บทที่ 2

ทฤษฎี

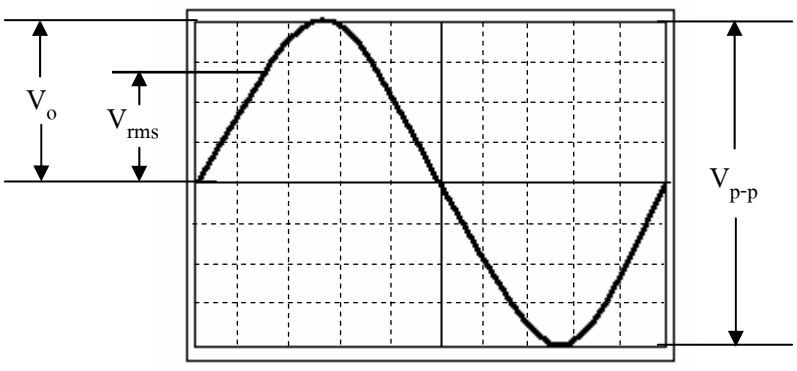
ในงานวิจัยนี้ศึกษาและเตรียมเยื่อบางเซลลูโลสที่ผลิตโดยแบคทีเรีย การศึกษาวิจัยประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ การทดสอบคุณลักษณะของเยื่อบาง และการปรับปรุงคุณภาพเยื่อบางโดยการเหนี่ยวนำเซลล์ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อให้เซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายในเซลล์ ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของเซลล์และคุณสมบัติของเซลลูโลสที่สร้างขึ้น

2.1 ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างแผ่นขนาน

โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ จะหมายถึงค่าหวังผล (Effective value : V_{eff}) หรือค่าเฉลี่ยรากกำลังสอง (Root-mean-square : V_{rms}) แต่สำหรับการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้ออสซิลโลสโคปจะได้ค่าอีกค่าหนึ่งคือ ค่าสูงสุดของความต่างศักย์จากยอดถึงยอด (Peak to peak voltage: $V_{p\text{-}p}$) ในกรณีเป็นคลื่นรูปซายน์ถ้าต้องการเปลี่ยนเป็นค่าหวังผล (V_{eff}) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V_{rms} = \frac{V_{p-p}}{2\sqrt{2}} = \frac{V_o}{\sqrt{2}}$$

เมื่อ $V_{p-p} = 2V_o$



ภาพประกอบที่ 2.1 Peak to peak voltage ($V_{p\text{-}p}$) ค่าหวังผล (V_{eff}) หรือค่าเฉลี่ยรากกำลังสอง (V_{rms}) และแอมพลิจูด (V_o)

เมื่อโลหะสองแผ่นทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าวางขนานกันระยะห่าง d ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.2 โดยที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นขนานเป็น V ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (t) ในลักษณะรูปไซน์ คือ $V = V_o \sin \omega t$ และสัมพันธ์กับค่าสนามไฟฟ้า $E = E_o \sin \omega t$ ดังนี้

$$E\,dl = dV$$

อินทิเกรตสมการข้างต้นเทียบกับระยะห่าง d และเวลา t ใด ๆ

$$\int_0^d E\,dl = \int_0^t dV$$

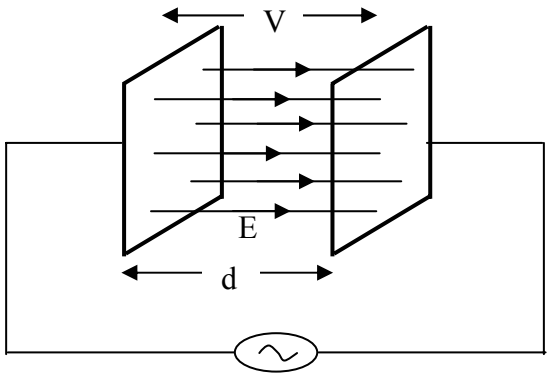
$$\int_0^d E_o \sin\omega t\,dl = \int_0^t d\left(V_o \sin\omega t\right)$$

$$E_o \sin\omega t \int_0^d dl = \int_0^t V_o\,\omega \cos\omega t\;dt$$

$$\left(E_o \sin\omega t\right)\left(d\right) = V_o\,\omega\,\frac{\sin\omega t}{\omega}$$

$$E_o = \frac{V_o}{d}$$

หรือ $$E_{rms} = \frac{V_{rms}}{d}$$



ภาพประกอบที่ 2.2 สนามไฟฟ้าจากแผ่นโลหะคู่ขนาน

2.2 การบวมน้ำ

เยื่อบางเซลลูโลสที่เตรียมได้เป็นเยื่อบางประเภทชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อนำไปใช้งานในการกรองที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจะทำให้เยื่อบางพองตัวเนื่องจากดูดซับน้ำ ทำให้รูพรุนเยื่อบางเปลี่ยนขนาดได้ จึงจำเป็นต้องทราบเวลาและเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเยื่อบาง ซึ่งสามารถวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำคำนวณได้จากสมการ 2.1 (Dubey V., et al., 2002)

$$Q = \left[\left(\frac{W_s}{W_d} \right) - 1 \right] \times 100 \qquad (2.1)$$

โดยที่ Q คือ เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ W_S และ W_d คือ น้ำหนักของเยื่อบางขณะเปียกและขณะแห้งตามลำดับ

2.3 สภาพให้ซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic Permeability)

กระบวนการกรองด้วยเยื่อบางโดยใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อน อัตราการไหลของเพอมิเอทต่อหน่วยพื้นที่ของเยื่อบางเรียกว่า ค่าฟลักซ์ (Flux, J) แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการไหลของเพอมิเอทผ่านเยื่อบางชนิดมีรูพรุน อธิบายโดย Poiseuille' s Law (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) และได้พัฒนาต่อเพื่ออธิบายเยื่อบางที่มีรูคดเคี้ยว ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน (ε) ความคดของรูพรุน (τ) ความหนืดของเพอมิเอท (η) และความหนาของเยื่อบาง (d) กับความดัน (ΔP) และเพอมิเอทฟลักซ์ (J) ที่รู้จักในชื่อสมการ Hagen-Poiseuille ดังนี้

$$J = \frac{\varepsilon r^2}{8 \eta \tau d} \Delta P \qquad (2.2)$$

เมื่อ $$L_P = \frac{\varepsilon r^2}{8 \eta \tau d}$$

จากสมการ Hagen-Poiseuille สามารถแปรผันค่า ΔP แล้วเขียนกราฟระหว่างฟลักซ์น้ำเทียบกับความดัน จะได้ความชันของกราฟซึ่งคือ สภาพให้ซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic Permeability, L_p) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันในกระบวนการกรองระดับต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สภาพให้ซึมผ่านของน้ำ (L_p) ของกระบวนการกรองด้วยเยื่อบาง

กระบวนการ	L_p ($m\ s^{-1}\ Pa^{-1}$)	อ้างอิง
Reverse osmosis (RO)	$2.77 \times 10^{-14} - 3.95 \times 10^{-13}$	Asenjo J.A. (1990)
Nanofiltration (NF)	$9.23 \times 10^{-13} - 4.94 \times 10^{-12}$	Afonso M.D. และคณะ(2001)
Ultrafiltration (UF)	$2.60 \times 10^{-11} - 4.01 \times 10^{-10}$	Nunes S.P. และคณะ (1995)
Microfiltration (MF)	$1.38 \times 10^{-10} - 5.54 \times 10^{-10}$	Asenjo J.A. (1990)

2.4 ความสามารถในการกักกัน (% Rejection)

การกักกันสาร เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของเยื่อบางในการเก็บกัก (Retention) ตัวถูกละลาย อนุภาคและโมเลกุลชนิดต่าง ๆ ไม่ให้ผ่านออกมากับตัวทำละลายได้ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 2.3 (Baker R.W., 2000:34)

$$\%\ \text{Rejection} = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \qquad (2.3)$$

โดยที่ C_f และ C_p คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายก่อนและหลังผ่านเยื่อบางตามลำดับ ในกรณีที่ % Reject = 0 แสดงว่าตัวถูกละลายสามารถผ่านรูเยื่อบางได้ 100% นั่นคือ C_p=C_f ในกรณีที่ทดสอบด้วยระบบกรองแบบปิดตายที่มีปริมาตรสารป้อนแน่นอน การกรองจะทำให้ความเข้มข้นของสารป้อนเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องคิดค่าความเข้มข้นในช่วงเวลาใด ๆ ตามการเก็บตัวอย่างข้อมูล ในกรณีนี้ Devitt E.C. และคณะ (1998) ได้เสนอให้คำนวณเปอร์เซ็นต์การกักกันจากสมการ 2.4 โดยที่ V_p และ V_f คือ ปริมาตรของเพอมิเอทและปริมาตรของสารป้อนที่สุ่มตัวอย่างในช่วงเวลานั้น ๆ

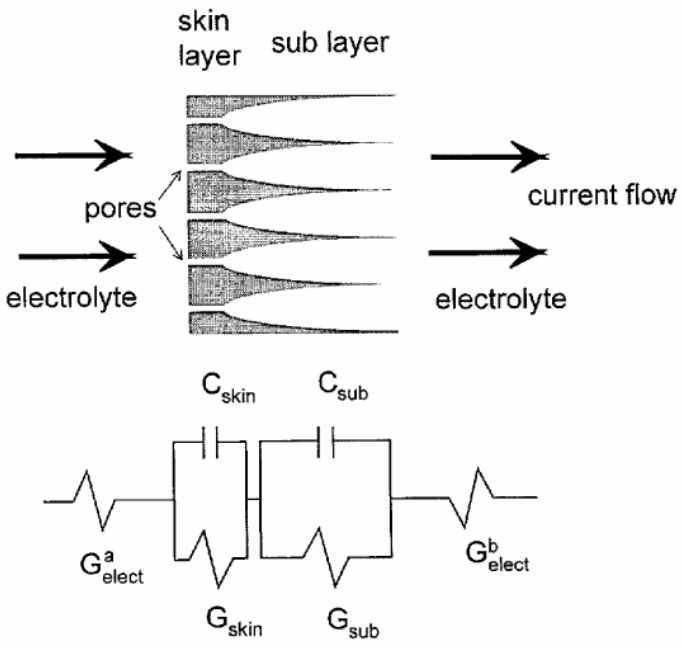
$$\%\ \text{Rejection} = \left(1 - \frac{C_p V_p}{C_f V_f}\right) \times 100 \qquad (2.4)$$

ในกรณีที่ต้องการหาขนาดรูพรุนของเยื่อบางด้วยค่า Molecular Weight Cut Off (MWCO) ซึ่งแสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลายในหน่วยดาลตันที่ถูกกักกันด้วยเยื่อบางสามารถหาได้จากการกักกันตั้งแต่ 90% ขึ้นไป ส่วนตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่านี้จะ

ผ่านเยื่อบางไปได้บ้างหรือมีการกักกันต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม MWCO เป็นค่าที่บอกความสามารถในการกักกันสารของเยื่อบางโดยประมาณเท่านั้น

2.5 อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีของเยื่อบาง

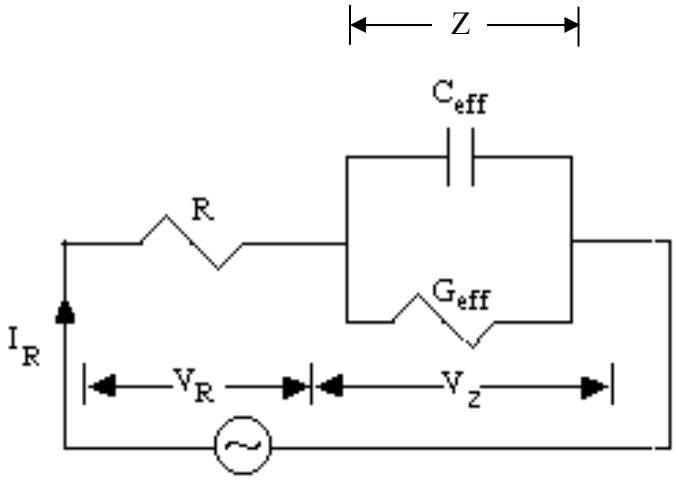
เป็นที่ทราบกันดีว่า การจะจำแนกกระบวนการกรองของเยื่อบางให้มีความละเอียดและชัดเจนต้องทราบระดับโครงสร้างและการกระจายรูบนผิวเยื่อบาง ซึ่งถูกกำหนดโดยคุณสมบัติการซึมผ่าน Coster H.G.L. และคณะ (1996) ได้เสนอแบบจำลองเยื่อบางในสารละลายอิเลคโตรไลต์ซึ่งประกอบด้วยชั้นผิวสองชั้น คือ ชั้นผิวหน้า (Skin layer) และชั้นผิวรอง (Sub layer) ดังภาพประกอบที่ 2.3 ซึ่งแต่ละชั้นของเยื่อบางจะมีค่าความนำไฟฟ้า (Conductance, G_{skin} และ G_{sub}) และค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance, C_{skin} และ C_{sub}) ต่อขนานกัน โดยที่สารละลายอิเลคโตรไลต์มีค่าความนำไฟฟ้า G_{elect} อยู่ทั้งสองข้างซึ่งต่ออนุกรมกันกับเยื่อบาง แต่ทั้งนี้ไม่สามารถวัดค่าความนำไฟฟ้า (G) และความจุไฟฟ้า (C) ของเยื่อบางได้โดยตรง เนื่องจากผิวของเยื่อบางสัมผัสกับสารละลาย จึงพิจารณารวมทั้งระบบของเยื่อบางและของสารละลายอิเลคโตรไลต์ เขียนใหม่ได้ในรูปค่ายังผล (Effective value, eff) คือ G_{eff} และ C_{eff} และจะได้ความต้านทานรวมของเยื่อบางและสารละลายคือ อิมพีแดนซ์ (Z)



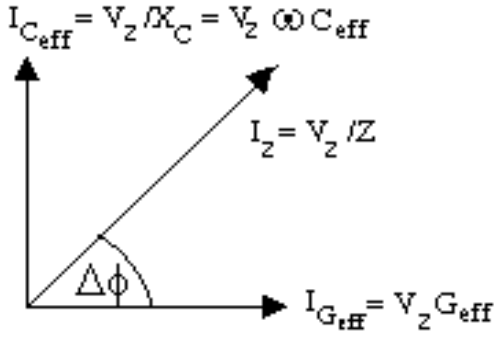
ภาพประกอบที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างของเยื่อบาง

ที่มา : Coster H.G.L. และคณะ (1996)

การวัดค่าอิมพีแดนซ์สามารถทำได้โดยให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ทราบค่าความถี่เชิงมุม ω ไปยังสารละลายอิเลคโตรไลต์ที่มีเยื่อบางแช่อยู่ ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานและความจุไฟฟ้าต่อขนานกัน และต่ออนุกรมกันกับความต้านทานภายนอก เพื่อคำนวณหากระแสในวงจร ดังภาพประกอบที่ 2.4 และจากแผนภาพเฟเซอร์ดังภาพประกอบที่ 2.5 สามารถคำนวนหา Z G_{eff} และ C_{eff} ได้ในเทอมฟังก์ชันความถี่สัญญาณไฟฟ้าดังสมการ 2.5 และ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.4 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อบาง



ภาพประกอบที่ 2.5 แผนภาพเฟเซอร์ของเยื่อบางในสารละลายเกลือ

$$G_{eff}(\omega) = \frac{1}{|Z|}\cos\Delta\phi \tag{2.5}$$

$$C_{eff}(\omega) = \frac{1}{\omega|Z|}\sin\Delta\phi \tag{2.6}$$

เมื่อ $\Delta\phi$ คือ ผลต่างมุมเฟสระหว่างทิศทางของกระแสที่ผ่านความนำไฟฟ้ายังผลกับทิศทางของกระแสในวงจร