บทที่ 2

ทฤษฎี

งานวิจัยนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเยื่อบางไคโตซาน เยื่อบางโพลิอีเทอร์ซัลโฟนและเยื่อประกอบโพลิอีเทอร์ซัลโฟน/ไคโตซาน ดังต่อไปนี้

2.1 เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ

เยื่อบางทั้งสามชนิดเป็นเยื่อบางประเภทชอบน้ำ (Hydrophlilic) เมื่อนำไปใช้งานในการกรองที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจะทำให้เยื่อบางพองตัวเนื่องจากดูดซับน้ำทำให้รูพรุนเยื่อบางเปลี่ยนขนาดได้ จึงจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมการบวมน้ำของเยื่อบางแต่ละชนิดที่ใช้ โดยการดูดซับน้ำหรือการบวมน้ำเยื่อบางหมายถึงปริมาณน้ำที่เยื่อบางสามารถดูดซับได้ในระยะเวลาที่กำหนด ค่าการบวมน้ำของเยื่อบางสามารถวัดเป็นเปอร์เซนต์ของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้โดยการชั่งน้ำหนักเยื่อบางแผ่นแห้งและน้ำหนักเยื่อบางขณะเปียก ในช่วงเวลาต่างๆ โดยคำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำดังสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ} = \left(\frac{w_w - w_d}{w_d}\right) \times 100\% \qquad (1)$$

เมื่อ W_W น้ำหนักของเยื่อบางขณะเปียก

W_d น้ำหนักของเยื่อบางขณะแห้ง

2.2 ฟลักซ์น้ำดี

ระบบการกรองแบบ dead-end และ crossflow filtration ฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อบางมีความสัมพันธ์กับความดัน ตามสมการ Hargen-Poiseuille สำหรับรูทรงกระบอก (Howell, 1993)

$$J \propto \Delta P$$

$$J = L_P \Delta P$$

$$J = \frac{n\pi r^4}{8\eta l} \Delta P$$

$$J = \frac{\Delta P}{\eta R} \qquad (2)$$

เมื่อ J คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรหรือฟลักซ์การไหลผ่านเยื่อบาง ($L\ m^{-2}\ hr^{-1}$)

L_p คือ สภาพการยอมให้น้ำผ่าน (Hydraulic permeability) มีหน่วย $m\ s^{-1}Pa^{-1}$

n คือ จำนวนรูของเยื่อบาง

r คือ รัศมีของรูเยื่อบาง

η คือ ความหนืดของสารละลายที่เพอมิเอท (Pa s)

l คือ ความหนาของเยื่อบาง

ΔP คือ ผลต่างของความดัน (Pa)

R คือ ความต้านทานการไหลของเยื่อบาง (m^{-1})

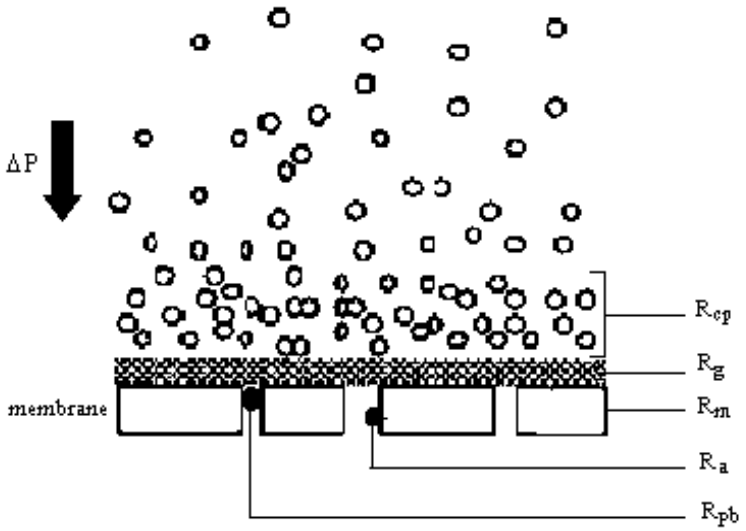
โดยค่า L_p ของกระบวนการแยกในระดับต่างๆ มีค่าที่แตกต่างกัน แสดงดังตาราง 2 ทั้งนี้ค่า L_p ขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนเยื่อบางซึ่งจะมีผลต่อฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อบางเทียบความดัน

ตาราง 2 สภาพการยอมให้น้ำผ่าน (L_p) ของกระบวนการแยกด้วยเยื่อบาง

กระบวนการ	L_p ($m\ s^{-1}\ Pa^{-1}$)	อ้างอิง
Reverse osmosis (RO)	2.77×10^{-14} - 3.95×10^{-13}	Asenjo (1990)
Nanofiltration (NF)	$9.23 \times 10^{-13} – 4.94 \times 10^{-12}$	Afonso และ Vacassy (2001)
Ultrafiltration (UF)	$2.60 \times 10^{-11} – 4.01 \times 10^{-10}$	Nunes และ Juang (1995)
Microfiltration (MF)	$1.38 \times 10^{-10} – 5.54 \times 10^{-10}$	Asenjo (1990)

2.3 แบบจำลองการอุดตัน

ในการทดสอบคุณลักษณะของเยื่อบางชนิดมีรูพรุนระบบกรองแบบปลายปิด (dead end) เหมาะสำหรับการกรองสารละลายที่มีอนุภาคขนาดเล็กและมีความเข้มข้นต่ำ เมื่อป้อนสารละลายในทิศทางตั้งฉากกับเยื่อบาง อนุภาคที่ผ่านเยื่อบางไม่ได้จะสะสมบนผิวของเยื่อบางและบางส่วนจะ อุดตัน (fouling)ในรูพรุน การสะสมอนุภาคเหล่านี้ทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ ฟลักซ์ของตัวทำละลายลดลง โดย Van DEN Berg และคณะ (1990) ได้อธิบายการอุดตันของตัวถูกละลายด้วยแบบจำลองอนุกรมความต้านทานดังนี้



ภาพประกอบ 13 ความต้านทานการไหลตามแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน

อัตราการไหลของสารละลายผ่านเยื่อบางมีความสัมพันธ์กับความดัน เขียนเป็นสมการได้

$$J = \frac{\Delta P - \sigma\Delta\pi}{\eta\left[R_m + (R_{pb} + R_a) + (R_g + R_{CP}\right]}$$

เนื่องจากการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันเป็นการกรองระดับโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังนั้นผลต่างของความดันออสโมติก ($\Delta\pi = \Delta$CRT/M) ของอนุภาคขนาดใหญ่มีค่าน้อยมาก จะได้

$$J = \frac{\Delta P}{\eta R_t} = \frac{\Delta P}{\eta(R_m + R_f + R_p)} \qquad (3)$$

เมื่อ R_t : ความต้านทานรวมในการไหลของเยื่อบาง

R_m: ความต้านทานการไหลของเยื่อบาง

R_f : ความต้านทานภายในเนื่องจากการเกิดอุดตัน

R_P : ความต้านทานภายนอกเนื่องจากการออของอนุภาค

R_a : ความต้านทานการไหลจากการดูดซับ

R_{pb} : ความต้านทานการไหลจากการอุดตันรูพรุน

R_g : ความต้านทานการไหลเนื่องจากการเกิดชั้นเจลที่ผิวหน้าเยื่อบาง

R_{cp}: ความต้านทานการไหลเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชัน

โพลาไรเซชันเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำกลั่น เมื่อใช้น้ำกลั่นทำความสะอาดเยื่อบางหลังจากการกรอง จะสามารถกำจัดได้เฉพาะชั้นโพลาไรซ์ออกไปแต่ไม่อาจทำลายชั้นฟาวลิงได้ ดังนั้นความต้านทานการไหลของน้ำหลังจากล้างเยื่อบาง คือความต้านทานของ R_m และ R_f เขียนเป็นสมการคือ

$$J = \frac{\Delta P}{\mu\left(R_m + R_f\right)} \qquad (4)$$

จากสมการ 4 สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานภายใน (R_f) เนื่องจากเกิด fouling ได้

$$R_f = (R_m+R_f) - R_m \qquad (5)$$

ความต้านทานภายนอกเนื่องจากเกิดโพลาไรเซชัน (R_p) คำนวณได้จากค่า R_t จากสมการ 3 โดย R_p เท่ากับ

$$R_p = R_t - (R_m+R_f) \qquad (6)$$

2.4 การวัดความเข้มข้นของสารละลาย

สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารละลาย โดยที่การดูดกลืนแสงของสารละลายจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความแตกต่างของพลังงานของสองระดับพลังงานที่มีอยู่ในอะตอมหรือโมเลกุลเท่ากับพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ($\Delta E = hf = E_2-E_1$) การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มของสารละลายโดยการวัดการดูดกลืนแสง ตามกฎของแลมเบิร์ตและกฎของเบียร์

กฎของแลมเบิร์ตกล่าวว่า “เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านเนื้อสารที่ความหนาเท่ากัน จะดูดกลืนความเข้มของแสงได้เท่ากันหรืออัตราการลดลงของความเข้มของแสงจะแปรผันตามความหนาของเนื้อสาร”

กฎของเบียร์กล่าวว่า “ เมื่อคลื่นแสงเดินทางผ่านสารที่มีการดูดกลืนแสง ปริมาณของคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น”

จากกฎของแลมเบิร์ตและกฎของเบียร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนและความเข้มข้นของสารละลายได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \varepsilon lc$$

เมื่อ A เป็นปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืน (ไม่มีหน่วย)

I_0 เป็นความเข้มของแสงที่ตกกระทบก่อนผ่านตัวกลาง

I เป็นความเข้มของแสงหลังของแสงหลังผ่านตัวกลาง

l เป็นความหนาของตัวกลางที่แสงผ่าน

c เป็นความเข้มข้นของสารละลาย

ε เป็นโมลาร์แอบซอร์ติวิตี (molar absorptivity)

- rejection (ค่าการกักกันสาร)

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_b} \text{ หรือ } \quad \% \ R = (1 - \frac{C_p}{C_b}) \times 100\% \qquad (7)$$

เมื่อ R เป็นค่าการกักกันสาร โดยมีค่าตั้งแต่ 0 - 1

C_p เป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายหลังผ่านเยื่อบาง

C_b เป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายก่อนผ่านเยื่อบาง

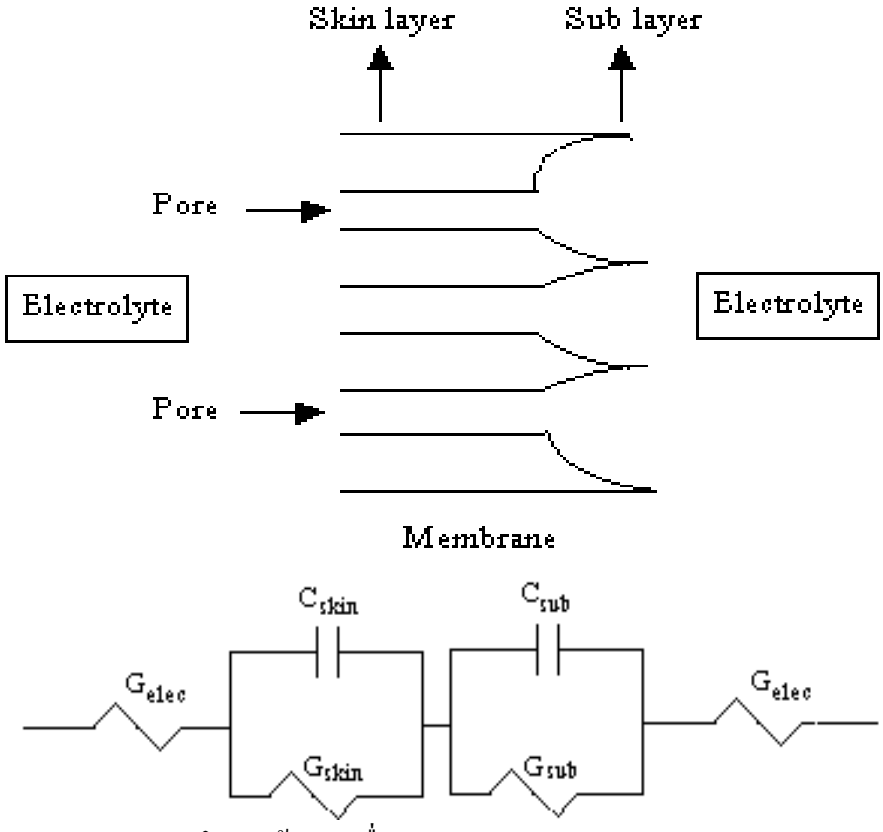
กรณี ค่า R = 0 ($C_p = C_b$) แสดงว่าตัวถูกละลายสามารถผ่านรูเยื่อบางได้ 100%

ค่า R = 1 ($C_p = 0$) แสดงว่าตัวถูกละลายถูกกักกันได้ 100 %

2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางในสารละลายอิเลคโตรไลต์

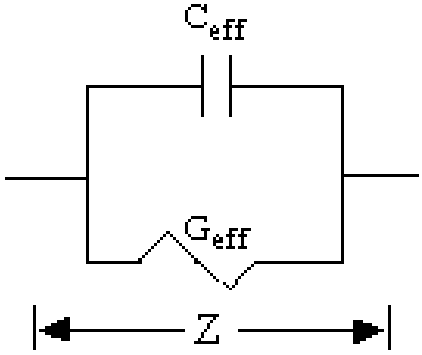
เยื่อบางในสารละลายอิเลคโตรไลต์ จะแสดงคุณสมบัติเป็นสารไดอิเล็กตริก มีสภาพนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดไดโพลและเกิดการโพลาไรเซชันของประจุไฟฟ้าระหว่างผิวของเยื่อบาง โดยเยื่อบางจะหน้าที่เหมือนตัวเก็บประจุไฟฟ้า

Coster และคณะ (1996) ได้จำลองเยื่อบางแบบไม่สมมาตร (Asymmetric membrane)ในสารละลายอิเล็คโตรไลต์ ภาพประกอบ 14 เยื่อบางประกอบด้วยชั้นผิวสองชั้น คือ ชั้นผิว (Skin layer) และชั้นรอง (Sub layer) มีค่าความนำไฟฟ้า (G) และค่าความจุไฟฟ้า (C) ของเยื่อบางแต่ละชั้น โดยค่าของ G_{skin} กับ C_{skin} และ G_{sub} กับ C_{sub} ต่อขนานกัน โดยที่สารละลายอิเลคโตรไลท์มีค่าความนำไฟฟ้ามีค่า G_{elec} ทั้งสองข้างต่ออนุกรมกันกับเยื่อบาง



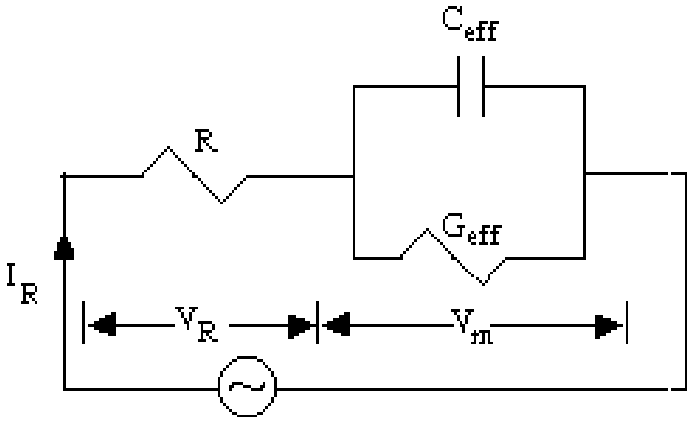
ภาพประกอบ 14 แบบจำลองโครงสร้างของเยื่อบาง

เยื่อบางอยู่ในสารละลายอิเลคโตรไลต์ ไม่สามารถวัดค่าความนำไฟฟ้า (G)และความจุไฟฟ้า (C) ของเยื่อบางจากอุปกรณ์วัดทางไฟฟ้าโดยตรงได้ ทั้งนี้เนื่องจากผิวของเยื่อบางสัมผัสกับสารละลาย จึงพิจารณารวมทั้งของระบบซึ่งประกอบด้วยค่าจากเยื่อบางและของสารละลายอิเลคโตรไลท์ โดยใช้กระแสไฟฟ้าสลับที่ความถี่ต่างๆ วงจรไฟฟ้าเขียนใหม่ได้เป็นดังภาพประกอบ 15 โดยใช้เป็นค่ายังผล (Effective value, eff) แทนด้วยค่าความต้านทานรวมของเยื่อบางและสารละลายหรือเรียกว่าอิมพีแดนซ์ (Z) ความนำไฟฟ้า (Conductance, G_{eff}) ความจุไฟฟ้า (Capacitance, C_{eff})



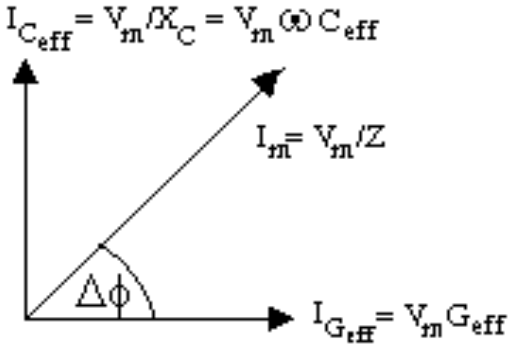
ภาพประกอบ 15 แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางในสารละลายอิเลคโตรไลต์

การหาค่า C_{eff} และ G_{eff} โดยการแช่เยื่อบางในสารละลายอิเลคโตรต์ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานและความจุไฟฟ้าต่อขนานกัน และต่ออนุกรมกันกับต้านทานภายนอก (R) เพื่อคำนวณหากระแสไฟฟ้าในวงจร ภาพประกอบ 16 เมื่อจ่ายสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับที่ความถี่ค่าต่างๆ สามารถวัดความต่างศักย์ ไฟฟ้า V_R และ V_m และผลต่างเฟสระหว่าง V_R กับ V_m สามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้า (I) C_{eff} และ G_{eff} ได้



ภาพประกอบ 16 วงจรไฟฟ้าอย่างง่ายของเยื่อบาง

จากภาพประกอบข้างต้น สามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรม ภาพประกอบ 17 เพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ความนำไฟฟ้า (G_{eff}) และ ความจุไฟฟ้าของเยื่อบาง (C_{eff}) ของเยื่อบางได้ดังนี้



ภาพประกอบ 17 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเยื่อบางในการคำนวณหาค่า Z C_{eff} และ G_{eff}

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมสามารถคำนวณหาค่า Z G_{eff} และ C_{eff} ได้ดังนี้

$$I_R = \frac{V_R}{R} \tag{8}$$

$$Z = \frac{V_m}{I_Z} = \frac{V_m R}{V_R} \tag{9}$$

$$G_{eff} = \frac{\cos\phi}{Z} \tag{10}$$

$$C_{eff} = \frac{\sin\phi}{\omega Z} \tag{11}$$

เมื่อ R ความต้านทานภายนอก (R = 12 kΩ)

I_R กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน

V_R ความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทาน

V_m ความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมเยื่อบาง

ω ความถี่เชิงมุมที่ความถี่ค่าต่างๆ