บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้เตรียมและทดสอบเยื่อบางไคโตซานและเยื่อประกอบโพลิอีเทอร์ซัลโฟน/ไคโตซาน ซึ่งมีผลสรุปแยกตามชนิดของเยื่อบางและการทดสอบดังนี้

5.1 เยื่อบางไคโตซาน

เยื่อบางไคโตซานเตรียมแบบอบแห้งชนิด CH2D มีความหนาน้อยกว่าเยื่อบางที่เตรียมแบบเปลี่ยนเฟสชนิด CH2PH , CH25PEG และ CH28PEG แต่มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำสูงกว่า โดยเยื่อบางทั้งสี่ชนิดดูดซับน้ำได้อิ่มตัวภายใน 5 นาที เยื่อบาง CH2D เป็นชนิดเนื้อแน่นซึ่งน้ำไม่สามารถผ่านได้แม้จะใช้ความดันสูงถึง 900 kPa และจากภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า ไม่สามารถเห็นรูพรุน ส่วนเยื่อบางอีกสามชนิดเป็นแบบมีรูพรุนโดยเยื่อบาง CH28PEG มีค่าสภาพการยอมให้น้ำผ่าน (L_p) สูงสุด และเยื่อบาง CH25PEG มีค่า L_p สูงกว่าเยื่อบาง CH2PH เมื่อกรองสารละลาย BSA(MW 67 kDa) พบว่าเยื่อบาง CH25PEG และเยื่อบาง CH28PEG สามารถกักกัน BSA ได้ 100 % ในการกรองสารละลาย PEG เพื่อหา MWCO ของเยื่อบางชนิดมีรูพรุนนั้นพบว่าเยื่อบาง CH25PEG มีค่า MWCO 10 kDa และเยื่อบาง CH28PEG มีค่า MWCO 35 kDa ส่วนเยื่อบาง CH2PH ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากให้ค่า L_p ต่ำ

5.2 เยื่อประกอบโพลิอีเทอร์ซัลโฟน/ไคโตซาน

การเคลือบไคโตซานทำให้ลดการบวมน้ำของเยื่อฐานโพลิอีเทอร์ซัลโฟน (Polyethersulfone, PES) ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Thacharodi D. และ Panduranga Rao K. (1995) ที่รายงานโดยการเคลือบไคโตซานบนเยื่อฐานคอลลาเจน (Collagen) การเคลือบด้วยวิธีอัดความดัน (PES/CH2P) และวิธีรีดบนผิวหน้า (PES/CH25PEG) ไม่ทำให้ความหนาของเยื่อบางเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเยื่อประกอบมีค่าน้อยกว่าเยื่อฐาน โดยเยื่อบางทั้งสามชนิดสามารถดูดซับน้ำได้อิ่มตัวภายใน 1 นาที เยื่อบาง PES เยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG มีค่าสภาพการยอมให้น้ำผ่าน (L_p) เท่ากับ 4.99×10^{-8} 1.22×10^{-8} และ 1.78×10^{-10} $m^3 N^{-1} s^{-1}$ ตามลำดับ เยื่อบางทั้งสามชนิดสามารถกักกัน BSA ได้ 27% 80% และ 100% ตามลำดับ ส่วนการกรอง PEG พบว่าเยื่อประกอบ PES/CH25PEG เพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่สามารถกรอง PEG ได้ ซึ่งกักกัน PEG ที่มีน้ำหนัก

โมเลกุล 10,000 Da ได้ 46% และกักกัน PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da ได้ 64% แสดงว่าเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มี MWCO มากกว่า 35 kDa

5.3 ความต้านทานการไหลของน้ำและค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางหลังจากการกรองสารละลาย

5.3.1 เยื่อบางไคโตซาน

หลังจากการกรอง BSA และ PEG แล้วพบว่าความต้านทานการไหลของเยื่อบาง CH28PEG มีค่าสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG เนื่องจากเยื่อบาง CH28PEG มีความพรุนและขนาดรูใหญ่กว่า ทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนสูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาค่าความต้านทานของการไหลหลังการอุดตันในรู (R_f) ส่วนผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ระหว่างความถี่ 5 Hz – 1 kHz พบว่าเยื่อบาง CH2D มีค่า Zสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG แสดงว่าเยื่อบาง CH28PEG ซึ่งมีขนาดรูใหญ่และความพรุนสูงกว่า (จากภาพถ่าย SEM) จะให้ค่า Z ที่ต่ำกว่า และพบว่าค่า Z ของเยื่อบางหลังจากการกรอง BSA และ PEG มีค่าสูงขึ้น แสดงว่าเกิดการอุดตันภายในรูหรืออาจเกิดจากการออของอนุภาคที่ผิวหน้าเยื่อบางทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เพิ่มขึ้น

5.3.2 เยื่อประกอบโพลิอีเทอร์ซัลโฟน/ไคโตซาน

ความต้านทานการไหล (R_f) ของเยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG หลังการกรอง BSA มีค่าเท่ากับ 1.12×10^{12} m^{-1} และ 8.19×10^{12} m^{-1} ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเยื่อบาง PES (0.02×10^{12} m^{-1}) สำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางพบว่าเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มีค่า Z สูงกว่าเยื่อประกอบ PES/CH2P แสดงว่าการเคลือบไคโตซานแบบรีดบนผิวหน้าเยื่อฐาน (PES) ทำให้เยื่อฐานมีขนาดรูเล็กลงกว่าวิธีเคลือบแบบอัดความดัน ค่า Z ของเยื่อประกอบ PES/CH25PEG มีค่าสูงกว่าเยื่อบางอีกสองชนิด

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเยื่อบางดังกล่าวข้างต้นพบว่า หากเปอร์เซ็นต์การกักกันสูง ความต้านทานการไหลของน้ำหลังจากการอุดตันจะสูงตาม ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าอิมพีแดนซ์ แสดงว่าขณะที่ดำเนินการกรอง หากนำเทคนิคการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบางไปใช้ในระบบการกรองน่าจะเป็นดัชนีชี้บอกระดับการอุดตันได้ วิธีดังกล่าวอาจช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับการทำความสะอาดระบบการกรอง

ตาราง 16 คุณลักษณะของเยื่อบางไคโตซานและเยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

คุณสมบัติ	เยื่อบาง CH2D	เยื่อบาง CH2PH	เยื่อบาง CH25PEG	เยื่อบาง CH28PEG	เยื่อบาง PES	เยื่อประกอบ PES/CH2P	เยื่อประกอบ PES/CH25PEG
ความหนา (μm)	82.67 ± 5.21	89.32 ± 2.14	98.58 ± 5.21	101.06 ± 6.31	162.20 ± 0.45	162.20 ± 0.45	162.15 ± 2.95
% การบวมน้ำ	115.59 ± 4.19	140.80 ± 5.39	58.93 ± 6.29	33.78 ± 5.70	193.06 ± 9.82	167.42 ± 9.90	157.78 ± 3.14
ขนาดรูเฉลี่ย (μm)	-	ไม่เห็นรู	0.05 ± 0.02	0.08 ± 0.03	0.26 ± 0.15	0.22 ± 0.12	0.04 ± 0.01
ความพรุน (%)	-	-	0.45%	2.15%	6.38 %	3.59 %	0.08%
L_p ($m^3 N^{-1} s^{-1}$)	-	0.39×10^{-11}	3.65×10^{-11}	7.78×10^{-11}	4.99×10^{-8}	1.22×10^{-8}	1.78×10^{-10}
MWCO ของเยื่อบาง	-	-	10 kDa	35 kDa	-	-	> 35 kDa

ตาราง 17 ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อบางไคโตซานและเยื่อประกอบ PES/CH2P และ PES/CH25PEG

คุณสมบัติ	เยื่อบาง CH2D	เยื่อบาง CH2PH	เยื่อบาง CH25PEG	เยื่อบาง CH28PEG	เยื่อบาง PES	เยื่อประกอบ PES/CH2P	เยื่อประกอบ PES/CH25PEG
Z เยื่อบางสะอาด	4.97 ± 0.24	-	4.04 ± 0.15	1.89 ± 0.16	2.40 ± 0.06	2.63 ± 0.19	3.36 ± 0.17
Z หลังกรอง PEG 10 kDa	-	-	4.11 ± 0.16	2.04 ± 0.14	-	-	3.40 ± 0.13
Z หลังกรอง PEG 35 kDa	-	-	4.24 ± 0.12	2.22 ± 0.13	-	-	3.68 ± 0.11
Z หลังกรอง BSA 67 kDa	-	-	4.44 ± 0.15	2.49 ± 0.13	3.84 ± 0.19	3.94 ± 0.08	4.17 ± 0.14

หมายเหตุ ค่าอิมพีแดนซ์ Z (kΩ) ในช่วงความถี่ 50 Hz - 1 kHz

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากไคโตซานสามารถละลายได้ดีในกรดอินทรีย์ หากใช้เยื่อบางชนิดนี้กรองสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดจะทำให้ไคโตซานละลายออกมาปนกับเพอมิเอทได้และทำให้คุณสมบัติการกรองสูญเสียไปได้ง่าย งานวิจัยต่อไปควรเชื่อมขวางไคโตซานด้วยกลูตาลาดีไฮด์ เนื่องจากกลูตาลาดีไฮด์ทำให้เยื่อบางไคโตซานสามารถทนต่อสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดได้ตามที่ Yang (1984) แนะนำ นอกจากนี้ไคโตซานที่ละลายในกรด เมื่อทำเป็นเยื่อบางจะมีประจุตรึงชนิดบวกจึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้กรองสารละลาย BSA ที่มีค่า pH > 4.7 เนื่องจาก BSA จะมีประจุลบ (Richard, 2000) จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่าง BSA และเยื่อบางไคโตซาน เยื่อบางชนิดนี้จึงน่าจะเหมาะกับการกรองประจุบวกของโลหะธาตุที่ปนอยู่ในสารละลาย

สำหรับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเยื่อบาง งานวิจัยนี้เปรียบเทียบค่าที่วัดได้ระหว่างเยื่อบางที่สะอาดและเยื่อบางที่อุดตันด้วย BSA และ PEG อย่างไรก็ดีการไม่ได้วัดค่าอิมพีแดนซ์ก่อนการล้างเยื่อบางทำให้ไม่สามารถมั่นใจได้ว่าการล้างโดยวิธีเขย่าในน้ำกลั่น (วิธีการข้อ3.4.3) จะกำจัด BSA และ PEG ที่เกาะบนผิวหน้าได้ ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์และค่าความต้านทานการไหลของน้ำหลังการอุดตันภายในรูพรุนที่รายงานในผลการทดลองข้อ 4.1.5 และ 4.1.6 ยังเป็นที่กังขา

1. การคำนวณค่าความต้านทาน R_f ไม่เหมาะสำหรับการกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุน เพราะว่าจะเกิดการอุดตันเนื่องจากการดูดซับที่ผนังรูเยื่อบาง เมื่อทำการวัดฟลักซ์น้ำดีหลังจากการกรองสารละลาย ทำให้อนุภาคหลุดออกมาจากรูของเยื่อบางได้ ส่งผลการคำนวณค่า R_f ไม่ตรงกับค่าจริง

ไคโตซาน

CH25PEG มีขนาดรูเฉลี่ย 0.04 $\pm$ 0.02 ไมครอน ความพรุน 0.45 % และเยื่อบาง CH28PEG มีขนาดรูเฉลี่ย 0.08 $\pm$0.03 ไมครอน ความพรุน 2.15 % พบว่าฟลักซ์น้ำดีของเยื่อบาง CH28PEG มีค่าสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG และเยื่อบาง CH2P แสดงว่าการเตรียมเยื่อบางแบบเปลี่ยนเฟสทำให้เกิดรูพรุนและการผสม PEG ลงในสารละลายไคโตซานช่วยให้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยเยื่อบาง CH2P CH25PEG และ CH28PEG โดยที่ค่า L_p ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG อยู่ในกระบวนการกรองระดับ UF จึงทดสอบการกรองสารละลาย BSA (MW 67,000 Da) เข้มข้น 1 mg/ml และ PEG (MW 10,000 Da และ 35,000 Da) เข้มข้น 50 ppm ที่ความดัน 100 kPa คงที่ตลอดการกรอง ผลปรากฏว่าเยื่อบางทั้งสองสามารถกักกัน BSA ได้ 100 % และสามารถกักกัน PEG ทั้งสองขนาดน้ำหนักโมเลกุลได้ใกล้เคียงกัน คือเยื่อบาง CH25PEG สามารถกักกัน PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da ได้ 92.5 % $\pm$ 3.2 % และกักกัน PEG น้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da ได้ 96.4 % $\pm$ 1.4 % ส่วนเยื่อบาง CH28PEG สามารถกักกัน PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da ได้ 87.0 % $\pm$ 2.3 % และกักกัน PEG น้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da ได้ 93.8 % $\pm$ 0.5 %

การศึกษาค่าความต้านทาน R_f และ R_p ของการกรอง BSA พบว่าเยื่อบาง CH25PEG มีค่า R_f น้อยกว่าเยื่อบาง CH28PEG เนื่องจากเยื่อบาง CH25PEG มีความพรุนและขนาดรูเล็กกว่า ทำให้ BSA อุดตันที่ผิวหน้าเยื่อบางสูงจึงส่งผลให้ R_p มีค่าสูงกว่าด้วย ส่วนค่า R_f และ R_p ของการกรอง PEG ของเยื่อบาง CH25PEG มีค่าสูงกว่าเยื่อบาง CH28PEG โดยการกรอง PEG น้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da มีค่า R_f และ R_p สูงกว่าการกรอง PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da ซึ่งค่าความต้านทานนี้สอดคล้องกับค่าการกักกัน PEG

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อบางในสารละลายโปแตสคลอไรด์ ความเข้มข้น 1.00 mM พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ในระหว่างความถี่ 50 Hz – 1 kHz ของเยื่อบาง CH2D ซึ่งเป็นแบบเนื้อแน่นหรือไม่มีรูพรุน มีค่า Z สูงสุด ส่วนเยื่อบาง CH25PEG มีค่า Z สูงกว่าเยื่อบาง CH28PEG แสดงว่าเยื่อ

บาง CH28PEG มีขนาดรูหรือความพรุนสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG ซึ่งสอดคล้องกับค่าฟลักซ์น้ำและภาพถ่าย SEM ส่วนความนำไฟฟ้า (G_{eff}) ของเยื่อบาง CH25PEG ในช่วงความถี่ 50 Hz – 1 kHz มีค่าสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG และเยื่อบาง CH2D ชี้ให้เห็นว่าเยื่อบางที่มีขนาดรูหรือความพรุนสูงจะให้ค่าความนำไฟฟ้าได้ดี และค่าความจุไฟฟ้า (C_{eff}) ที่ความถี่เดียวกันมีค่า C_{eff} เท่ากับศูนย์เนื่องจากผลต่างมุมเฟสระหว่างกระแสของวงจรกับกระแสที่ผ่านเยื่อบางมีค่าเท่ากับศูนย์และที่ความถี่ 4 kHz ค่า C_{eff} ของเยื่อบาง CH2D มีค่าสูงกว่าเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG ตามลำดับ

หลังจากการกรอง BSA แล้วนำเยื่อบางมาวัดสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อศึกษาผลของการอุดตันภายในรูเยื่อบาง พบว่าค่า Z ของเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 9% และ 31% ตามลำดับ แสดงว่า BSA อุดตันภายในรูของเยื่อบาง CH28PEG ได้มากกว่าเยื่อบาง CH25PEG ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานการไหล (R_f) ส่วนความนำไฟฟ้ามีค่าลดลงจากเดิม ส่วนความจุไฟฟ้าของเยื่อบางมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเดิม เนื่องจาก BSA อุดตันภายในรู ทำให้เกิดการออของประจุที่ผิวหน้าของเยื่อบาง

ส่วนค่าทางไฟฟ้าของเยื่อบางหลังจากการกรอง PEG พบว่าเยื่อบาง CH25PEG และ CH28PEG ระหว่างความถี่ 50 Hz – 1kHz ค่า Z ของการกรอง PEG น้ำหนักโมเลกุล 35,000 Da สูงกว่าค่า Z ของการกรอง PEG น้ำหนักโมเลกุล 10,000 Da เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าการกักกัน PEG ส่วนค่า G_{eff} ของการกรอง PEG ทั้งสองขนาดมีค่าใกล้เคียงกัน และค่า C_{eff} ของเยื่อบางทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเดิม เนื่องจากการอุดตันของ PEG ภายในรูของเยื่อบาง