

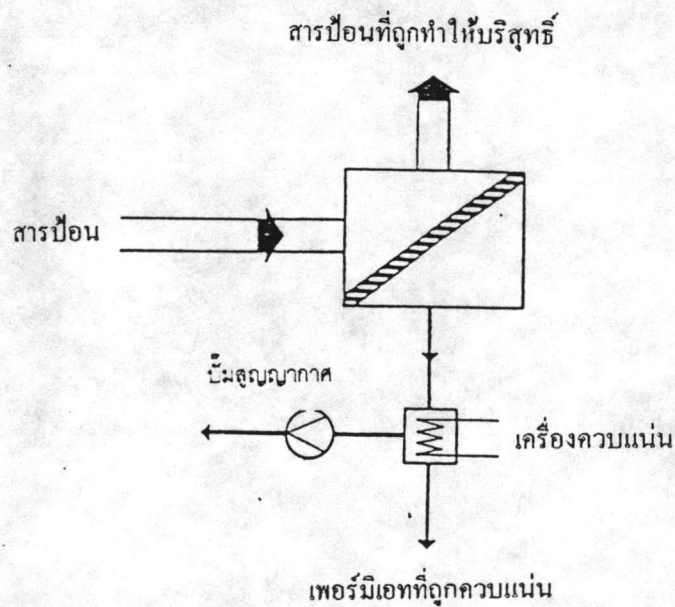


บทที่ 3

ทฤษฎี

### กระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน

เพอร์เวเพอเรชันเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลจากสารป้อนของเหลวผ่านเยื่อแผ่นโพลีเมอร์ที่ไม่มีรูพรุน เพอร์มิเอทจะถูกดึงออกจากอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นในสถานะไอ การถ่ายเทมวลถูกเหนี่ยวนำจากการทำให้ความดันย่อยของสารในด้านเพอร์มิเอทต่ำกว่าความดันไอในสารป้อน โดยทำให้เกิดภาวะสูญญากาศ ใช้ก๊าซเป็นตัวพา หรือการทำให้ควบแน่นบนผิวที่เย็น (รูป 10)



รูปที่ 10 แสดงกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน

การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นไม่มีรูพรุนอธิบายได้โดยแบบจำลองการละลาย-การแพร่ (solution-diffusion model) ขั้นตอนการถ่ายเทมวลประกอบด้วย

1. การละลายหรือการดูดซึมของสารป้อนที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น-สารป้อน

ที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นสารป้อน ของเหลวในเยื่อแผ่นจะสมดุลกับของเหลวในสารป้อน ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารในเยื่อแผ่นและในของเหลวที่สัมผัสกับเยื่อแผ่น แสดงได้ด้วยสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient)[19]

$$S_i = \frac{X_{im}}{X_{il}}$$

$S_i$  สัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient) ของสาร  $i$

$X_{im}$  ความเข้มข้นของสาร  $i$  ในเยื่อแผ่น

$X_{il}$  ความเข้มข้นของสาร  $i$  ในของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่น

การดูดซึมของของเหลวในโพลีเมอร์คล้ายแก้วอธิบายได้ด้วย ฟลอรี-ฮักกินส์

ไอโซเทอร์ม(Flory-Huggins isotherm)[18] ที่ความเข้มข้นต่ำๆในสารละลาย(รูป 11)

$$S_i = \gamma_{il} \exp(-(1 + \chi))$$

$\chi$  พารามิเตอร์แสดงแรงกระทำระหว่างของเหลวกับโพลีเมอร์ (liquid-membrane interaction parameter)

$\gamma_{il}$  แอคติวิตีโคเอฟฟิเชียน(activity coefficient)ของสาร  $i$  ในของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่น

และการดูดซึมของของเหลวและก๊าซในโพลีเมอร์พวักยาง อธิบายได้ด้วย

ไอโซเทอร์มของเฮนรี(Henry isotherm)

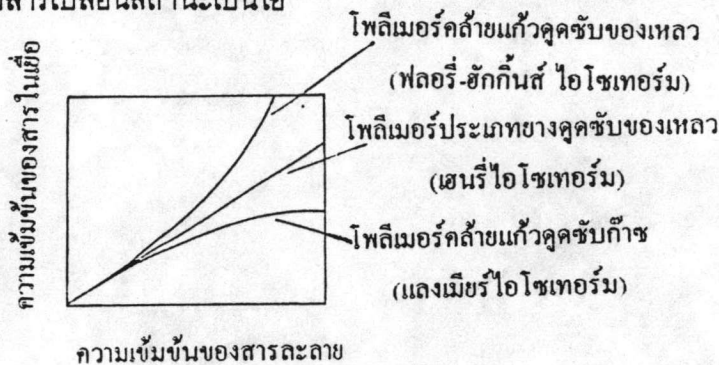
$$S_i = \frac{\gamma_{im}^{\infty}}{\gamma_{il}^{\infty}}$$

$\gamma_{im}^{\infty}$  แอคติวิตีโคเอฟฟิเชียนของสาร  $i$  ในเยื่อแผ่น เมื่อของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่นมีความเข้มข้นต่ำมาก

$\gamma_{il}^{\infty}$  แอคติวิตีโคเอฟฟิเชียนของสาร  $i$  ในของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่น เมื่อของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่นมีความเข้มข้นต่ำมาก

สัมประสิทธิ์การกระจายขึ้นอยู่กับแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับโมเลกุลของเยื่อแผ่น ตัวทำละลายที่มีแรงกระทำกับโพลีเมอร์สูงกว่าจะถูกดูดซึมในโพลีเมอร์ได้ดีกว่า โดยปกติการละลายของโพลีเมอร์มี 2 ลักษณะ[20] คือ กรณีแรกโมเลกุลของตัวทำละลายจะซึมผ่านเข้าไปในโพลีเมอร์ ทำให้โพลีเมอร์พองตัวขนาดของโซโพลีเมอร์จะใหญ่ขึ้น กรณีนี้โพลีเมอร์

ต้องมีแรงดึงระหว่างสายโซ่โมเลกุลสูงกว่าแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับโซ่โพลีเมอร์ ซึ่งโพลีเมอร์อาจเป็นโครงร่างแหหรือร่างตาข่าย มีความเป็นผลึกสูง หรืออาจมีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง การละลายในลักษณะที่สองคือเมื่อแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับโพลีเมอร์มากกว่าแรงดึงระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ก็จะเกิดสารละลาย การดูดซึมในกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันเป็นการละลายแบบการพองตัว โดยบริเวณผิวสัมผัสกับสารป้อนจะพองมากที่สุดและค่อยๆลดลงตามความหนาของเยื่อแผ่น จนกระทั่งไม่มีการพองตัวเลยที่ผิวสัมผัสด้านเพอร์มิเอทของเยื่อแผ่น ซึ่งสารเปลี่ยนสถานะเป็นไอ



รูปที่ 11 ไอโซเทอร์มของการดูดซึม

2. การแพร่ในเยื่อแผ่น

การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟิคส์(Fick's law)

$$J_i = -D_i \frac{dC_{im}}{dx}$$

$J_i$       ฟลักซ์ของสารผ่านเยื่อแผ่น

$D_i$       สัมประสิทธิ์การแพร่

$\frac{dC_{im}}{dx}$       เกรเดียนต์(gradient)เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในเยื่อแผ่นขึ้นกับธรรมชาติของเยื่อแผ่นและความเข้มข้นเฉพาะที่ของสาร ฟังก์ชันที่นิยมใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่กับความเข้มข้นของสารคือ [21]

$$D = D^0 \exp(bc)$$

$D^0$       สัมประสิทธิ์การแพร่เมื่อความเข้มข้นของสารในเยื่อแผ่นเท่ากับศูนย์ ไม่มีการพองตัว

$b$       สัมประสิทธิ์พลาสติกไทซิง(plasticizing coefficient) แสดงผลของการพองตัวของเยื่อแผ่นต่อการแพร่

c ความเข้มข้นเฉพาะที่ของสารในเยื่อแผ่น

ของเหลวจะประพฤติตัวเป็นพลาสติกไซเซอร์(plasticizer)ทำให้ส่วนของโพลีเมอร์ เคลื่อนไหวได้มากขึ้น ทำให้การแพร่เกิดขึ้นง่าย แต่ในบางกรณีสัมประสิทธิ์การแพร่อาจลดลงเมื่อ ความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้นสารเกิดการรวมตัวเป็นกระจุกแทนที่จะรวมกับโพลีเมอร์ การที่โมเลกุล รวมตัวกันทำให้เคลื่อนไหวได้น้อยลงในระบบของผสม สัมประสิทธิ์การแพร่จะเป็นฟังก์ชันของ ความเข้มข้นของทุกองค์ประกอบ

สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แสดงได้ด้วยสมการของ อาร์เรเนียส(Arrhenius equation)

$$D^0 = D^{00} \exp(-E_d / RT)$$

Ed พลังงานกระตุ้นของการแพร่

3. การระเหยของสารจากผิวเยื่อแผ่นด้านเพอร์มิเอท

เป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วเทียบกับขั้นตอนอื่น ความดันย่อยของแต่ละองค์ประกอบที่ ด้านเพอร์มิเอท แสดงด้วย

$$p_i = y_i P = \gamma_{i,m}^\infty x_{i,m} P_i^0$$

$P_i$  ความดันย่อยของสาร i

P ความดันด้านเพอร์มิเอท

$P_i^0$  ความดันไอของสาร i

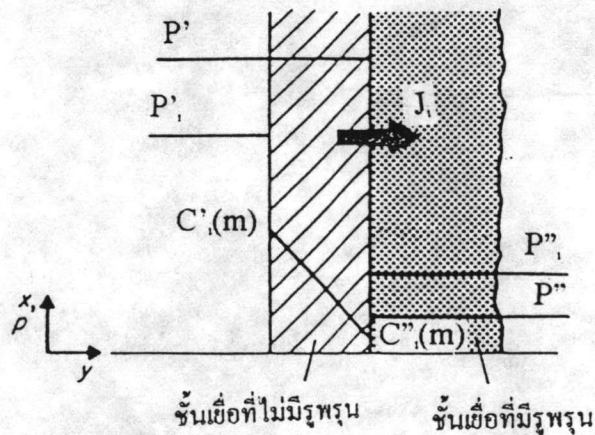
เพอร์เวเพอเรชันต่างจากกระบวนการเมมเบรนอื่นๆ คือมีการเปลี่ยนสถานะเข้ามา เกี่ยวข้องจึงต้องมีการให้ความร้อนแก่ระบบ ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้อย่างต่ำเท่ากับปริมาณ ความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอของสารที่แพร่ และเป็นกาแพร่ผ่านเยื่อแผ่นแบบไม่มีรูพรุนซึ่งมี พลักรีต่ำ แต่ค่าการเลือกของกระบวนการสูง เพอร์เวเพอเรชันจึงจะนำมาใช้เมื่อการแยกโดยวิธีอื่น ไม่ได้ผล หรือใช้พลังงานสูงมากหรือค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง เช่น การแยกสารผสมอะซิโโทลพร สารผสมที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน

จากแบบจำลองการละลายและการแพร่ (solution-diffusion model) ความสามารถในการซึมผ่านเป็นผลมาจากความสามารถในการละลายและการแพร่ของสารในเยื่อแผ่นภายใต้แรง ขับเนื่องจากเกรเดียนต์ของศักย์ทางเคมี ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับเยื่อแผ่น ของไหลในแผ่น

เยื่อแผ่นจะสมดุลกับของไหลที่สัมผัสเยื่อแผ่น ความเข้มข้นของสารในเยื่อแผ่นจะแปรผันตามศักย์ทางเคมีของสารในของไหลที่อยู่ติดกัน ศักย์ทางเคมีของสารแทนได้ด้วยความดันไอของสาร

พิจารณาระบบที่สารป้อนประกอบด้วยองค์ประกอบ  $i$  และ  $j$  มีความเข้มข้นโดยโมล  $c_i'$  และ  $c_j'$  ตามลำดับ (รูป 12)

ศักย์ทางเคมีขององค์ประกอบ $i$ ในสารป้อนแทนด้วย	$p_i'$
ศักย์ทางเคมีขององค์ประกอบ $j$ ในสารป้อนแทนด้วย	$p_j'$
ศักย์ทางเคมีขององค์ประกอบ $i$ ในเพอร์มิเอทแทนด้วย	$p_i''$
ศักย์ทางเคมีขององค์ประกอบ $j$ ในเพอร์มิเอทแทนด้วย	$p_j''$
ความเข้มข้นขององค์ประกอบ $i$ ในเยื่อแผ่นที่ผิวสัมผัสกับสารป้อน	$c_i'(m) = K_i p_i'$
ความเข้มข้นขององค์ประกอบ $j$ ในเยื่อแผ่นที่ผิวสัมผัสกับสารป้อน	$c_j'(m) = K_j p_j'$
ความเข้มข้นขององค์ประกอบ $i$ ในเยื่อแผ่นที่ผิวสัมผัสด้านเพอร์มิเอท	$c_i''(m) = K_i p_i''$
ความเข้มข้นขององค์ประกอบ $j$ ในเยื่อแผ่นที่ผิวสัมผัสด้านเพอร์มิเอท	$c_j''(m) = K_j p_j''$



รูปที่ 12 การกระจายความเข้มข้นและความดันในแผ่นเยื่อแผ่นแบบการละลายและการแพร่

จากกฎของฟิค สำหรับองค์ประกอบ  $i$

$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dx} \tag{1}$$

อินทิเกรตสมการ (1) ตลอดความหนาของเยื่อแผ่น 1

$$J_i = \bar{D}_i \frac{(c_i'(m) - c_i''(m))}{1} \tag{2}$$

$D_i$  ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารผ่านเยื่อแผ่น

$$J_i = \bar{D}_i K_i \frac{(p_i' - p_i'')}{1} \tag{3}$$

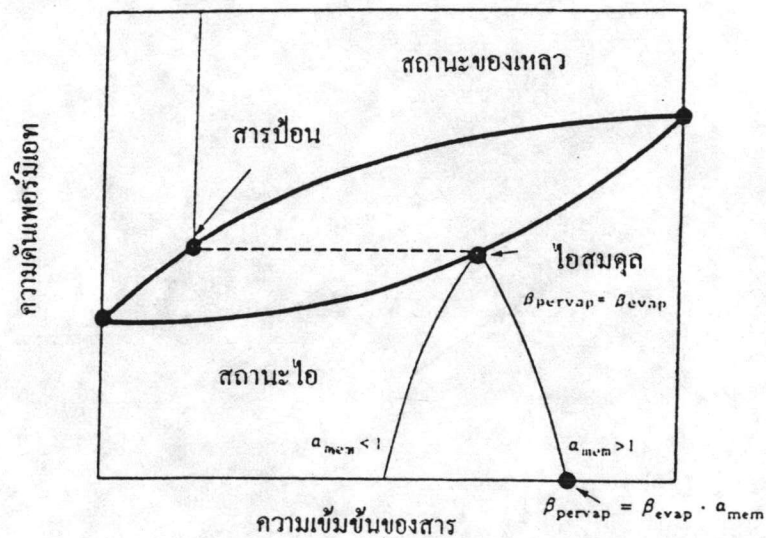
ให้  $P_i$  (Permeability) =  $\bar{D}_i K_i$

$$J_i = P_i \frac{(p_i' - p_i'')}{l} \tag{4}$$

สำหรับองค์ประกอบ  $j$

$$J_j = P_j \frac{(p_j' - p_j'')}{l}$$

ทางเทอร์โมไดนามิกกำหนดชั้นตอน 2 ชั้นตอนที่ประกอบเป็นกระบวนการเพอร์เวแพเรชั่น คือ การกลายเป็นไอแบบสมดุลและการซึมผ่านเยื่อแผ่นของไอสมมุติ(รูป 13)



รูปที่ 13 แผนภาพทอมป์สัน(Thompson)

การเลือกของกระบวนการเกิดจากการเลือกของแต่ละชั้นตอน

$$\beta_{pervap} = \beta_{evap} \cdot \beta_{mem} \tag{5}$$

$\beta_{pervap}$  แฟคเตอร์การแยกโดยรวม (overall separation factor) เท่ากับสัดส่วนขององค์ประกอบด้านเพอร์มิเอทต่อสัดส่วนขององค์ประกอบในสารป้อน

$$\beta_{pervap} = \frac{P_i'' / P_j''}{c_i' / c_j'} \tag{6}$$

$\beta_{pervap}$  แฟคเตอร์แยกโดยการกลายเป็นไอ (evaporation separation factor) แทนการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบเมื่อสารป้อนกลายเป็นไอสมมุติในสภาวะที่สมดุลกัน

$$\beta_{evap} = \frac{P_i' / P_j'}{c_i' / c_j'} \tag{7}$$

$\beta_{mem}$  แฟคเตอร์การแยกโดยเมมเบรน (membrane separation factor) แทนสัดส่วนของสารป้อนที่เป็นไอสมมุติต่อสัดส่วนของสารด้านเพอร์มิเอท

$$\beta_{mem} = \frac{p_i'' / p_j''}{p_i' / p_j'} \quad (8)$$

การวิเคราะห์เป็น 2 ขั้นตอนไม่ได้แสดงว่า สารกลายเป็นไอก่อนแล้วจึงแพร่ ในความเป็นจริงสารกลายเป็นไอที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่น สมการ(5) แสดงให้เห็นว่าความดันไอของสารป้อนมีผลโดยตรงต่อการแยก เนื่องจากเป็นแรงขับของขั้นตอนการแพร่

$$\text{กำหนด } \alpha \text{ (membrane selectivity) } = \frac{P_i}{P_j}$$

จาก (4)

$$\frac{J_i}{J_j} = \frac{P_i(p_i' - p_i'')}{P_j(p_j' - p_j'')} \quad (9)$$

อัตราส่วนของฟลักซ์ขององค์ประกอบเท่ากับอัตราส่วนของความดันไอด้าน

เพอร์มิเอทของสาร

$$\frac{J_i}{J_j} = \frac{p_i''}{p_j''}$$

$$\frac{p_i''}{p_j''} = \alpha_{mem} \frac{(p_i' - p_i'')}{(p_j' - p_j'')}$$

$$\beta_{mem} = \alpha_{mem} \frac{(p_i' - p_i'')p_j'}{(p_j' - p_j'')p_i'} \quad (10)$$

พิจารณาขอบเขต 2 กรณี

1) เมื่อความดันเพอร์มิเอทเท่ากับความดันไอสมมุติในสารป้อน

$$p''/p' \rightarrow 1$$

$$p_i''/p_i' \rightarrow 1$$

$$p_j''/p_j' \rightarrow 1$$

จาก(8)

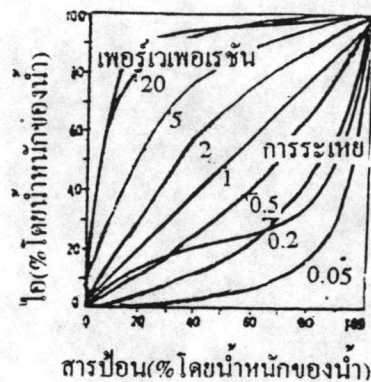
$$\beta_{mem} = 1$$

$$\beta_{pervap} = \beta_{evap}$$

2) เมื่อความดันด้านเพอร์มิเอทเป็นศูนย์ ซึ่งเกิดจากการทำให้ระบบเป็นสุญญากาศ หรือการที่เพอร์มิเอท ควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และ ดึงออกจากระบบตลอดเวลา

$$\beta_{\text{per vap}} = \beta_{\text{evap}} * \alpha_{\text{mem}}$$

การเลือกของเยื่อแผ่นถูกใช้เต็มที่เมื่อ  $p^* = 0$  ถ้าค่าการเลือกของเยื่อแผ่นมีค่ามากกว่า 1 เยื่อแผ่นจะให้องค์ประกอบที่ระเหยง่ายกว่าผ่านได้มากกว่า เยื่อแผ่นจะเสริมประสิทธิภาพในการแยก ถ้าค่าการเลือกของเยื่อแผ่นน้อยกว่า 1 ระบบอาจจะให้ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยง่ายกว่าเพิ่มขึ้น แต่จะน้อยกว่าความเข้มข้นจากการระเหย หรืออาจจะให้ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยยากกว่ามากขึ้น



รูปที่ 14 แผนภาพแม็คเคป-ทิล(McCabe-Thiele)

การประเมินค่าการเลือกของเพอร์เวเพอเรชันอาจทำได้โดยใช้แผนภาพMcCabe-Thiele ดังตัวอย่างในรูป 14 เปรียบเทียบการระเหยที่ความดันสูญญากาศ และเพอร์เวเพอเรชันผ่านเซลลูโลสไตรอะซิเตทของน้ำกับเอทานอล เส้นอ้างอิงแสดงแฟคเตอร์การแยกคงที่

#### ตัวแปรที่มีผลต่อการกระทำของกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน

##### 1. สมบัติทางกายภาพและเคมี

การดูดซึมของตัวทำละลายจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น-สารป้อน ปริมาณการดูดซึมของตัว ทำละลายแต่ละชนิดถูกกำหนดโดยคุณสมบัติทางเคมีของโพลีเมอร์กับตัวทำละลาย องค์ประกอบที่มีแรงกระทำต่อโซโพลีเมอร์สูงจะทำให้โพลีเมอร์พองได้มาก แต่ถ้าแรงกระทำนี้สูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโซโพลีเมอร์ โพลีเมอร์จะถูกละลายในตัวทำละลายนั้น ในกระบวนการเมมเบรนโพลีเมอร์จะต้องคงรูปเป็นของแข็ง วัสดุที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เช่น โพลีเมอร์ที่มีโครงร่างตาข่าย กราฟโคโพลีเมอร์(graftcopolymer) หรือการผสมวัสดุเฉื่อยในโพลีเมอร์หลัก การพองตัวมากหรือน้อยของโพลีเมอร์ขึ้นกับปัจจัยหลัก 2 อย่าง คือ องค์ประกอบเป็นตัวทำละลายที่



ดีของโพลีเมอร์หรือไม่ และความยืดหยุ่นของโซโพลีเมอร์ ซึ่งจะมีแรงต้านการพองตัวมากหรือน้อย

สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในระบบที่มีตัวทำละลาย 2 ชนิด เขียนได้ในรูป

$$D_i = D_i^0 \exp(k_{ij}c_j + k_{ji}c_i)$$

$$D_j = D_j^0 \exp(k_{ji}c_i + k_{ij}c_j)$$

$D_i^0, D_j^0$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร  $i$  และ  $j$  เมื่อไม่มีตัวทำละลายในโพลีเมอร์ เป็นฟังก์ชันของโครงสร้างโพลีเมอร์ ขนาดและรูปร่างโมเลกุลที่แพร่ผ่าน

$k_{ij}$  แสดงผลของการเป็นพลาสติกไซเซอร์ของสาร  $j$  ที่มีต่อการแพร่ของสาร  $i$  แรงกระทำซึ่งกันและกันของตัวทำละลายอาจทำให้การแพร่ในโพลีเมอร์ลดลง

การซึมผ่านเยื่อแผ่นด้วยอัตราที่ต่างกันของแต่ละองค์ประกอบทำให้เกิดความสามารถในการเลือก ซึ่งอาจเป็นผลจากความแตกต่างของการละลายหรือการแพร่ หรืออาจเกิดจากทั้งสอง ปรากฏการณ์ขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของระบบ ระบบที่ตัวทำละลายมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน การดูดซึมที่ต่างกันจะเป็นผลให้เกิดค่าการเลือก การแพร่ทำให้เกิดค่าการเลือกเมื่อขนาดและรูปร่างของโมเลกุลต่างกันมากๆ

ค่าการเลือกผ่านของซิลิโคนเกิดการดูดซึมสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซึมจะมีค่าต่ำ ความเข้มข้นของสารที่ซึมผ่านในเยื่อแผ่นซิลิโคนจึงมีค่าต่ำมาก ดังนั้น อาจจะไม่มีความแตกต่างระหว่างสารที่ซึมผ่านในเยื่อแผ่น(coupling effect)[19]

## 2. ความหนาของเยื่อแผ่น

ฟลักซ์ของสารเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นที่บางจะให้ฟลักซ์สูง ในระบบสารผสม การเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ของทุกองค์ประกอบจะมีผลให้ค่าการเลือกลดลง แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายจะเป็นตัวกำหนดความหนาท่ำสุดที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เพื่อจะรักษาค่าการเลือก เยื่อแผ่นที่บางมากๆ จะทำให้ความต้านทานการแพร่ของเยื่อแผ่นลดลง ตัวทำละลายจะแพร่ออกมาได้มาก ฟลักซ์ที่สูงทำให้รักษาความดันด้านเพอร์มิเมทให้ต่ำได้ยาก

## 3. ความเข้มข้นของสารป้อน

หมายถึงความเข้มข้นของสารที่ซึมผ่านได้มากกว่า มีผลโดยตรงต่อการดูดซึมที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น-สารป้อน แอคติวิตี(activity)ของสารจะเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยตามการเปลี่ยนแปลง

แปลงของความเข้มข้นของสาร ขึ้นกับธรรมชาติทางเคมีของสารผสม เทอร์โมไดนามิกแอกติวิตีขององค์ประกอบในของเหลว แสดงได้ด้วยความดันไอขององค์ประกอบ

$$p_i' = x_i \gamma_i p_i^{\circ} = a_i p_i^{\circ}$$

$\gamma_i$  (activity coefficient) แสดงพฤติกรรมของสารละลายที่เป็นของเหลว

$\gamma_i = 1$  ( $a_i = x_i$ ) สำหรับสารละลายอุดมคติ ประพฤติตัวตามกฎของราอูลท์ (Raoult's law) ใช้กับสารละลายบริสุทธิ์ ( $\gamma_i \rightarrow 1, x \rightarrow 1$ )

$\gamma_i > 1$  พฤติกรรมเบี่ยงเบนไปทางบวกจากกฎของราอูลท์ แอกติวิตีจะมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นต่ำลง การแยกจะดีขึ้นและฟลักซ์จะลดลง

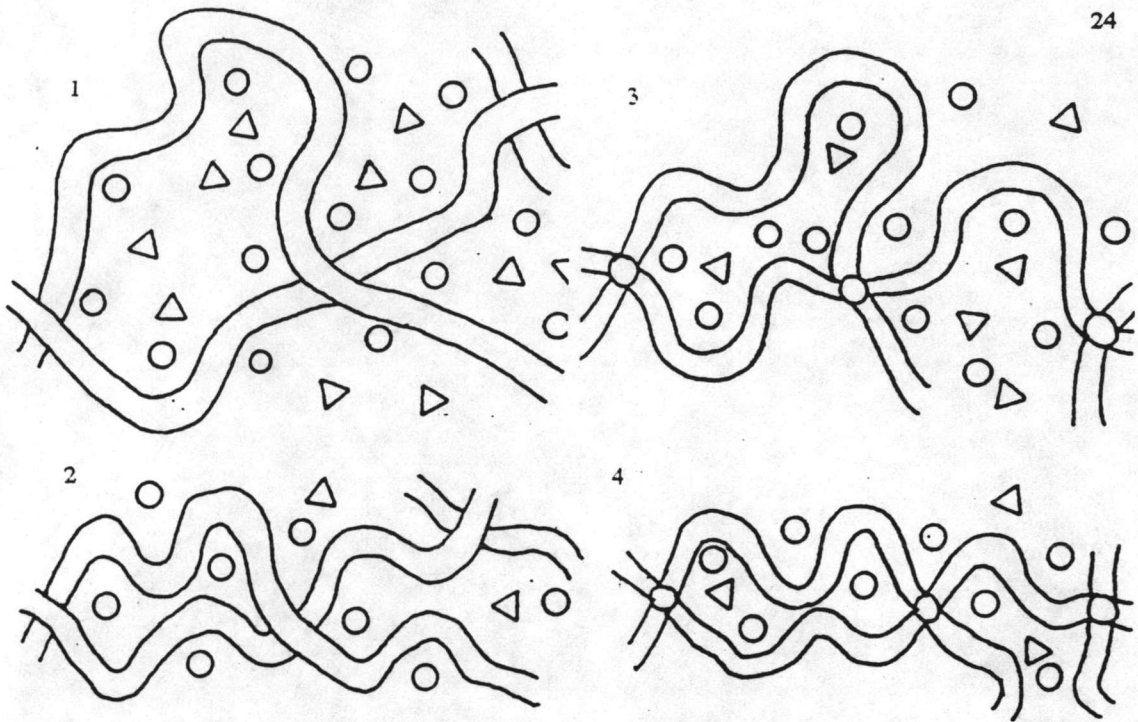
$\gamma_i < 1$  พฤติกรรมเบี่ยงเบนไปทางลบจากกฎของราอูลท์ แอกติวิตีจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ และจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นต่ำลง องค์ประกอบที่ถูกดูดซึมง่ายจะถูกดูดซึมน้อยลง

เมื่อปริมาณขององค์ประกอบที่ถูกดูดซึมง่ายในเยื่อแผ่นมากขึ้น เยื่อแผ่นก็พองมากขึ้น ทำให้โพลิเมอร์มีขนาดใหญ่ องค์ประกอบอื่นๆ ที่ถูกดูดซึมยากกว่าจะซึมเข้าได้มากขึ้น ค่าการเลือกจึงลดลง การพองตัวของเยื่อแผ่นขึ้นกับโครงสร้างของโซโพลีเมอร์ โพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างตาข่าย การขยายตัวของโซโพลีเมอร์จะถูกจำกัดโดยจำนวนจุดเชื่อมโยง (links) จึงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่ำกว่า ดังแสดงในรูป 15

การเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียลของฟลักซ์ในรูปที่ 16 เป็นผลมาจากความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่กับความเข้มข้น การเพิ่มขึ้นจะถูกจำกัดเมื่อความเข้มข้นสูงๆ เนื่องจากวัสดุไม่สามารถยืดออกไปได้อีก

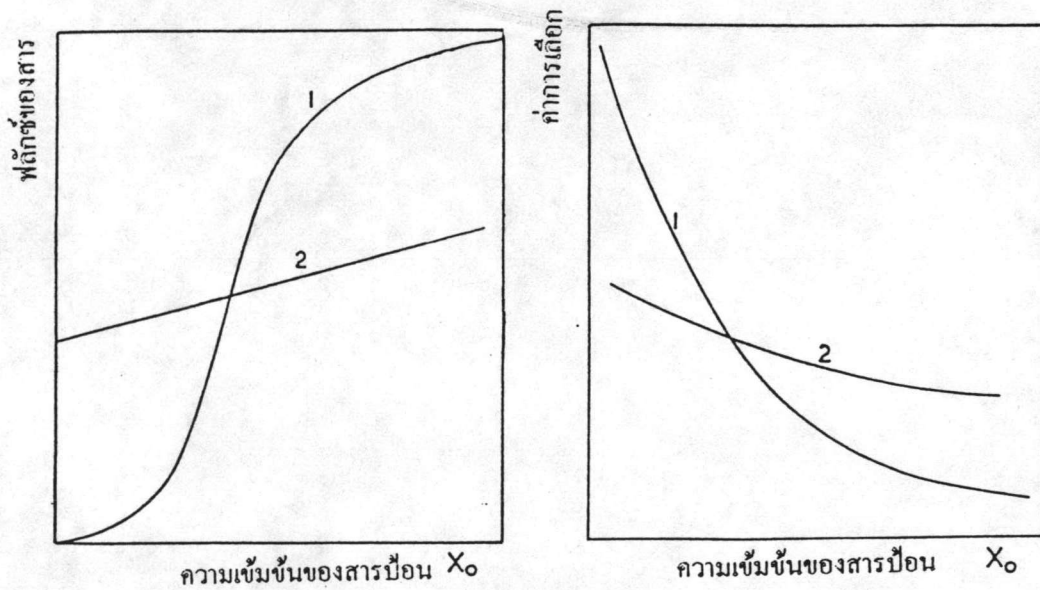
เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซึมง่ายต่ำ อัตราการแพร่ก็ต่ำ ความเข้มข้นของสารที่ผิวด้านเพอร์มิเอทของเยื่อแผ่นก็ต่ำ ผิวเยื่อแผ่นแห้ง โครงสร้างโพลีเมอร์ที่แน่นจะยอมให้องค์ประกอบที่มีความชอบต่ำซึมผ่านได้ยาก ค่าการเลือกสูง

ความเข้มข้นของสารป้อนจะมีผลต่อการกระทำของเยื่อแผ่น ในทางปฏิบัติการเพิ่มความเข้มข้นของตัวทำละลาย จะใช้การต่อโมดูลของเยื่อแผ่นแบบอนุกรม โดยเลือกใช้เยื่อแผ่นที่เหมาะสมในแต่ละความเข้มข้น ดังตัวอย่างในรูป 17



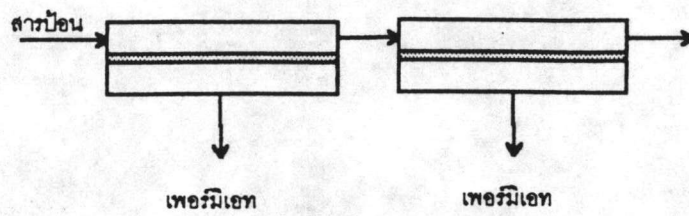
รูปที่ 15 การพองตัวของโพลีเมอร์

- 1 โพลีเมอร์ที่ไม่มีการเชื่อมโยง เมื่อตัวทำละลายที่ถูกดูดซึมได้ง่ายมีปริมาณมาก
- 2 โพลีเมอร์ที่ไม่มีการเชื่อมโยง เมื่อตัวทำละลายที่ถูกดูดซึมได้ง่ายมีปริมาณน้อย
- 3 โพลีเมอร์ที่มีการเชื่อมโยง เมื่อตัวทำละลายที่ถูกดูดซึมได้ง่ายมีปริมาณมาก
- 4 โพลีเมอร์ที่มีการเชื่อมโยง เมื่อตัวทำละลายที่ถูกดูดซึมได้ง่ายมีปริมาณน้อย



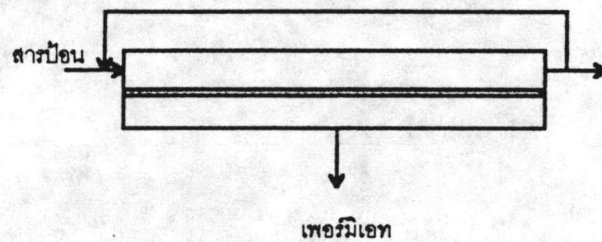
รูปที่ 16 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนต่อฟลักซ์และค่าการเลือก

- 1 เยื่อผ่านโพลีเมอร์ที่ไม่มีการเชื่อมโยง
- 2 เยื่อผ่านโพลีเมอร์ที่มีการเชื่อมโยง



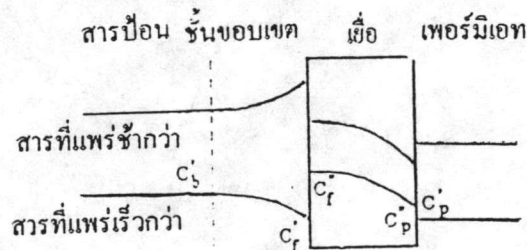
รูปที่ 17 เพอร์เวเพอเรชันต่อเนื่องที่มีการต่อโมดูลแบบอนุกรม

ในสารป้อนที่ความเข้มข้นไม่คงที่ หลีกเลี้ยงได้โดยการตั้งกลับผลิตภัณฑ์บางส่วน เพื่อให้ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วงที่เหมาะสม(รูป 18)



รูปที่ 18 เพอร์เวเพอเรชันต่อเนื่องที่มีการตั้งกลับผลิตภัณฑ์บางส่วน

การเกิดขึ้นขอบเขตที่ผิวเยื่อแผ่น ความเข้มข้นของสารในชั้นขอบเขตจะมีค่าต่าง จากความเข้มข้นในของเหลว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (concentration polarization) ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถูกดูดซึมได้ง่ายที่ลดลงในชั้นขอบเขตจะจำกัดการดูดซึมของเยื่อแผ่น(รูป 19)



รูปที่ 19 แผนภาพแสดงการกระจายของความเข้มข้นในชั้นขอบเขตที่ผิวเยื่อแผ่น

#### 4. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อทุกขั้นตอนการถ่ายเทมวลในกระบวนการเพอร์โวกเซอร์ชัน ผลของอุณหภูมิต่อฟลักซ์ของการซึมผ่าน สัมประสิทธิ์การแพร่ และสัมประสิทธิ์การกระจาย สามารถเขียนได้ในรูปแบบอาร์เรเนียส( Arrhenius-type)

$$J_p = J_0 \exp(E_p / RT)$$

$$S = S_0 \exp(E_s / RT)$$

$E_p$  คือ พลังงานกระตุ้นปรากฏของการซึมผ่าน เป็นผลรวมของพลังงานกระตุ้นปรากฏของการแพร่ และความร้อนในการดูดซึม

$E_s$  คือ ความร้อนของการดูดซึม

ฟลักซ์รวมและฟลักซ์ของแต่ละองค์ประกอบจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลของอุณหภูมิต่อค่าการเลือกขึ้นกับพลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านของสารที่ซึมผ่าน ถ้าสารที่ซึมผ่านได้เร็วมี พลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านสูงกว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าการเลือกลดลง

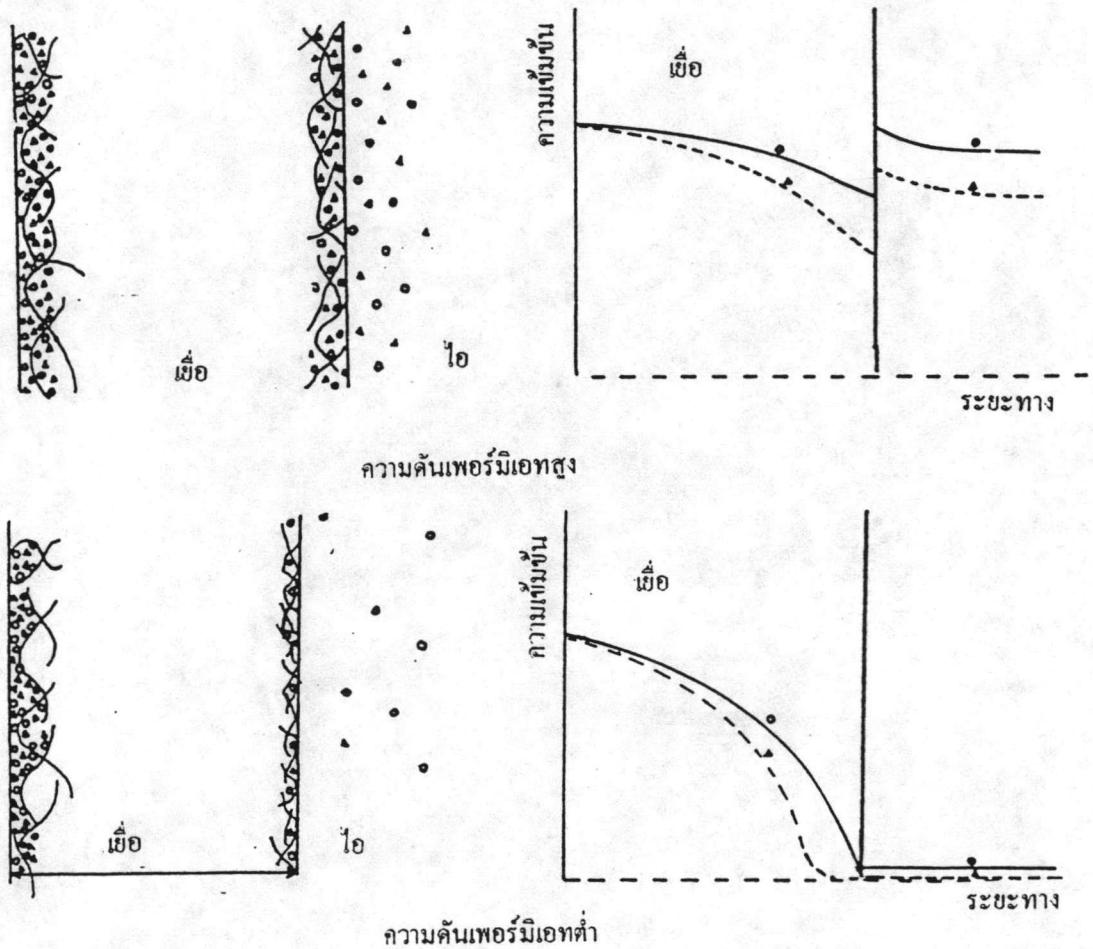
การเพิ่มของอุณหภูมิจะทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น และมักจะทำให้ค่าการเลือกลดลง อุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการเพอร์โวกเซอร์ชันเป็นอย่างมาก เพราะมีการกลายเป็นไอของเพอร์มิเอท ความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอมาจากสารป้อน ถ้าให้ความร้อนแก่ระบบไม่เพียงพอ อุณหภูมิของของเหลวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าฟลักซ์มีค่ามาก อุณหภูมิก็จะลดลงมาก การดำเนินการโดยใช้อุณหภูมิสูง จะต้องให้ความร้อนสูงและต้องใช้ปั๊มสุญญากาศที่มีกำลังสูงมาก

#### 5. ความดันเพอร์มิเอท(รูป 20)

คือความดันรวมของไอที่สัมผัสเยื่อแผ่น เป็นผลลัพธ์จากไอของสารที่ซึมผ่านกับไอที่ถูกดึงไปยังปั๊มสุญญากาศ การเพิ่มความดันไอด้านเพอร์มิเอท จะลดแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวล ฟลักซ์ของสารลดลง ผลที่มีต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์อธิบายได้โดย แผนภาพของทอมป์สัน (Thompson diagram)

การให้ปั๊มสุญญากาศที่มีกำลังมาก ความดันเพอร์มิเอทจะมีค่าน้อย เยื่อแผ่นด้านเพอร์มิเอทจะไม่มี การพองตัว ค่าการเลือกสูง แต่ค่าใช้จ่ายสูง

ในบางระบบ อาจเกิดการอิมตัวของไอขององค์ประกอบหนึ่งในเพอร์มิเอท องค์ประกอบนี้จะเกิดการถ่ายเทได้น้อย องค์ประกอบอื่นๆซึ่งแรงขับมีค่าสูง จะมีฟลักซ์สูงขึ้น ค่าการเลือกจะลดลงอย่างรวดเร็ว พฤติกรรมนี้จะเกิดกับเยื่อแผ่นที่ยอมให้สารที่ระเหยง่ายผ่านได้ดีมาก



รูปที่ 20 ผลของความดันเพอร์มิเอทที่มีต่อการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่น

เยื่อแผ่นและโมดูล

ลักษณะที่ดีของเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์เมเอชัน

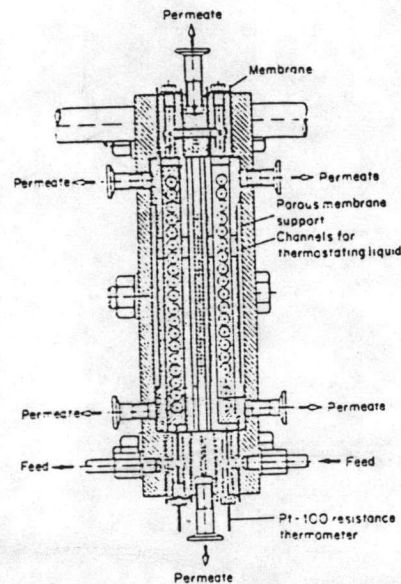
1. ค่าการเลือกและฟลักซ์ผ่านเยื่อแผ่นสูง
2. มีความหนาที่เหมาะสมกับระบบที่ดำเนินการ
3. สามารถดึงเพอร์มิเอทออกได้ง่าย

4. คงรูปภายใต้สภาวะการพองตัว

5. อายุการใช้งานนาน

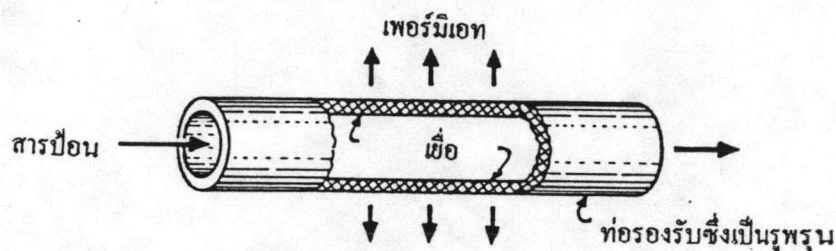
อุปกรณ์ที่ใช้บรรจุเยื่อแผ่นในกระบวนการแยกคือ โมดูล มี 4 แบบ คือ

1. โมดูลแบบแผ่นเรียบและกรอบ(plate and frame) เยื่อแผ่นที่ใช้กับโมดูลเป็นแผ่นเรียบ วัสดุหลายชนิดขึ้นรูปแบบแผ่นเรียบได้ การเปลี่ยนเยื่อแผ่นและทำความสะอาดทำได้ง่าย การควบคุมไม่ให้เกิดชั้นขอบเขตของเหลวทำได้ง่าย การถ่ายเทความร้อนจากสารป้อนไปยังเยื่อแผ่นดี แต่พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดูลค่อนข้างต่ำ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและดูแลรักษาสูง (รูป 21)



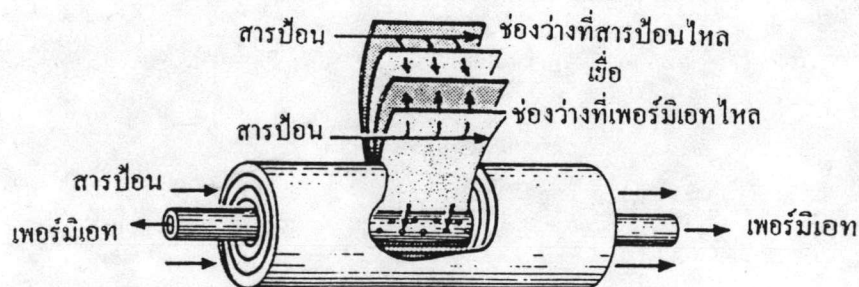
รูปที่ 21 โมดูลแบบแผ่นเรียบและกรอบ

2. โมดูลแบบท่อ ประกอบด้วยท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 1-2 มิลลิเมตร มีชั้นรองรับที่แข็งแรงอาจจะมีเพียงท่อเดียวหรือหลายท่อบรรจุภายในภาชนะ เยื่อแผ่นอาจเคลือบอยู่ด้านในหรือด้านนอกของท่อ เนื่องจากมีขนาดใหญ่ ความดันลดในท่อจึงต่ำ สามารถใช้ท่อยาวมากได้ เหมาะสมที่จะใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและการลงทุนสูง เนื่องจากพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดูลต่ำมาก หลีกเลี่ยงการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันได้โดยใช้อัตราการไหลสารป้อนที่เหมาะสม ใช้กับเพอร์เมอเรนซ์แบบใช้ก๊าซเป็นตัวพา (รูป 22)



รูปที่ 22 ไมโครแบบท่อ

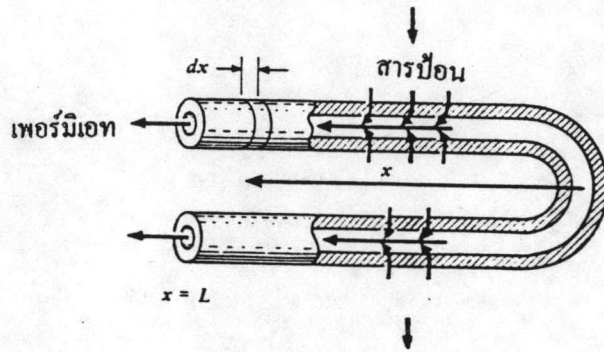
3. ไมโครแบบม้วน แผ่นเยื่อแผ่นและชั้นรองรับที่วางซ้อนกันถูกม้วนรอบท่อกลาง บรรจุภายในภาชนะทรงกระบอก พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของไมโครค่อนข้างสูง ใช้กับเฟอรวเพอเรชันที่ใช้ป้อนสุญญากาศดึงเฟอร์มิเอทจากไมโคร (รูป 23)



รูปที่ 23 ไมโครแบบม้วน

4. ไมโครแบบเส้นใยกลวง เส้นใยมีขนาดเล็กมาก ประมาณ 100 นาโนเมตร และแข็งแรงมาก ไม่ต้องใช้ชั้นรองรับ ชั้นเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุนจะอยู่ภายนอก เส้นใยจะถูกมัดรวมกันและงอเป็นรูปเกือกม้า บรรจุอยู่ในท่อทรงกระบอก พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของไมโครสูงมาก ใช้กับเฟอรวเพอเรชันที่ใช้ป้อนสุญญากาศดึงเฟอร์มิเอทจากไมโคร (รูป 24)

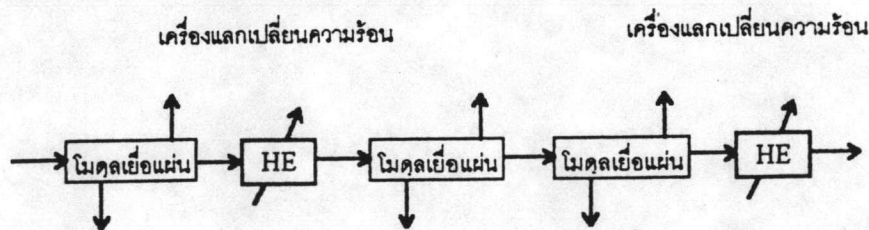




รูปที่ 24 โมดูลแบบเส้นใยคดง

รูปแบบการไหลของสารป้อนในโมดูล ต้องหลีกเลี่ยงการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (concentration polarization) และคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่ให้แก่ระบบ การถ่ายเทความร้อนจากสารป้อนไปยังเยื่อแผ่น ซึ่งมีผลอย่างมากต่อฟลักซ์ของกระบวนการ

ถ้าแรงเสียดทานการไหลของเพอร์มิเอทมีค่าสูง ซึ่งจะส่งผลให้ความดันด้านเพอร์มิเอทเพิ่มโดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ห่างจากท่อสูญญากาศ มีผลให้ฟลักซ์และค่าการเลือกลดลง หรืออาจสูงมากจนทำให้เกิดการควบแน่นของเพอร์มิเอทที่ผิวของเยื่อแผ่น ตำแหน่งการวางท่อดึงสูญญากาศจึงมีความสำคัญมาก ในเพอร์เวเพอเรชันแบบต่อเนื่องต้องจัดให้มีตำแหน่งดึงเพอร์มิเอทออก และแลกเปลี่ยนความร้อนหลายๆตำแหน่ง ดังตัวอย่างในรูป 25



รูปที่ 25 เพอร์เวเพอเรชันแบบต่อเนื่อง