อาจแปลความหมายได้ว่า ในระหว่างการดำเนินงานของกระบวนการจะมีตัวถูกละลายหลุดออกมาจากฟาวลิงสู่เพอมีเอทอย่างช้าๆ ซึ่งคาดว่าประมาณ 10% ของฟาวลิงสามารถผันกลับได้ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอรูปแบบการเกิดฟาวลิง ที่สัมพันธ์กับค่าการกักกัน พบว่าเมื่อเริ่มต้นการดำเนินงานตัวถูกละลายจำนวนแรกที่เกิดขึ้นที่สู่เยื่อแผ่นจะผ่านออกเพอมีเอทได้ง่าย เนื่องจากยังไม่มีชั้นฟาวลิง ค่าการกักกันในช่วงนี้จึงต่ำมาก และเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการดูดซับและการอุดตัวด้วยแรงกระทำต่างๆ บนผิวหน้าหรือภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นจนเต็มพื้นที่ของเยื่อแผ่น หลังจากนั้นตัวถูกละลายจะผ่านรูพรุนออกสู่เพอมีเอทน้อยลง เนื่องจากชั้นฟาวลิงเพิ่มความสามารถในการกักกันตัวถูกละลาย ดังนั้นค่าการกักกันจะมีค่าเพิ่มขึ้น

2.6 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นจากโพลิเมอร์ [24]

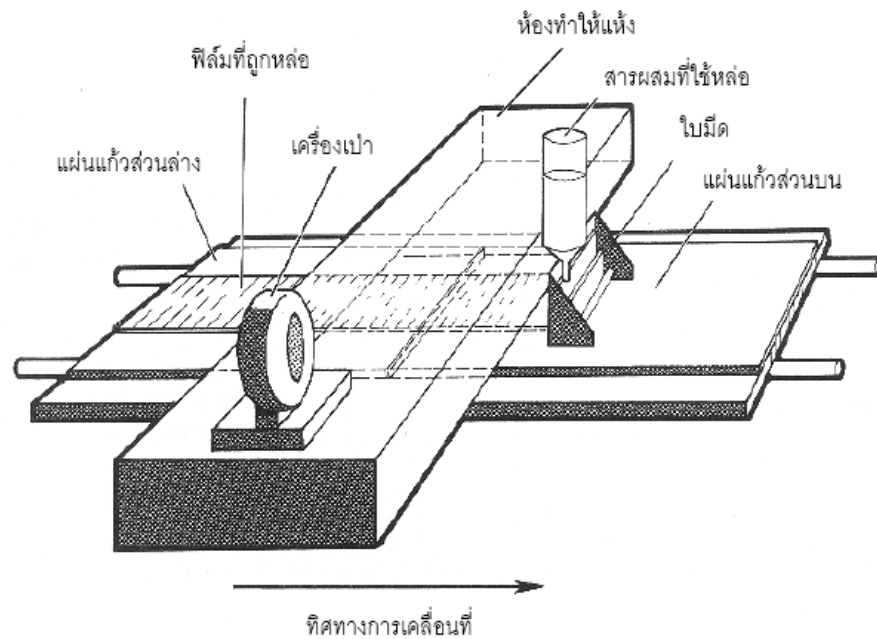
วิธีการเปลี่ยนเฟส (phase inversion method)

วิธีการผลิตนี้ใช้กันมากที่สุด ในการผลิตเยื่อแผ่นที่จำหน่ายทั่วไป การเปลี่ยนเฟส หมายถึง การทำให้สารละลายโพลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบหนึ่งๆ เปลี่ยนจากสารละลายเนื้อเดียว (homogeneous) ที่เรียกว่า โซล 1 (sol) ไปเป็นสารละลายเนื้อผสมหรือโซล 2 จากนั้นจะเปลี่ยนไปเป็นเจล โดยระหว่างการเปลี่ยนแปลงจะเกิดชั้นผิว และรูพรุนภายในฟิล์มหรือเจลได้

สารละลายสำหรับผลิตเยื่อแผ่นโดยทั่วไปประกอบด้วยโพลิเมอร์ตัวทำละลาย ตัวไม่ละลาย และสารพองตัว (swelling agent) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนปริมาณองค์ประกอบต่างๆ โดยจะส่งผลต่อสมบัติของเยื่อแผ่นที่ได้ การเปลี่ยนเฟสสามารถทำได้โดยการระเหยตัวทำละลายออกจากสารละลายโพลิเมอร์หรือการลดอุณหภูมิของสารละลายโพลิเมอร์ ซึ่งทั้ง 2 วิธีเป็นการลดความสามารถในการละลายของโพลิเมอร์และกลไกการเกิดเยื่อแผ่นก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

เมื่อผสมสารละลายโพลิเมอร์ในสัดส่วนที่ต้องการ จะต้องปล่อยสารละลายนี้ไว้ที่อุณหภูมิคงที่พร้อมต้องกวนตลอดเวลา ช่วงเวลานี้คือการปรับตัว (maturation time) ซึ่งตัวทำละลายจะแทรกซึมไปละลายโพลิเมอร์และในบางกรณีอาจทำให้สายโซ่โพลิเมอร์สั้นลง จากนั้นนำสารละลายโพลิเมอร์มาทำให้เป็นฟิล์มบาง (casting) บนแผ่นแก้วหรือชั้นรองรับ โดยใช้ใบมีดที่สามารถปรับค่าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยขั้นตอนนี้ควรทำในบรรยากาศที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ขั้นตอนที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำให้เป็นฟิล์มมีดังนี้

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



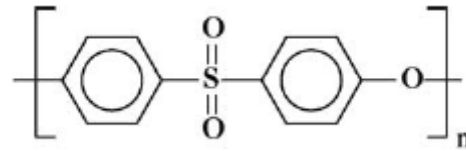
รูปที่ 2.2 การทำเยื่อแผ่นให้เป็นฟิล์ม (casting) [24]

ผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับชนิด และสมบัติของเยื่อแผ่น สามารถแบ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ส่วนประกอบของสารละลายโพลิเมอร์และตัวแปรในการผลิต โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ส่วนประกอบของสารละลายโพลิเมอร์มีดังนี้

1. โพลิเมอร์ควรจะละลายในตัวทำละลายได้ดี เพื่อให้ได้สารละลายเนื้อเดียว และควรเป็นชนิดชอบน้ำจะทำให้มีค่าฟลักซ์สูง เช่น เซลลูโลสอะซิเตต พอลิเอไมด์ เป็นต้น
2. ตัวทำละลาย ควรมีความหนืดต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการแยกเฟสก่อนขึ้นตอนการระเหย ตัวทำละลาย เช่น อะซิโตน ไดมethylฟอร์มาไมด์ เป็นต้น
3. ตัวไม่ละลาย ต้องใส่ในปริมาณที่เหมาะสม เพราะจะก่อให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างของเจลเพิ่มขึ้น เช่น น้ำ เมทานอล เป็นต้น
4. สารพองตัว คือ สารที่เติมลงไปเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟส (มีสมบัติอยู่ระหว่างตัวทำละลาย และตัวไม่ละลาย) และทำให้เยื่อแผ่นมีโครงสร้างเป็นเซลล์เปิด เช่น เบนซีน ลิเทียมคลอไรด์ เป็นต้น

2.7 โพลีเอเทอร์ซัลโฟน (polyethersulfone, PES) [25]

ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมเยื่อแผ่นแบบ flat sheet จาก PES ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่ไม่ชอบน้ำ โดยสูตรโครงสร้างของ PES เป็นดังนี้

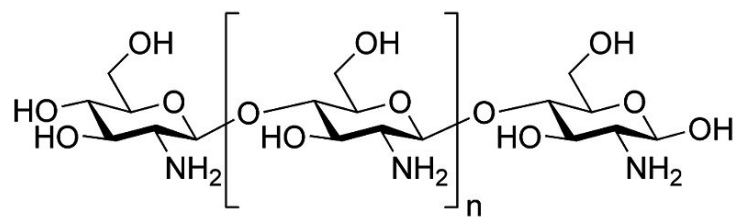


รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของ PES

PES เป็นโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษสำหรับใช้งานเฉพาะทาง เช่น มีคุณสมบัติเชิงกลสูง, ทนความร้อนที่อุณหภูมิสูง, ทนกรด, ทนด่าง, ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมและกระบวนการสูง และมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ

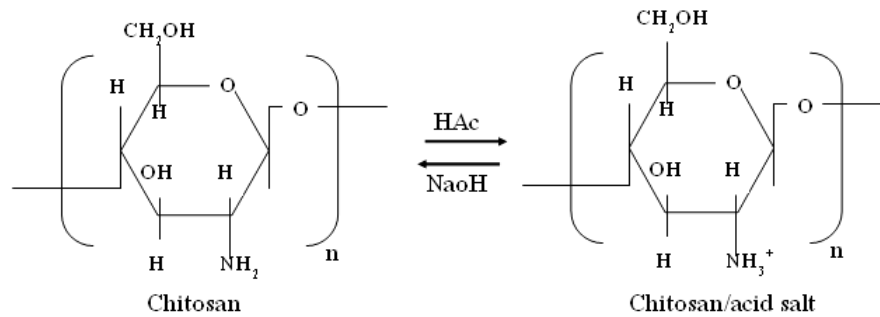
2.8 ไคโตซาน [26]

ไคโตซาน (chitosan, CS) มาจากการ deacetylation ของไคติน โดยไคตินพบได้จากธรรมชาติ ได้แก่ เปลือกกุ้ง เปลือกปู โดยส่วนประกอบของเปลือกจะประกอบด้วยโปรตีน 30-40% เกลือแร่ 30-50% และไคติน 13-42% อีกทั้งไคตินยังมีมากในเปลือกหุ้มของแมลงก้นดอ ผนังเซลล์ของสาหร่าย ยีสต์ และเห็ดรา เปลือกแมลง แกนของปลาหมึก แมงกะพรุน หรือดาวทะเลอีกด้วย ไคตินมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเซลลูโลสดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของ CS

CS มีทั้งหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่อะมิโน จึงง่ายต่อการเกิดอันตรกิริยาเป็นกรดเกลือ CS เสถียรต่อตัวทำละลาย และมีความชอบน้ำสูงเมื่ออยู่ในสถานะเป็นกลางจะไม่ละลายน้ำ เนื่องจากมีหมู่เอมีนอิสระ ($-\text{NH}_2$) แต่จะละลายเมื่ออยู่ในสารละลายกรด โดยหมู่เอมีนอยู่ในรูปเกลือของกรด ($-\text{NH}_3^+$) ดังแสดงดังรูปที่ 2.5 CS สามารถเตรียมได้โดยละลาย CS ในสารละลายกรด เช่น กรดอะซิติก จากนั้นเคลือบบนเยื่อแผ่น แล้วนำเยื่อแผ่นที่ได้แช่ในสารละลายเบสเพื่อเปลี่ยนหมู่ $-\text{NH}_3^+$ กลับมาอยู่ในรูป $-\text{NH}_2$



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนรูปของ CS ให้อยู่ในรูปของกรดเกลือของ CS

2.9 วัสดุเซรามิก [27, 28]

เซรามิก (Ceramic) เป็นวัสดุโครงสร้างผลึกที่ประกอบด้วยโลหะและอโลหะ เกิดพันธะไอออนิกและ/หรือพันธะโควาเลนต์เป็นสารอนินทรีย์ เซรามิกเป็นสารที่แข็งแต่เปราะ เช่น MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , Si_3N_4 , SiC , TiC , TiO_2 เป็นต้น

วัสดุเซรามิกสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

1. เซรามิกแบบดั้งเดิม (Traditional ceramic) ได้แก่ ถ้วย จานชาม สุขภัณฑ์ ลูกถ้วยไฟฟ้า กระเบื้องปูพื้นและบุผนัง กระเบื้องหลังคา วัสดุทนไฟ แผ่นรองเผาในเตา อิฐก่อสร้าง กระถางต้นไม้ โอ่ง กระຈกและแก้ว ปูนซีเมนต์ ยิปซัม ปูนปลาสเตอร์ เป็นต้นซึ่งทำมาจากวัสดุหลักคือดินดำ ดินขาว ดินแดง หินฟันม้า ทราย หินปูน หินผุ ควอตซ์ และแร่อื่นๆ

2. เซรามิกวิศวกรรม (Engineering ceramic) เป็นวัสดุเซรามิกที่มีความแข็งแรงสูง หรือมีการใช้งานเฉพาะ ได้แก่ สารพวก Al_2O_3 ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ซึ่งมีความแข็งแรงสูงมากแต่โดยส่วนใหญ่เยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการ UF ผลิตจากวัสดุโพลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ เนื่องจากมีข้อดีคือ สามารถเกิดเป็นฟิล์มได้ดี ยึดหยุ่นสูง ทนทาน มีคุณสมบัติในการแยกและราคาถูก แต่จะเกิดฟาวลิงได้ง่าย ทำให้ค่าฟลักซ์ต่ำลง ในขณะที่เยื่อแผ่นที่ผลิตจากวัสดุอนินทรีย์ เช่น Al_2O_3 , ZrO_2 และ TiO_2 เป็นต้น โดยสามารถทนความร้อน สารเคมี และต้านทานการเกิดฟาวลิงได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านราคาและความทนทาน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตเป็นเยื่อแผ่นต่ำลง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Al_2O_3 ในการใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติชอบน้ำของเยื่อแผ่น PES เนื่องจากเมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่าง Al_2O_3 และ TiO_2 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่า Al_2O_3 มีค่า contact angle ต่ำกว่า TiO_2 ซึ่งแสดงว่า Al_2O_3 มีคุณสมบัติชอบน้ำที่สูงกว่า TiO_2

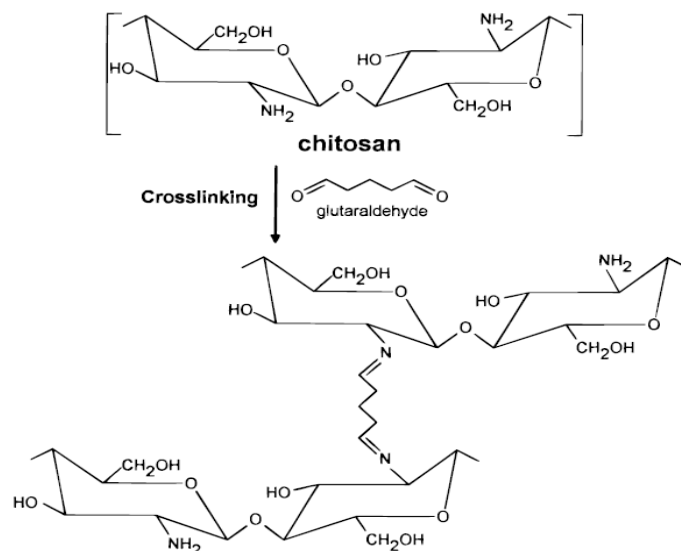
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติ Al_2O_3 และ TiO_2 [27]

คุณสมบัติ	TiO_2	Al_2O_3
apparent porosity (%)	0.26	0.32
water absorption (%)	0.04	0.08
apparent specific density (g/cm^3)	4.01	3.91
roughness (μm)	1.67	1.19
contact angle ($^\circ$)	44	37

2.10 การเชื่อมขวาง

การเชื่อมขวางโพลิเมอร์ เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของโพลิเมอร์โดยการเติมสารเชื่อมขวางเข้าไปเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของโพลิเมอร์หลัก ซึ่งปฏิกิริยาการเชื่อมขวางนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณโพลิเมอร์ อุณหภูมิ เป็นต้น

สารเชื่อมขวางที่นิยมนำมาใช้เชื่อมขวางสายโซ่ของ CS ได้แก่ malic acid (MA) [29], GA [30,31], Borax [14] แต่ GA เป็นสารเชื่อมขวางที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจาก GA สามารถผสมกับ CS ได้โดยตรง และเมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่น ระยะเวลาในการเชื่อมขวางของ GA ก็สั้นกว่าสารเชื่อมขวางชนิดอื่นด้วย โดย GA สามารถแสดงการเชื่อมขวางกับโมเลกุลของ CS ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเชื่อมขวางโมเลกุลของ CS ด้วย GA

2.11 คุณสมบัติเชิงกล [32]

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมีความสำคัญอย่างสูงต่อการนำวัสดุไปใช้งาน เนื่องจากไม่ว่าจะเป็น การประยุกต์ใช้งานวัสดุในการทำผลิตภัณฑ์ใดก็ตาม ผลิตภัณฑ์เหล่านั้นย่อมที่จะต้องมีการรับแรง กระแทกหรือพลังงานเชิงกลภายนอกไม่มากก็น้อย ซึ่งการที่ผู้ออกแบบทราบถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุ ที่นำมาใช้งาน จะช่วยให้สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องและเลือกนำไปใช้ได้งานได้ เหมาะสมและปลอดภัย

การทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การตรวจวัดสมบัติของวัสดุในการรับภาระหรือแรงกระทำลักษณะ ต่างๆในเชิงปริมาณ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้เพื่อประโยชน์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ ผลิตภัณฑ์นั้นๆไม่ว่าจะเป็น การตรวจสอบคุณภาพ การเปรียบเทียบ หรือการจัดลำดับ ดังนั้นผลการ ทดสอบที่ได้จะต้องสามารถเปรียบเทียบกันได้ แม้จะทดสอบจากห้องปฏิบัติการที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปจุดประสงค์ของการทดสอบสมบัติเชิงกล

2.11.1. ความเค้น

ความเค้น (Stress, σ) คือ แรงต้านทานภายในวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่ง หน่วยพื้นที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดค่านี้ เรามักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วย พื้นที่ ดังสมการที่ 2.10 ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงกระทำภายนอกมีสมมูลกับแรงต้านทาน ภายใน

$$\text{ความเค้น} = \frac{F}{A} \quad (2.10)$$

เมื่อ F = แรงดึง
 A = พื้นที่หน้าตัด

2.11.2 ความเครียด

ความเครียด (Strain, ϵ) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.11.2.1 การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (elastic deformation or elastic strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้

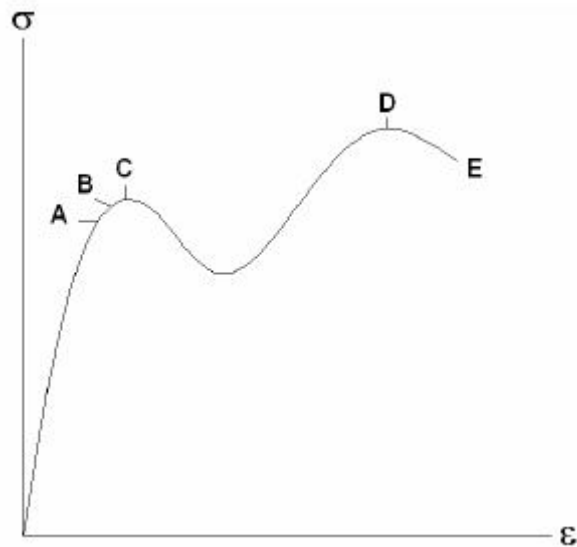
2.11.2.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (plastic deformation or plastic strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่แม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

โดยที่ความเครียดหาได้จาก

$$\text{ความเครียด} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.11)$$

เมื่อ ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป
 L = ความยาวเดิม

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress-strain relationship) แสดงได้โดยใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (tensile test) เป็นหลัก โดยจะเขียนค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูปที่ 8 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ (brittleness) ความเหนียว (ductility) ของวัสดุ และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างเส้นโค้งความเค้น- ความเครียด

ในการหาเส้นโค้งความเค้น – ความเครียดนั้นจะนำตัวอย่างที่ทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้จึงมาเขียนเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.7 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ทดสอบ และมาตรฐานของการทดสอบ เช่น มาตรฐานการทดสอบ ASTM (American Society of Testing and Materials) ของสหรัฐอเมริกา มาตรฐาน BS (British Standards) ของอังกฤษ มาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standards) ของญี่ปุ่นหรือ มอก.(มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเป็นที่เชื่อถือและเปรียบเทียบกันได้ พร้อมกับได้กำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย

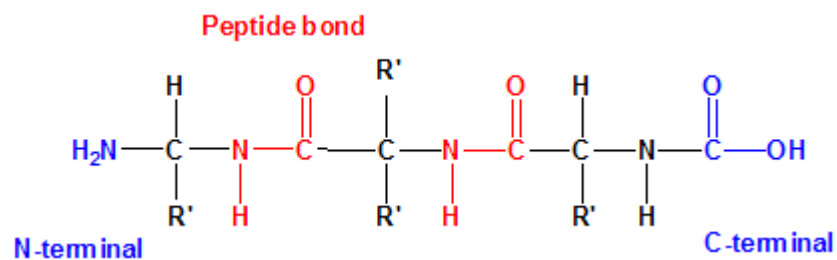
นอกจากนี้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ยังสามารถใช้บอกค่าความเหนียว (ductility) ของวัสดุได้ โดยค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นค่าร้อยละของการยืดตัว (% elongation at break, %EI) ซึ่งค่าร้อยละของการลดลงของพื้นที่ภาคตัดขวาง (reduction of area) ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่าร้อยละของการยืดตัวมากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูป คือ ถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (% EI สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูปได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

$$\% \text{ elongation at break (\%EI)} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2.12)$$

เมื่อ L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด
 L_0 = ความยาวของเกจเริ่มต้น

2.12 สารละลายโปรตีน

สารละลายโปรตีนในการกรองเพื่อทดสอบคุณสมบัติของเยื่อแผ่นเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อน ไม่มีจุดหลอมเหลวหรือจุดสลายตัวที่แน่นอน ตัวอย่างโปรตีนที่รู้จักกันดี ได้แก่ แอลบูมิน (albumin) เคซีน เจลาติน เป็นต้น โปรตีนมีน้ำหนักสูงอาจมีค่าได้ตั้งแต่ 15,000 - 20,000,000 หน่วย พื้นฐานที่เล็กที่สุดของโปรตีนคือ กรดอะมิโนชนิดต่างๆ ที่เชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 2.8 กรดอะมิโนประกอบด้วยหมู่ $-NH_2$ และ $-COOH$ ซึ่งต่างมีขั้วสูง มีจุดหลอมเหลวที่สูง ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละลายในน้ำ จะได้เป็นสารละลายคอลลอยด์ (colloidal solution) สามารถใช้เยื่อแผ่นแยกโปรตีนออกจากสารที่ละลายได้ โปรตีนอาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน หรือ pH ของสารละลายนั้นๆ กรดอะมิโนและโปรตีนแต่ละตัวจะมี pH คงที่ค่าหนึ่งที่ทำให้สภาพที่เป็นไอออนขั้วคู่ (dipolar ion) คือ มีประจุไฟฟ้าเป็นกลางหรือศูนย์ ค่า pH นี้เรียกว่า จุด iep ค่านี้สารละลายไม่จำเป็นต้องเป็นกลาง ($pH = 7$) แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโนหรือโปรตีนชนิดนั้นๆ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของโปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนที่เชื่อมขวางกันอยู่ด้วยพันธะเปปไทด์

อัลบูมิน หรือเรียกว่า BSA เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ MW 67000 มีขนาดอนุภาคประมาณ $64 \text{ \AA}$ คุณสมบัติของ BSA มีจุด iep ของ BSA มีค่า $pH 4.7 - 4.9$ ซึ่งที่ pH ที่จุด iep สารละลาย BSA จะมีประจุเป็นศูนย์ ส่วน $pH > iep$ สารละลาย BSA จะมีประจุลบ และ $pH < iep$ สารละลาย BSA จะมีประจุบวก