

บทที่ 3

ทฤษฎี

เชื้อจุลินทรีย์

Clostridium acetobutylicum ATCC 824 เป็นเชื้อแบคทีเรีย รูปร่างเป็นแท่งขนาดยาว 4 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมโครเมตร เคลื่อนที่ได้โดยใช้แฟลกเจลลารอบๆเซลล์ เจริญได้ดีในอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตแบบเดี่ยว หรือแบบโพลีเมอร์ ใช้เกลือแอมโมเนียม กรดอะมิโน เป็นแหล่งให้ไนโตรเจน เจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 29-35 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด ต่างระหว่าง 4.5-6.8 ในสภาวะไร้ออกซิเจน ใช้ในการหมักเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ คือ อะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล

การแยกสารด้วยเยื่อแผ่น (Membrane Separation)

การแยกสารด้วยเยื่อแผ่น เป็นกระบวนการแยกที่ใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ในการแยกสาร โดยอาศัยความแตกต่างของขนาด หรือ น้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลาย สำหรับสารละลายที่ประกอบด้วยโมเลกุลของสารตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เยื่อแผ่นจะยอมให้ตัวทำละลาย และโมเลกุลของสารชนิดหนึ่ง ๆ ผ่านไปได้มากกว่าโมเลกุลของสารอื่น การแยกสารด้วยเยื่อแผ่นจะแบ่งตามแรงขับ(driving force) ที่ทำให้โมเลกุลของสารผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่น ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงชนิดกระบวนการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นแบ่งตามแรงขับ(driving force)(17)

Separation process	Membrane type	Driving force	Method of separation
Microfiltration	symmetric microporous membrane , 0.1-10 μm pore radius	hydrostatic pressure difference, 10-500 kPa	sieving mechanism and adsorption
Ultrafiltration	asymmetric microporous membrane, 1-10 nm pore radius	hydrostatic pressure difference , 0.1-1 MPa	sieving mechanism
Reverse osmosis	asymmetric skin-type membrane	hydrostatic pressure difference , 2-10 Mpa	solution diffusion mechanism
Dialysis	symmetric microporous membrane , 0.01-1 μm pore radius	concentration gradient	diffusion in convection-free layer
Gas separation	asymmetric homogeneous polymer membrane	hydrostatic pressure and concentration gradient	solubility , diffusion
Pervaporation	asymmetric homogeneous polymer membrane	vapor pressure gradient	solubility , diffusion
Electrodialysis	cation and anion exchange membranes	electrical potential gradient	electrical charge of partical and size

ในกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ และอุตสาหกรรมต่างๆ กระบวนการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นเริ่มมีบทบาทมากขึ้น เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการแยกสูง และสามารถประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม จากคุณสมบัติของการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นสามารถอธิบายข้อดี และข้อเสียได้เป็นข้อๆ ดังนี้

ข้อดีของการแยกสารด้วยเยื่อแผ่น

1. แยกสารแบบคัดเลือกขนาดอนุภาค

การแยกสารอาศัยความแตกต่างของขนาด หรือน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลาย ทำให้สามารถแยกสารที่ภาวะปกติของสารนั้นๆ ได้ คุณสมบัติเดิมของสารที่ต้องการแยกไม่เปลี่ยนแปลง เหมาะสมกับการแยกสารที่มีความไวต่ออุณหภูมิ เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเหลว ผลิตภัณฑ์ยา และผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม เป็นต้น

2. ใช้พลังงานในการแยกต่ำ

เนื่องจากสามารถแยกสารได้ที่ภาวะปกติของสารนั้นๆ จึงไม่ต้องการพลังงานในการเปลี่ยนสถานะของสาร ทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ดีเมื่อเทียบกับการแยกสารที่ต้องการพลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ เช่น การกลั่น การต้มระเหย เป็นต้น

3. อัตราการเก็บกักสูง

การแยกสารด้วยเยื่อแผ่นมีอัตราการเก็บกักสูง สามารถแยกสารที่ต้องการได้มีความบริสุทธิ์สูง ทำให้ปริมาณของเสียที่ออกจากระบบมีน้อยมาก

4. อุปกรณ์มีลักษณะเป็นโมดูล

การเพิ่มขนาดกำลังการผลิตของอุปกรณ์แยกสารโดยทั่วไป เช่น หอกกลั่น หอดูดซับ ทำได้ลำบาก เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การแยกสารด้วยเยื่อแผ่น เนื่องจากอุปกรณ์การแยกสารด้วยเยื่อแผ่นมีลักษณะเป็นโมดูล การเพิ่มขนาดกำลังการผลิตทำได้โดยง่ายเพียงแค่เพิ่มจำนวนโมดูลเท่านั้น

5. สามารถทำการแยกสารได้โดยต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง

การแยกสารด้วยเยื่อแผ่นสามารถทำการแยกได้อย่างต่อเนื่อง และครั้งคราวได้การควบคุมแบบอัตโนมัติทำได้โดยง่ายไม่ซับซ้อน เมื่อเทียบกับกระบวนการแยกอื่น ๆ

6. ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย

เนื่องจากอุปกรณ์การกรองด้วยเยื่อแผ่นมีพื้นที่ในการกรองต่อปริมาตรสูง ทำให้อุปกรณ์มีขนาดกระทัดรัด มีความต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย

ข้อเสียของการแยกสารด้วยเยื่อแผ่น

1. เกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

การแยกสารด้วยเยื่อแผ่นเมื่อทำการแยกสารที่มีความเข้มข้นสูงและมีขนาดเล็กมาก ๆ เป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการอุดตันของอนุภาคบริเวณผิวเยื่อแผ่น ปริมาณสารที่ทำการแยกจะมีค่าลดลงอย่างมาก จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดผิวเยื่อแผ่นบ่อยครั้ง

2. โมเดลและการออกแบบ

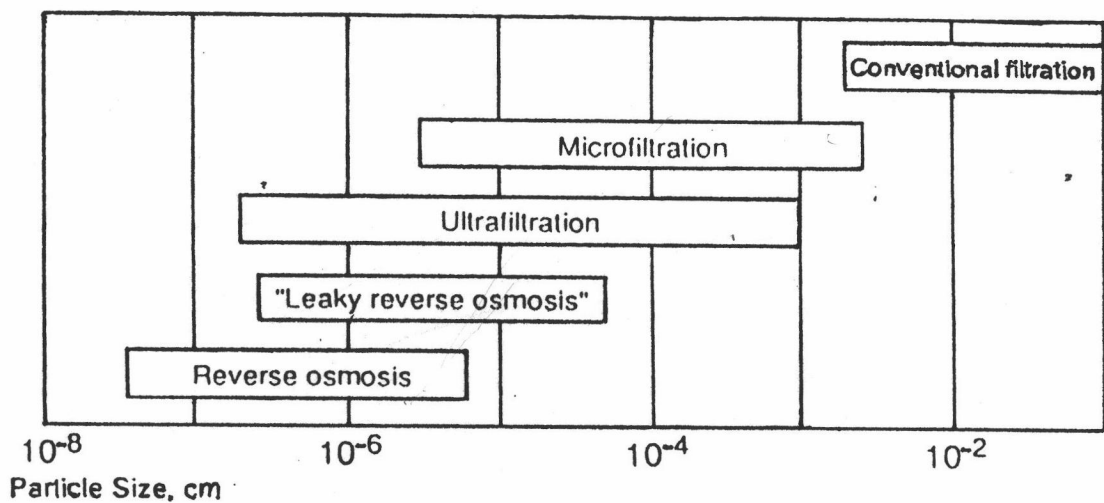
ถึงแม้ว่าในทางทฤษฎีการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นจะมีประสิทธิภาพในการแยกสูง แต่ในการทำนายค่าการกรองด้วยเยื่อแผ่นเป็นไปได้ยาก

3. ความคงตัวของเยื่อแผ่น

การใช้เยื่อแผ่นโพลีเมอร์บางชนิดถูกจำกัดด้วยคุณสมบัติของสาร เช่น เยื่อแผ่นชนิดเซลลูโลสจะสามารถทำการแยกสารได้ในช่วงความเป็นกรด ต่าง 4-8 เยื่อแผ่นชนิดโพลีซัลโฟนจะสามารถทำการแยกสารได้ในช่วงความเป็นกรด ต่าง 2-12 จึงจะไม่เสียคุณสมบัติเดิม เป็นต้น นอกจากนี้ยังถูกจำกัดด้วยปัจจัยอื่นอีก เช่น อุณหภูมิ ชนิดของตัวทำละลาย เป็นต้น

กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)

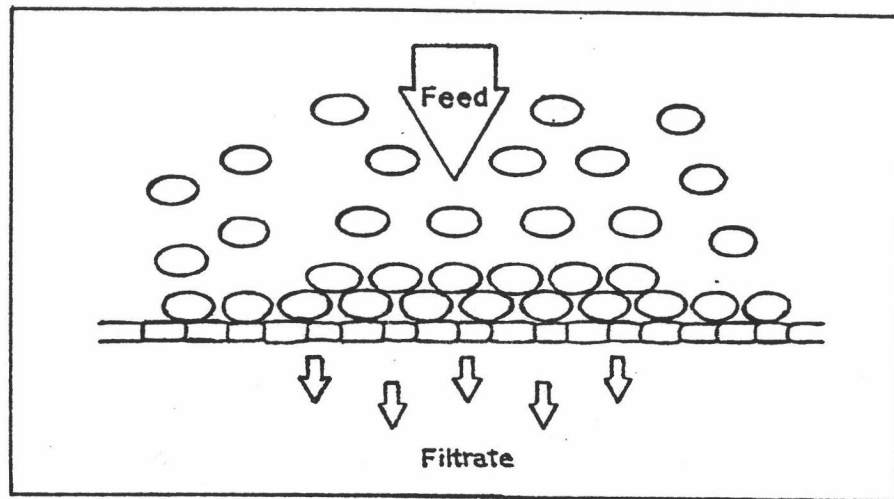
กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการแยกโดยการซึมผ่านเยื่อแผ่นวิธีหนึ่ง ใช้ในการแยกอนุภาคออกจากสารละลายแขวนลอย โดยให้สารละลายแขวนลอยไหลผ่านเยื่อแผ่น มีความดันเป็นแรงขับ ความดันที่ให้กับระบบเท่ากับ 10-500 กิโลปาสกาล ใช้หลักการแยกสารแบบคัดเลือกขนาดอนุภาค (Sieving mechanism) มีความสามารถในการแยกสารที่มีขนาดอนุภาค 0.1-10 ไมโครเมตร (17) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ตัวทำละลายและสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะสามารถผ่านเยื่อแผ่นออกไปได้ เรียกสารละลายส่วนนี้ว่า เพอมีเอท (permeate) ส่วนสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะถูกกักไว้ในระบบ เรียกสารละลายส่วนนี้ว่า รีเทนเตท (retentate) หรือ คอนเซนเตรท (concentrate)



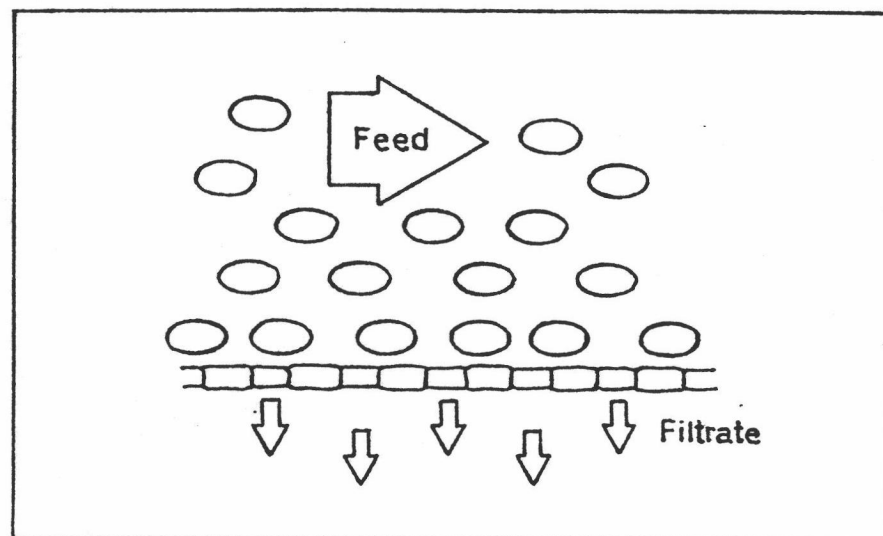
รูปที่ 3.1 แสดงช่วงของการกรองด้วยเยื่อแผ่นโดยแบ่งตามขนาดอนุภาค (17)

ลักษณะการกรองในระบบไมโครฟิลเตรชัน

ลักษณะการกรองสารละลายในระบบไมโครฟิลเตรชัน โดยทั่วไปแบ่งได้สองแบบคือ การกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่น (Dead-end filtration) และ การกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น (Cross-flow filtration) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



การกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่น (Dead-end filtration)



การกรองแบบไหลขนานเยื่อแผ่น (Cross flow filtration)

รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่นและการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น

การกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่น ใช้ความดันป้อนสารให้ไหลผ่านเยื่อแผ่น สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะถูกกักไว้บนผิวเยื่อแผ่น หรือ อยู่ในรูพรุนของเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น และเกิดการสะสมอย่างต่อเนื่อง ปริมาณเพอมีเอทที่ได้จะลดลงอย่างมาก ในทางปฏิบัติอาจต้องทำการล้างเยื่อแผ่นบ่อยครั้งหรือเปลี่ยนเยื่อแผ่นใหม่ก่อนที่จะทำการกรองต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งระบบนี้เหมาะสำหรับกรองสารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 0.1 ไมโครเมตร และสารที่มีความเข้มข้นต่ำ

การกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น (Cross flow filtration or Tangential flow) ใช้ความดันป้อนสารให้ไหลผ่านเยื่อแผ่นไปในแนวขนานกับผิวเยื่อแผ่น ทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่น กวาดอนุภาคที่เกาะบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นให้กลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถควบคุมการอุดตันของเยื่อแผ่นได้ดี ปริมาณเพอมีเอทที่ได้จึงมีค่าสูงกว่าระบบแรก อย่างไรก็ตามในกรณีการแยกสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับรูพรุน หรือ การแยกสารแขวนลอยที่แยกลำบาก เช่น สารละลายในการหมัก การแยกเอนไซม์ออกจากเซลล์ เมื่อใช้ระยะเวลาในการกรองนาน ๆ ผลที่ได้ไม่เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากเกิดการอุดตันของเยื่อแผ่น ทำให้ปริมาณเพอมีเอทที่ได้ลดลงอย่างรวดเร็ว

ทฤษฎีไมโครฟิลเตรชัน

1. เพอมีเอชันฟลักซ์

ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น ค่าฟลักซ์จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของการกรองโดยแสดงในรูปปริมาตรของเพอมีเอทที่ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นต่อหน่วยพื้นที่ของเยื่อแผ่นต่อเวลา ในการกรองสารละลายแขวนลอย ค่าเพอมีเอชันฟลักซ์ของสารละลายที่ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่น สามารถแสดงในรูปของความต้านทานการกรองดังนี้

$$J = \frac{\Delta P_{TM}}{\mu R_t} \quad (3.1)$$

เมื่อ	J	=	เพอมีเอชันฟลักซ์ (ลิตร ต่อ ตารางเมตร-ชั่วโมง)
	ΔP_{TM}	=	ผลต่างความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อน กับเพอมีเอท (บาร์)
	μ	=	ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัม ต่อ เมตร-วินาที)
	R_t	=	ความต้านทานรวม (เมตร ⁻¹)

ในกรณีที่ไม่มีตัวถูกละลาย เพอมีเอชันฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านรูพรุน จะแสดงในรูปความต้านทานเดียวกับ สมการ 3.1 โดยที่ $R_t = R_m$

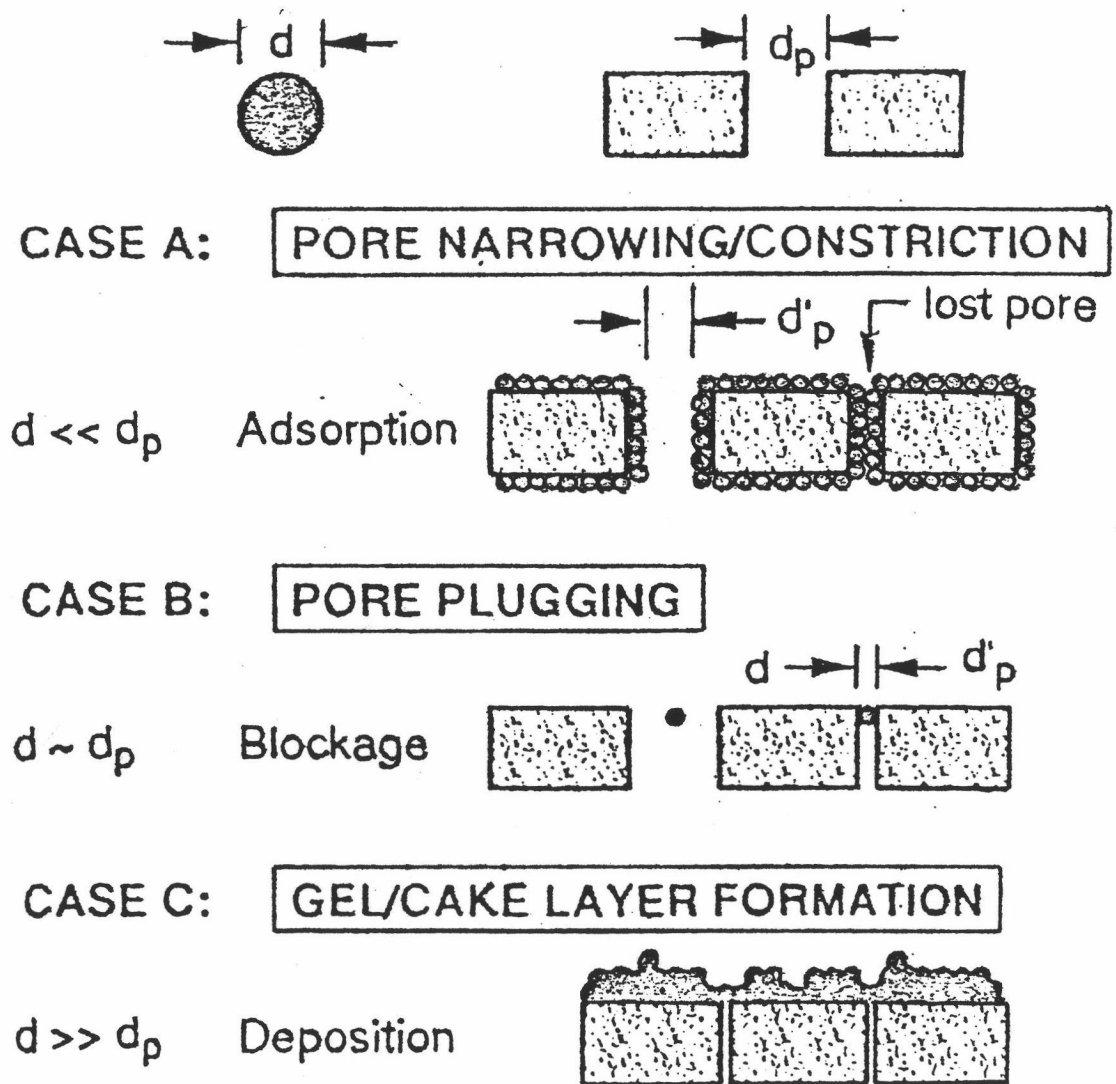
เมื่อ R_m = ความต้านทานของเยื่อแผ่น ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อแผ่น ความหนาแน่นของรูพรุน ขนาดรูพรุน และความหนาของเยื่อแผ่น

ความต้านทานรวม (R_t) ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เป็นผลมาจากปัจจัยใหญ่ๆ 3 ปัจจัย คือ 1) ความต้านทานของเยื่อแผ่น 2) ความต้านทานเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน (R_p) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานเนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{cp}) และความต้านเนื่องจากการเกิดเจลโพลาไรเซชัน (R_g) และ 3) ความต้านทานเนื่องจากการเกิดสเกล (fouling, R_f) ซึ่งได้แก่ความต้านทานเนื่องจากการดูดซับ (R_a) และความต้านทานเนื่องจากการอุดตันรูพรุนของตัวถูกละลาย (R_{pp}) ดังสมการ

$$R_t = R_m + (R_{cp} + R_g) + (R_a + R_{pp}) \quad (3.2)$$

$$R_t = R_m + R_p + R_f \quad (3.3)$$

โดยทั่วไปรูปแบบการเกิดการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น จะมีด้วยกัน 3 ลักษณะ
 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบการเกิดการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น (22)

ในระบบการกรองไมโครฟิลเตรชัน จะใช้ความดันเป็นแรงขับ (driving force) ซึ่งจะแสดงในรูปของผลต่างของความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อนกับเพอมีเอท (transmembrane pressure) ดังสมการ

$$\Delta P_{TM} = \frac{P_i + P_o}{2} - P_f \quad (3.4)$$

เมื่อ ΔP_{TM} = ผลต่างความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อน กับเพอมีเอท (บาร์)

P_i = ความดันขาเข้าของสารละลายป้อน (บาร์)

P_o = ความดันขาออกของสารละลายป้อน (บาร์)

P_f = ความดันด้านสารละลายเพอมีเอท (บาร์)

โดยทั่วไปเทอมของความดันด้านสารละลายเพอมีเอทจะกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ($P_f=0$) ดังนั้นผลต่างความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อน กับ เพอมีเอท จะลดรูปเป็น

$$\Delta P_{TM} = P_i - (\Delta P / 2) \quad (3.5)$$

เมื่อ ΔP_{TM} = ผลต่างของความดันขาเข้าและขาออกของสารละลายป้อน(บาร์)

2. ค่ารีเจคชัน

ความสามารถในการกักสารของเยื่อแผ่นจะแสดงในรูปของ เปอร์เซนต์รีเจคชันซึ่งหมายถึง เปอร์เซนต์ของตัวถูกละลายที่ถูกเยื่อแผ่นกักไว้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์รีเจคชัน

(rejection coefficient , σ) ดังสมการ

$$\sigma = 1 - (C_p / C_b) \quad (3.6)$$

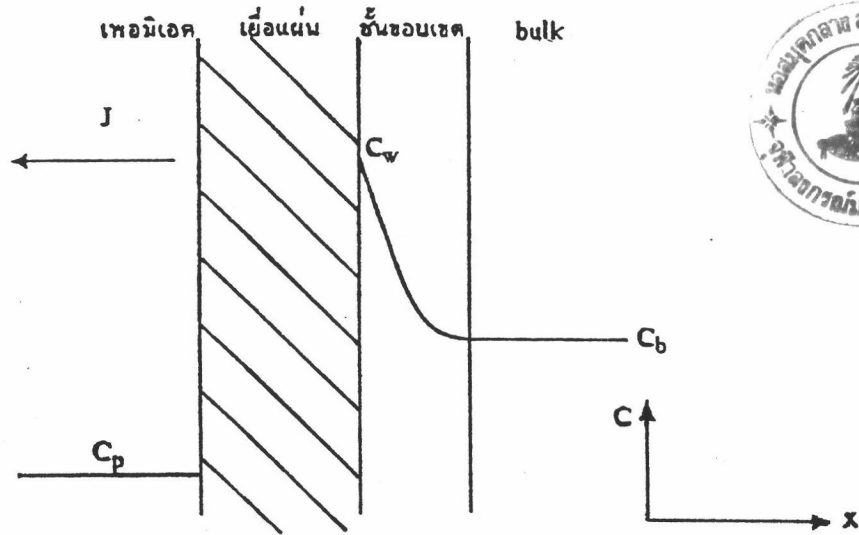
$$R = \sigma * 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ	R	=	ค่ารีเจคชัน
	C_p	=	ความเข้มข้นของสารละลายในเฟอมีเอท (กรัมต่อลิตร)
	C_b	=	ความเข้มข้นของสารละลายด้านสารป้อน (กรัมต่อลิตร)

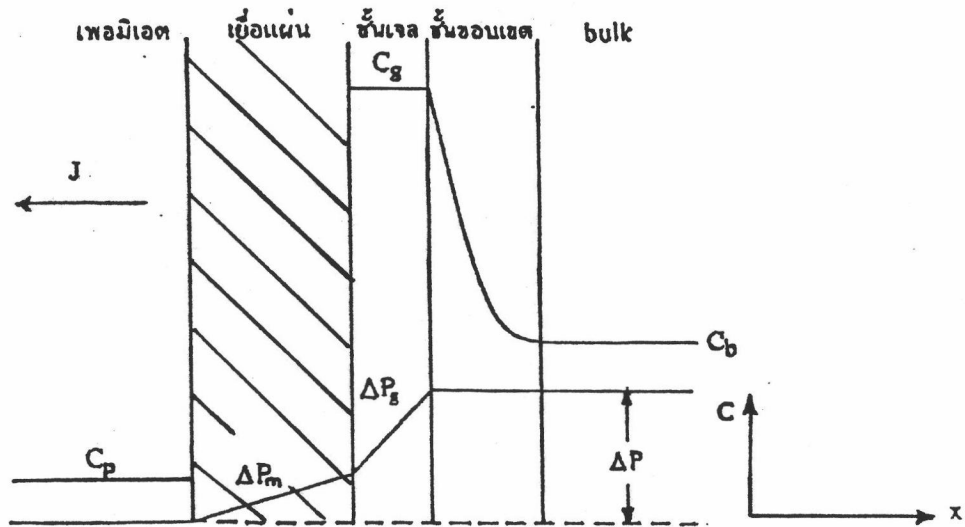
3.คอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน และ เจลโพลาริเซชัน

ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาริเซชันจะเกิดขึ้นเมื่อตัวทำละลายและตัวถูกละลายที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่น ถูกกรองออกจากระบบอย่างต่อเนื่อง ตัวถูกละลายและสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่น ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นออกไปได้ จะถูกกักสะสมอยู่บริเวณผิวเยื่อแผ่น ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่น (C_w) สูงกว่าความเข้มข้นบริเวณที่อยู่ห่างเยื่อแผ่น (C_b) ออกไป ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่นจะเกิดการแพร่กลับ (back diffusion) ไปยังระบบ(bulk) เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้น

เมื่อทำการกรองต่อไปจนกระทั่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่น มีค่าสูงถึงขีดจำกัดการละลาย (C_g) ของสารนั้น ตัวถูกละลายจะเกิดลักษณะคล้ายเจลที่บริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เจลโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ชั้นเจลจะเกิดขึ้นบริเวณผิวเยื่อแผ่นมีลักษณะคล้ายเยื่อแผ่นอีกแผ่นต่ออนุกรมกับเยื่อแผ่นเดิม ทำให้ความต้าน



รูปที่ 3.4 แสดงภาพคอนเซนเตรชันโพลาริเซชัน (17)



รูปที่ 3.5 แสดงภาพเจลโพลาริเซชัน (17)

ทานการกรองของเยื่อแผ่นสูงขึ้น ค่าเพอมีเอชันฟลักซ์ของสารละลายจึงมีค่าลดลง และจะทำให้ความสามารถในการกักสารเปลี่ยนไปด้วย

4. สมการฟลักซ์เมื่อเกิดโพลาไรเซชัน

สมการสมดุลมวลของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลของการเกิดโพลาไรเซชันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\left[\begin{array}{l} \text{อัตราการพาสูเยื่อแผ่น} \\ \text{ของตัวถูกละลาย} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{อัตราการแพร่กลับ} \\ \text{ของตัวถูกละลาย} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{อัตราการผ่านเยื่อแผ่น} \\ \text{ของตัวถูกละลาย} \end{array} \right]$$

$$JC - \frac{DdC}{dx} = JC_p \quad (3.8)$$

สภาวะขอบเขต ที่ $x=0$, $C=C_b$ และ $x=\delta$, $C=C_w$ จะได้

$$J = \frac{D}{\delta} \ln \frac{C_w - C_p}{C_b - C_p} \quad (3.9)$$

หรือ

$$J = K \ln \frac{C_w - C_p}{C_b - C_p} \quad (3.10)$$

เมื่อ C, C_b, C_w, C_p = ความเข้มข้นของสารละลาย ในระบบ ที่ผิวเยื่อแผ่น และในเพอมีเอท ตามลำดับ (g/l)

K = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย (m/s)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (mass diffusion coefficient) (m^2/s)

δ = ความหนาของชั้นขอบเขต (m/s)

ในสภาวะที่เกิดเจลโพลาริเซชัน , $C_w = C_g$ แทนในสมการ 3.10 จะได้

$$J = K \ln \frac{C_g - C_p}{C_b - C_p} \quad (3.11)$$

ในกรณีที่คาร์เจคชันมีค่าสูง C_p จะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ สมการ 3.11 จะลดรูปเป็น

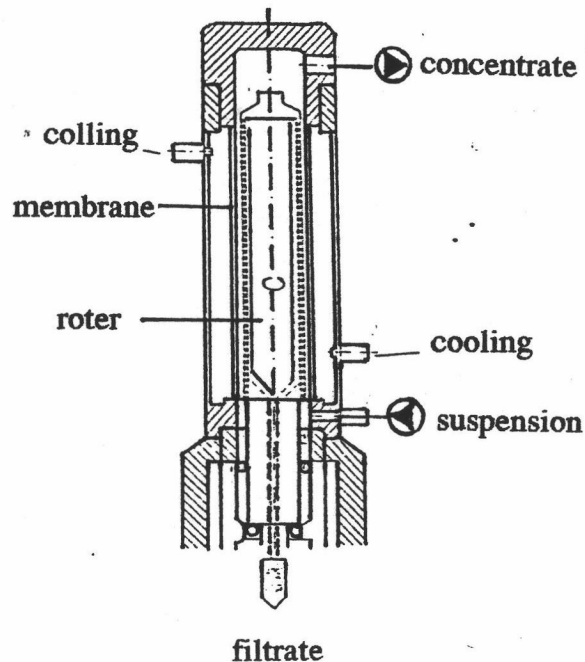
$$J = K \ln \frac{C_g}{C_b} \quad (3.12)$$

จากสมการ 3.12 สามารถหาค่า C_g ได้ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า J กับ $\ln C_g$ จะได้กราฟเส้นตรง มีความชัน = $-K$ และจุดตัดแกน y ที่ $J = 0$ คือ ค่า $K \ln C_g$

ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ เจลโพลาริเซชัน สามารถอธิบายปรากฏการณ์ช่วงที่ค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับค่าความดันได้ เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีค่าเท่ากับความเข้มข้นที่ผิวเยื่อแผ่น ($C_w = C_g$) แล้ว แรงขับเคลื่อนในการแพร่กลับของตัวถูกละลาย เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นจะมีค่าคงที่ การเพิ่มความดันจึงไม่มีผลทำให้อัตราการแพร่กลับของตัวถูกละลายสู่ระบบสูงขึ้น แต่เป็นการเพิ่มอัตราการสะสมของตัวถูกละลายในชั้นเจล ซึ่งจะทำให้ชั้นเจลอัดแน่นขึ้น ค่าฟลักซ์จึงมีค่าคงที่

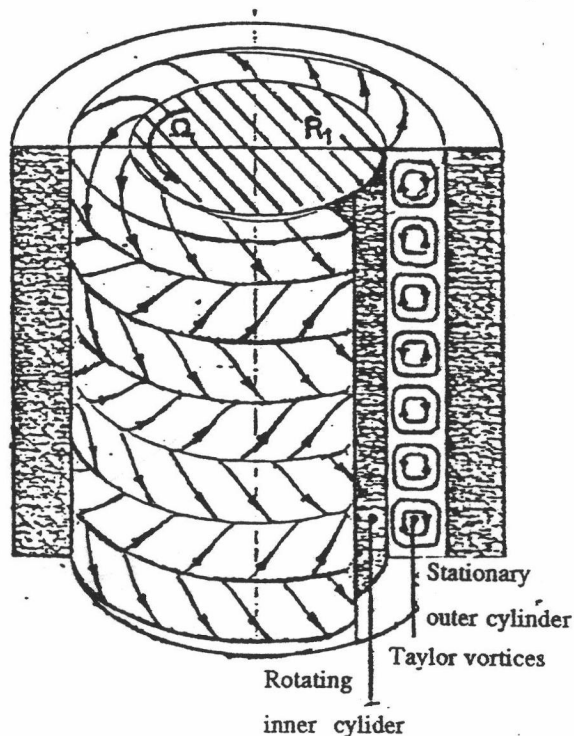
การกรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเยื่อแผ่นชนิดหมุนได้

เครื่องกรองชนิดหมุนได้ ประกอบด้วยส่วนที่ใช้ในการกรอง คือ เยื่อแผ่นอยู่ภายใน โดยมีท่อทรงกระบอกครอบอยู่ด้านนอก โดยเยื่อแผ่นและท่อทรงกระบอกมีแนวศูนย์กลางเดียวกัน เยื่อแผ่นสามารถหมุนได้เนื่องจากแรงขับของมอเตอร์ ส่วนท่อทรงกระบอกชั้นนอกจะถูกตรึงอยู่กับที่ ระหว่างท่อทรงกระบอกชั้นในกับผนังด้านนอกของของเยื่อแผ่นจะมีช่องว่าง (gap) ซึ่งเป็นทางไหลของสารละลายแขวนลอย สารละลายแขวนลอยจะถูกบีบเข้าทางด้านล่างของเครื่องกรอง สารละลายและสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่น จะสามารถผ่านออกทางแนวศูนย์กลางของเยื่อแผ่นได้ สารแขวนลอยที่ไม่สามารถผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่น ซึ่งมีความเข้มข้นสูงขึ้นไปจะออกทางด้านบนของเครื่องกรอง ลักษณะของเครื่องกรองแบบหมุนได้จะแสดงในรูปที่ 3.6

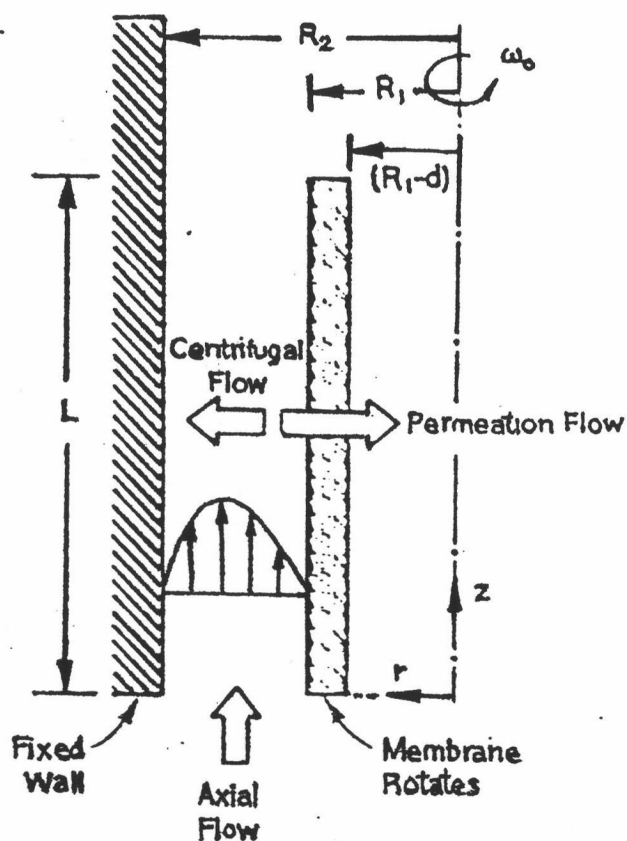


รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของเครื่องกรองชนิดหมุนได้ (14)

เมื่อเยื่อแผ่นหมุน จะทำให้เกิดการหมุนวนของสารละลายที่เรียกว่า “ การหมุนวนของเทย์เลอร์ ” (Taylor vortice) ก่อให้เกิดแรงเฉือนตลอดผิวหน้าของเยื่อแผ่น กวาดอนุภาคที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าให้กลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถควบคุมการอุดตันของเยื่อแผ่นได้ดี ซึ่งลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ในช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านในและผนังของเยื่อแผ่นด้านนอก กับลักษณะการไหลของสารละลาย จะแสดงดังรูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ (11)



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะการไหลของสารละลายระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน(22)

ทฤษฎีการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเยื่อแผ่นชนิดหมุนได้

การหมุนวนของเทย์เลอร์ สามารถอธิบายได้โดย “สมการเทย์เลอร์นัมเบอร์” (Taylor number)(18,19,20) ดังสมการที่ 3.13

$$T_a = \frac{\omega R_1 \Delta}{U} \left(\frac{2\Delta}{R_1 + R_2} \right)^{0.5} \quad (3.13)$$

เมื่อ T_a = ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (Taylor number)

ω = ความเร็วเชิงมุม = $2\pi n$ (เรเดียน ต่อ นาที)

R_1	=	รัศมีภายนอกของเยื่อแผ่น (มิลลิเมตร)
R_2	=	รัศมีภายในของท่อทรงกระบอกที่อยู่กับที่ (มิลลิเมตร)
Δ	=	ความกว้างของช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านใน กับ ผนังเยื่อแผ่นด้านนอก = $R_2 - R_1$ (มิลลิเมตร)
ν	=	ความหนืดคิเนมาติก = μ/ρ (เมตร ² ต่อ วินาที)
n	=	จำนวนรอบการหมุนของเยื่อแผ่น (รอบ ต่อ นาที)
μ	=	ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัม ต่อ เมตร-วินาที)
ρ	=	ความหนาแน่นของสารละลาย (กิโลกรัม ต่อ เมตร ³)

โดยที่ $T_a < T_{a, \text{crit}}$ จะมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (laminar) เพียงอย่างเดียว

$$T_{a, \text{crit}} = 41.3 + 13.1\Delta / R_1 \quad (3.14)$$

ลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ภายในช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านใน กับ
ผนังเยื่อแผ่นด้านนอก จะมีความสัมพันธ์กับค่า เทย์เลอร์นัมเบอร์ โดยสามารถแบ่งลักษณะการ
ไหลได้เป็น 5 ช่วง (21,22,23) คือ

การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)	$T_a \leq T_{a, \text{crit}}$
การหมุนวนแบบราบเรียบ (laminar vortex flow)	$T_{a, \text{crit}} < T_a < 800$
ช่วงเปลี่ยนแปลงการไหล (transition flow)	$800 < T_a < 2000$
การหมุนวนแบบปั่นป่วน (turbulent vortex flow)	$2000 < T_a < 10000 \sim 15000$
การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)	$T_a > 15000$

โดยมีสมการ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number) ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของสารละลาย 2 ค่าคือ และ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่น (tangential Reynold number) ดังสมการที่ 3.15, 3.16

$$Re_a = \frac{Vd_h}{\nu} \quad (3.15)$$

$$Re_t = \frac{\omega R_1 d_h}{\nu} \quad (3.16)$$

โดยที่	Re_a	=	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามแนวแกน
	Re_t	=	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่น
	V	=	ความเร็วของสารละลายตามแนวแกน (เมตรต่อวินาที)
	d_h	=	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก = $2d$ (เมตร)

จากลักษณะการหมุนของเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์ภายในช่องว่างระหว่างผนังท่อด้านในกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอก จะทำให้เกิดแรงเฉือน (24) บริเวณผิวของเยื่อแผ่น ดังสมการ

$$\tau = 0.23 \sqrt{T_a} \frac{\omega R_1}{\Delta} \quad (3.17)$$

เมื่อ τ = แรงเฉือน (effective shear rate) (ต่อ วินาที)

T_a = ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (Taylor number)

ω = ความเร็วเชิงมุม = $2\pi n$ (เรเดียน ต่อ นาที)

R_1 = รัศมีภายนอกของเยื่อแผ่น (มิลลิเมตร)

Δ = ความกว้างของช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านใน กับ
ผนังเยื่อแผ่นด้านนอก = $R_2 - R_1$ (มิลลิเมตร)