

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

เยื่อบางสังเคราะห์ (synthetic membrane) ถูกนำไปใช้ในเทคโนโลยีการกรอง ซึ่งในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางและมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว กระบวนการกรอง อาจอาศัยความร้อน ความเข้มข้นของสาร ความต่างศักย์ไฟฟ้าและความดัน เป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ผ่านเยื่อบาง อาทิเช่น การแยกคอลลอยด์ออกจากสารละลายเพื่อการบำบัดน้ำทิ้ง ให้มีความบริสุทธิ์โดยอาศัยความดันเป็นแรงขับเคลื่อน กระบวนการกรองสารที่ใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนสามารถแบ่งตามระดับความสามารถในการกักกันและกรองได้ 4 ระดับ คือ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) เป็นกระบวนการกรองสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 300,000 Da (Dalton) ขึ้นไป ด้วยเยื่อบางที่มีขนาดรูพรุนระหว่าง 0.1-10 μm กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการกรองสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 500-300,000 Da ด้วยเยื่อบางที่มีขนาดรูพรุนระหว่าง 0.001-0.1 μm ส่วนกระบวนการกรองสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1,000 Da เรียกว่า กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration, NF) และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO) ใช้เยื่อบางที่มีโครงสร้างแบบแน่น (Dense membrane) กรองโมเลกุลขนาดเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 Da

โดยทั่วไประบบการกรองภายใต้แรงดันสามารถแบ่งได้ตามรูปแบบการเดินระบบกรอง ได้ 2 ระบบ คือ ระบบกรองแบบปิดตาย (Dead-end filtration) โดยป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเยื่อบาง เหมาะสำหรับกรองสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากเกิดการอุดตันง่าย จึงเหมาะใช้เป็นชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ อีกระบบหนึ่งคือระบบกรองแบบไหลขวาง (Crossflow filtration) เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางขนานกับผิวเยื่อบาง ทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างสารละลายกับผิวเยื่อบาง จึงเป็นการควบคุมระดับอนุภาคบนผิวเยื่อบางและแรงนี้สามารถกวาดอนุภาคที่เกาะอยู่ที่ผิวเยื่อบางทำให้เกิดการอุดตันช้ากว่า เหมาะสำหรับการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม ในระบบการกรองโดยใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนนี้ จะเรียกสารละลายที่เข้าระบบการกรองว่า สารป้อน (Feed) ส่วนสารละลายที่ผ่านเยื่อบางได้เรียกว่า เพอเมอเท

(Permeate) หากใช้ระบบกรองแบบไหลขวาง สารละลายส่วนที่เหลือเรียกว่า รีเทนเทท (Retentate) ซึ่งจะถูกส่งกลับไปยังสารป้อนอีกครั้ง (Baker R.W., 2000)

เยื่อบางสังเคราะห์อาจผลิตจากวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ทั้งนี้ส่วนใหญ่พบว่าผลิตจากวัสดุอินทรีย์ที่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น polyethylene polycarbonate polysulfone cellulose nitrate และ cellulose acetate เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุตั้งต้นที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาแพง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวัสดุที่ผลิตได้เองในประเทศ เซลลูโลสจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเซลลูโลสเป็นสารพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีปริมาณมากเป็นอันดับหนึ่ง มีผลผลิตโดยประมาณ 10^{11} ตันต่อปี ผลิตโดยพืชและแบคทีเรียบางชนิด สำหรับเซลลูโลสที่ผลิตจากแบคทีเรียมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมือนกับเซลลูโลสจากพืช คือ β -1,4-glucans (Vandamme E.J., et al., 1998) แต่มีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันคือ มีขนาดของเส้นใยที่เล็กเชื่อมกันเป็นร่างแหทำให้มีความเหนียวสูง มีคุณสมบัติอุ้มน้ำไว้ได้มากและทนต่อแรงกระทำที่สูง (Jonas R. and Farah L.F., 1998 ; Yoshinaga F., et al., 1997) แบคทีเรียที่นิยมนำมาผลิตเป็นเยื่อบาง คือ แบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* เนื่องจากมีการสร้างเส้นใยเซลลูโลสขนาดเล็กภายนอกเซลล์ และสามารถผลิตเซลลูโลสได้มากกว่าสายพันธุ์อื่น (Jonas R. and Farah L.F., 1998 ; Vandamme E.J., et al., 1998) ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดแกรมลบ ต้องอาศัยออกซิเจนในการดำรงชีวิต พบได้ตามธรรมชาติและผักที่เน่าเสีย (Dubey, et al., 2002) มีลักษณะเป็นรูปแท่ง นอกจากนี้ได้มีการนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียมาทำเป็นกระดาษที่ต้องการความเหนียวสูง ในทางการแพทย์นำไปใช้ทำเป็น artificial skin เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง หรือนำมาทำเป็นส่วนประกอบของลำโพง (Yoshinaga, et al., 1997)

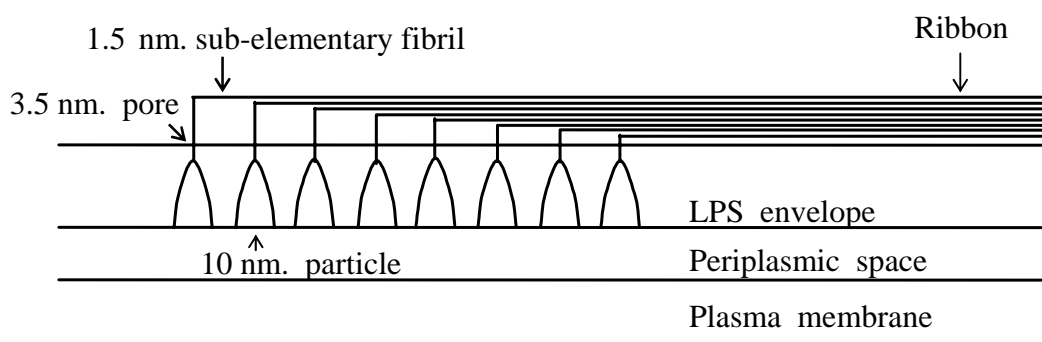
แบคทีเรียจัดเป็นเซลล์โพรคาริโอต (Procaryotic cell) ซึ่งเป็นเซลล์ที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส (Nuclear membrane) แต่มีลักษณะที่เหมือนกับเซลล์อื่นๆ คือ มีเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) ซึ่งเป็นเยื่อบาง ๆ ประกอบด้วยสารประกอบสองชนิดคือ ไขมันชนิด ฟอสโฟลิปิด และ โปรตีน นอกจากนี้เยื่อหุ้มเซลล์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มส่วนที่อยู่ภายในเซลล์ทั้งหมดแล้ว ยังมีการแลกเปลี่ยนสารระหว่างเซลล์และสิ่งที่อยู่โดยรอบ รวมทั้งการกระจายของประจุไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ Tsong T.Y. และคณะ (1987) ได้เสนอว่าโครงสร้างโปรตีนภายในเยื่อหุ้มเซลล์มีการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า โดยที่เยื่อหุ้มโปรตีนมีลักษณะเฉพาะต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลดูดซับพลังงานจากสนามไฟฟ้า หรือระบบมีการเปลี่ยนแปลงสมมูลทางเคมีภายในของเหลวของเซลล์

มีการศึกษาผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเซลล์แขวนลอยพบว่าตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ความถี่ สนามไฟฟ้า ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ล้วนแต่มีผล

ต่อการกระตุ้นการเจริญของเซลล์ทั้งในแง่การเพิ่มจำนวนเซลล์และทำให้เซลล์ตาย อย่างไรก็ตามใน ห้องปฏิบัติการสถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มีการวิจัยผลการเหนี่ยวนำเซลล์ยีสต์ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (อมรรัตน์, 2546) ซึ่งพบว่าหากใช้ค่าศักย์ไฟฟ้า ความถี่ และระยะเวลาของการเหนี่ยวนำเซลล์ที่เหมาะสม จะได้รับความหนาแน่นเซลล์เพิ่มขึ้นประมาณ 1.3 เท่าจากสภาวะปกติ จึงได้นำ แนวความคิดดังกล่าว มาใช้กับแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* ซึ่งยังไม่พบว่ามียานวิจัยที่ใช้ กับแบคทีเรียนี้มาก่อน และคาดว่าเมื่อเซลล์ถูกเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้าด้วยสภาวะที่เหมาะสม อาจมีผล ต่อการผลิตเยื่อบางเซลล์ูโลส

1.2 ตรวจสอบเอกสาร

Jonas R. และ Farah L.F. (1998) ได้เสนอแผนภาพการสังเคราะห์เซลล์ูโลสของ แบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างภายนอกเมมเบรนและพลาสมาเมมเบรน ของเซลล์ ดังภาพประกอบที่ 1.1 โดยจะสร้างสารประกอบเซลล์ูโลส แล้วปล่อยออกมาทางช่อง เปิดที่เรียงอยู่เป็นแถวบนผนังเซลล์ เรียกว่า ไฟบริล (Fibril) และเชื่อมต่อกับสารเซลล์ูโลสอื่น ๆ จะได้เส้นใยขนาดเล็กมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (Ribbon) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $0.1\mu\text{m}$ และ นอกจากนี้ได้รวบรวมผลการศึกษายปริมาณเซลล์ูโลสที่ผลิตได้จากการใช้แหล่งคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 พบว่าการใช้ arabitol และ mannitol เป็นแหล่งคาร์บอน จะได้ เซลล์ูโลสมากกว่าการใช้กลูโคส 6.2 และ 3.8 เท่าตามลำดับ โดยที่ fructose และ glycerol จะให้เซลล์ูโลสใกล้เคียงกับกลูโคส



ภาพประกอบที่ 1.1 การสังเคราะห์เซลล์ูโลสโดย *Acetobacter xylinum*

ที่มา : Jonas R. และ Farah L.F. (1998)

ตารางที่ 1.1 ผลของแหล่งคาร์บอนในการผลิตเซลลูโลสโดย *Acetobacter xylinum*

ที่มา : Jonas R. และ Farah L.F. (1998)

Carbon source	Cellulose yield (%)
Monosaccharides	
D-Glucose	100
D-Fructose	92
D-galactose	3
D-Xylose	11
1-Arabinose	14
L-Sorbose	11
Disaccharides	
Lactose	16
Maltose	7
Sucrose	33
Cellobiose	7-11
Polysaccharides	
Starch	18
Alcohols	
Ethanol	4
Ethylene glycol	1
Diethylene glycol	1
Propylene glycol	8
Glycerol	93
Myo-inositol	17
D-Arabitol	620
D-Mannitol	380
Organic acids	
Citric acid	20
L-Malic acid	15
Succinic acid	12
Others	
Glucono-lactone	62
O-methy-glucose	0.5
No carbon source	2

Glucose was set as 100% yield

สูตรอาหารเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* ที่นักวิจัยหลายท่านนิยมใช้ในการทดลอง คือ สูตรอาหาร HS (Hestrin and Schramm Medium) ที่มีค่าพีเอช 5.0 ซึ่งประกอบไปด้วย 2%(w/v) glucose, 0.5%(w/v) yeast extract, 0.5%(w/v) peptone, 0.27%(w/v) Na_2HPO_4 และ 0.115%(w/v) citric acid สูตรอาหารดังกล่าวใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน โดยกลูโคสจะถูกออกซิไดส์เป็นกรดกลูโคนิก Vandamme E.J. และคณะ (1998) พบว่าถ้าให้กลูโคสมากเกินไปจะมีการเปลี่ยนกลูโคสส่วนเกินนี้ไปเป็นกรดกลูโคนิกมากขึ้น ทำให้ค่าพีเอชในอาหารเพาะเลี้ยงลดลง ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการสร้างเซลลูโลส และนอกจากนี้ยังพบอีกว่าแผ่นเซลลูโลสที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ $142,730 \pm 1,660$ Da

Toda K. และคณะ (1997) ได้เพาะเลี้ยงแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* ในอาหารเพาะเลี้ยง GPY ซึ่งมีสูตรอาหารเหมือนกับสูตรอาหาร HS แต่มีค่าพีเอชที่ 6.0 พบว่าผลได้เซลลูโลส (Cellulose yield) ในสูตรอาหาร GPY มีค่า 0.03 โดยคำนวณจากน้ำหนัก (g) ของเซลลูโลสต่อน้ำหนัก (g) ของกลูโคส แต่เมื่อทำการเพิ่มกรดอะซิติกเข้มข้น 20 g/l ลงในอาหารเพาะเลี้ยงจะทำให้ผลได้เพิ่มขึ้นถึง 0.19 และนอกจากนี้ยังพบอีกว่า ผลได้ของการผลิตเซลลูโลสยังขึ้นกับแหล่งคาร์บอน โดยฟรุกโตส ซูโครสและแมนนิทอล มีผลได้เซลลูโลสประมาณ 0.10 ส่วนกลูโคสและกลีเซอรอลมีผลได้เซลลูโลสประมาณ 0.05

Hwang J.W. และคณะ (1999) ได้ทำการวิจัยการเจริญเติบโตและการผลิตเส้นใยเซลลูโลสของแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* ซึ่งเพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหาร HS ที่มีและไม่มี การควบคุมพีเอช ซึ่งการทดลองได้ตรวจสอบกระบวนการออกซิไดซ์กลูโคส (Glucose oxidase, GOD) ที่ค่าพีเอชคงที่หลายค่าพีเอช โดยกำหนดให้กระบวนการ GOD ของอาหารเพาะเลี้ยงที่พีเอช 4.0 มีค่าเป็น 1.0 พบว่าในกระบวนการเดียวกันนี้ที่ค่าพีเอช 3.5 และ 5.0 มีค่า 0.57 และ 0.30 ตามลำดับ ผลที่ได้นี้สรุปว่าที่ค่าพีเอช 4.0 มีความเหมาะสมต่อการเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดกลูโคนิก แต่ในทางตรงกันข้ามกลับพบว่า ที่ค่าพีเอช 5.0 มีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเซลล์และการผลิตเส้นใยเซลลูโลส เนื่องจากผลได้เซลลูโลสมีค่ามากที่สุด คือ 0.205 รองลงมาคือที่ค่าพีเอช 4.0 และ 6.0 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันคือ 0.15 และ 0.1485 ตามลำดับ

Dubey V. และคณะ (2002) ได้ศึกษาการแยกสารละลายที่มีส่วนผสมของน้ำและเอทานอลด้วยเยื่อบางเซลลูโลสที่ผลิตโดย *Acetobacter xylinum* ซึ่งทำการเพาะเลี้ยงในอาหารที่ประกอบด้วย 5%(w/v) sucrose, 0.5%(w/v) yeast extract, 0.5%(w/v) ammonium sulphate, 0.3%(w/v) potassium hydrogen phosphate และ 0.005%(w/v) magnesium sulphate ค่าพีเอชของอาหารเพาะเลี้ยงเท่ากับ 5.0 พบว่าเยื่อบางที่ผลิตได้มีความหนาประมาณ

50-100 μm มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 20-116 kDa และเยื่อบางที่ได้มีการคัดเลือกการบวมน้ำ (Sorption Selectivity) ที่สูงกว่าเอทานอล โดยที่เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของน้ำบริสุทธิ์มีค่าสูงถึง 135 % ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าเยื่อบางเซลลูโลสเป็นเยื่อบางชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ขณะที่ฟลักซ์น้ำที่ความดัน 1 mmHg มีค่า 31 $\text{g}/\text{m}^2 \text{ hr}$ และยังคงศึกษาพบอีกว่าเยื่อบางเซลลูโลสมีคุณสมบัติความตึงสูงคือ มีค่า tensile strength 0.1 Nmm^{-2} ค่ามอดูลัส 102 Nmm^{-2} และยังทนต่อความเป็นกรดต่างอย่างอ่อน

Wanichapichart P. และคณะ (2002) ได้ศึกษาคูณลักษณะของเยื่อบางเซลลูโลสที่ผลิตโดยแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* ในอาหารเพาะเลี้ยงจากน้ำมะพร้าว และอาหารสังเคราะห์ (HS) พบว่าเซลล์มีการผลิตเส้นใยเซลลูโลสได้ดีในอาหารเพาะเลี้ยงจากน้ำมะพร้าว และได้ศึกษานาครุพรุณและการกระจายของรูพรุณ โดยใช้โปรแกรมคาร์บอนย พบว่าขนาดเฉลี่ยของรูพรุณของเยื่อบางที่เพาะเลี้ยงในสูตรอาหารทั้งสองมีขนาด 0.08-0.09 μm โดยความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้นก่อนการเพาะเลี้ยงไม่ส่งผลต่อผลศึกษาข้างต้น แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าการกระจายขนาดรูพรุณค่อนข้างกว้างอยู่ในช่วง 0.01-0.25 μm เยื่อบางที่ผลิตได้มีความพรุนระหว่าง 1.4-2.4 % งานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาการผลิตเยื่อบางให้มีความพรุนสูงขึ้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในงานวิจัยนี้จะใช้ซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน และมีการปรับปรุงสูตรอาหาร HS ดังนั้นจึงศึกษาผลของปัจจัยแวดล้อม เช่น พีเอช สนามไฟฟ้า ที่มีผลต่อการผลิตเซลลูโลสและคุณสมบัติของเยื่อบาง

มีรายงานสิทธิบัตร (US. 4,942,128) กล่าวถึงการปรับปรุงการผลิตเซลลูโลสจากแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* โดย Brown Jr. R.M. (1990) ซึ่งได้ทำการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียด้วยสูตรอาหาร HS เช่นกันแต่ใช้ carboxymethylcellulose (CMC) เป็นส่วนประกอบแทนกลูโคส และทำการเพาะเลี้ยงในสภาวะนิ่งเป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิ 28°C พบว่าเมื่อเพิ่ม CMC ลงในอาหารเพาะเลี้ยง 0.5%(w/v) - 4.0%(w/v) จะทำให้แบคทีเรียผลิตเซลลูโลสได้มากกว่าชุดควบคุม โดยมีมวลของแผ่นเซลลูโลสมากกว่าชุดควบคุมถึง 4.6-1.3 เท่า ในขณะที่มวลของแผ่นเซลลูโลสแห้งมากกว่าชุดควบคุมถึง 30.1-1.1 เท่า นอกจากนี้มีการนำแผ่นเซลลูโลสที่ผลิตจากแบคทีเรียไปทำเป็นผ้าปิดแผล (wound dressing) โดยละลายใน dimethylacetamide และ lithium chloride แล้วทำเป็นแผ่น (Wan K., 1998) ดังรายละเอียดในสิทธิบัตรเลขที่ US. 5,846,213 และในปี คศ. 2000 Wanatabe K. และคณะ ได้จดสิทธิบัตร (US. 6,153,413) เกี่ยวกับกระบวนการทำแห้งเม็ดเซลลูโลสที่ผลิตจากแบคทีเรียชนิดเดียวกัน และเป็นที่น่าสังเกตว่าตั้งแต่ปี คศ. 1990 เป็นต้นมาไม่มีใครพัฒนาการผลิตเซลลูโลสจากแบคทีเรียชนิดนี้โดยวิธีเหนี่ยวนำเซลล์ด้วยไฟฟ้า

Nakanishi K. และคณะ (1998) ได้ทำการทดลองให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับแก๊ยีสต์ โดยใช้ลวดแพลทตินัมเป็นขั้วไฟฟ้าซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 0.8 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง 5.5 เซนติเมตร พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของยีสต์เพิ่มขึ้นมากกว่าชุดควบคุม 2-3 เท่า หากได้รับการเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 10 mA และกระแสสลับขนาด 100 mA และยังพบอีกว่าการเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 30 mA เป็นค่าที่ขยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์ เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่ามากจะทำให้เซลล์แตกและตายได้

Dimitrov V. และคณะ (2002) ศึกษาการเหนี่ยวนำเซลล์ *E.coli* ที่มีความหนาแน่นเซลล์ 1×10^8 cell ml⁻¹ ด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับระหว่าง 20-240 V cm⁻¹ และความถี่ระหว่าง 0.2-100 Hz โดยใช้แผ่นแพลทตินัมเป็นขั้วไฟฟ้าขนาด 5.5 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.6 มิลลิเมตร พบว่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 100 V cm⁻¹ และความถี่ 1 Hz จำนวนเซลล์ *E.coli* จะมีความหนาแน่นเซลล์มากที่สุด

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเหนี่ยวนำเซลล์ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า Mehedintu M. และ Berg H. (1997) ได้เหนี่ยวนำเซลล์ยีสต์ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ 0.2 และ 0.5 mT ในช่วงความถี่ 10-100 Hz พบว่าที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.5 mT ความถี่ 5 Hz จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น 25% ขณะที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.2 mT ความถี่ 50 Hz จำนวนของเซลล์ลดลง 16%

Palacio L. และคณะ (1999) ทำการศึกษาหาความพรุนของเยื่อบางเชิงพอลิเมอร์ชนิดนี้ เยื่อบาง polycarbonate ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 0.1 μm (C01) 0.4 μm (C04) และ 1 μm (C10) เยื่อบาง $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 0.02 μm (A002) 0.1 μm (A01) และ 0.2 μm (A02) โดยวิธีการต่าง ๆ คือ คำนวณความพรุนจากอัตราส่วนของปริมาตรช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมดของเยื่อบาง ซึ่งสามารถหาได้โดยวิธีวัดความหนาแน่น (Apparent densities) วิธีใช้มาตรวัดความหนาแน่น (Pycnometry) โดยของเหลว) น้ำกลั่น (และวิธีหาความพรุนโดยใช้ปรอท (Hg porosity) ซึ่งล้วนแต่เป็นวิธีหาความพรุนโดยตรง นอกจากนี้ยังมีวิธีหาความพรุนทางอ้อมดังนี้ วิธีหาความพรุนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) วิธีหาความพรุนโดยอากาศ (Air porometry) โดยใช้ Coulter® Porometer II ในการวัด และสุดท้ายหาความพรุนโดยวิธีวัดความสามารถในการซึมผ่านของแก๊ส (Gas penetration) ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1.2 พบว่าค่าความพรุนที่ปรากฏเชิงพอลิเมอร์ (Nominal) ก่อนข้างจะแตกต่างจากผลการทดลองในหลายวิธี อาจเนื่องมาจากหลาย ๆ ปัจจัยด้วยกัน เช่น ไม่มีวิธีการที่เป็นมาตรฐานสำหรับคำนวณค่าความพรุน ซึ่งทำให้ยากต่อการเปรียบเทียบผล นอกจากนั้นกระบวนการหาค่าความพรุนของเยื่อบางเชิงพอลิเมอร์ไม่เป็นที่เปิดเผยถึงข้อมูลที่ได้มา

และค่าความพรุนที่ได้โดยทางอ้อมสามารถใช้ได้ดีกับเยื่อบางที่มีโครงสร้างภายในสม่ำเสมอ และรูพรุนมีรูปร่างเป็นท่อทรงกระบอก

ตารางที่ 1.2 เปรอ์เซ็นต์ความพรุนของเยื่อบางที่หาได้โดยวิธีต่าง ๆ

ที่มา : Palacio L. และคณะ (1999)

	C01	C04	C10	A002	A01	A02
Nominal	4	13	16	25-30	40	50
Apparent densities	9.99	26.14	14.11	46.69	62.73	61.22
Pycnometry	11±5	11±6	15±6	33±5	52±4	51±5
Hg porosity	13±2	24±6	13±4	20±6	31±3	31±3
Gas penetration	14.8±0.2	18.3±0.5	8.9±0.3	29±0.5	53.1±0.6	55.8±0.4
Air porometry	13.1±1.2	13.4±1.4	9.7±1.2			
Sem computerized Image analysis	10.5±1.7	14.2±1.9	8.5±1.5		29.0±1.9	35.9±1.7

Combe C. และคณะ (1999) ได้เตรียมและทดสอบคุณสมบัติของเยื่อบางเซลลูโลสอะซิเตต (CA) เพื่อหาค่า MWCO รัศมีรูพรุน และความพรุนของเยื่อบาง โดยนำเยื่อบาง CA ที่เตรียมได้ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ มาทดสอบการกักกัน PEG (Polyethylene glycol) ที่น้ำหนักโมเลกุล 300 600 3350 และ 10,000 Da เพื่อหาค่า MWCO ของเยื่อบาง แล้วนำไปคำนวณรัศมีรูพรุนจากสมการ Stoke-Einstein และความพรุนจากสมการ Poiseuille นอกจากนี้ยังหาค่ารัศมีรูพรุนและความพรุนจากภาพถ่าย AFM (Atomic force microscopy) โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Topometrix software) ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1.3 ซึ่งพบว่าการคำนวณรัศมีรูพรุนจากภาพถ่าย AFM มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับการคำนวณจากการกักกันของ PEG เนื่องจากการกำหนดขอบของรูพรุนบนภาพถ่ายค่อนข้างยากและซับซ้อน ทำให้ค่ารัศมีรูพรุนที่ประเมินสูงเกินไป

ตารางที่ 1.3 MWCO รัศมีรูพรุน และความพรุนที่คำนวณได้จากวิธีการต่าง ๆ

ที่มา : Combe C. และคณะ (1999)

Membrane	MWCO (g/mol)	Pore radius from rejection (nm)	Porosity from Pore Poiseuille law (%)	radius from AFM (nm)	Porosity from AFM (%)
Annealed 40° C	520	1.62	0.7	13.2	6.2
Annealed 60° C	410	1.56	0.4	9.1	3.1
Annealed 80° C	300	1.57	0.2	3.0	4.0
Hydrolyzed 10 min, annealed 40° C	930	1.70	1.4	11.5	6.5
Oxidized 2 h, Annealed 40° C	830	1.69	0.5	15.0	9.0

สุนารี บดีพงศ์ (2546) ได้ศึกษาการผลิตรูพรุนระดับไมโครบนแผ่นพอลิคาร์บอเนต โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์ ซึ่งใช้โปรแกรมคาร์นอย (Carnoy Software) ในการวิเคราะห์หาขนาดรูและความพรุน พบว่าการกระจายขนาดของรูพรุนเป็นช่วงแคบระหว่าง 0.05-0.15 μm เนื่องจากรูพรุนมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกและมีขนาดใกล้เคียงกัน

1.3 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของพีเอชต่อการผลิตเซลล์ูโลสจากแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum*
2. ศึกษาผลของไฟฟ้าต่อการผลิตเซลล์ูโลสจากแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum*
3. ศึกษาคุณลักษณะของเยื่อบางเซลล์ูโลสที่เตรียมได้
4. พัฒนาแผ่นเยื่อบางที่ผลิตจากแบคทีเรียให้มีความพรุนสูงระดับ 2.5% หรือมากกว่า และมีขนาดรูระหว่าง 0.01 – 0.1 μm