3 ผลการทดลอง

3.1 เยื่อประกอบที่เตรียมโดยวิธีเคลือบแบบจุ่ม

การเคลือบโดยวิธีจุ่มนี้ทำให้เยื่อฐานหนาขึ้นกว่าเดิม กล่าวคือ เยื่อชนิด C12 และ C25 เพิ่มความหนาจาก 4.89±0.13 μm และ 5.38±0.14 μm เป็น 7.15±0.13 μm และ 8.83±0.83 μm ตามลำดับ จะเห็นว่าการเคลือบนาน 1 นาทีจะให้เยื่อฐานหนาขึ้นเล็กน้อย ความหนานี้วัดเมื่อไคโตแซนบนเยื่อฐานแห้งแล้ว จากการศึกษาการบวมน้ำของเยื่อไคโตแซนที่ไม่เชื่อมขวางและเชื่อมขวางตามวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 พบว่าเยื่อไคโตแซนที่เชื่อมขวางแล้วดูดซับน้ำลดลงเมื่อเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางเล็กน้อย ขณะที่เยื่อเซลลูโลสดูดซับน้ำได้สูงกว่า 100% สูงกว่าเยื่อไคโตแซน (ภาพ Figure 15 a และ b ในภาคผนวก 5 และ 6) จากข้อมูลการบวมน้ำนี้ ทำให้ทราบว่าทั้งเยื่อฐานเซลลูโลสและไคโตแซนที่เคลือบบนผิวเป็นพอลิเมอร์ชนิด Hydrophilic ทั้งคู่ แสดงว่าเมื่อเยื่อเปียกน้ำในระหว่างการใช้กรอง ความหนาของเยื่อจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ขนาดรูที่ถูกเคลือบเล็กลงด้วย อย่างไรก็ดีหากจะนำไปใช้กรอง ผิวด้านล่างควรมีความพรุนสูง ฉะนั้นการเคลือบโดยวิธีจุ่มจะทำให้ไคโตแซนปิดรูด้านล่างของเยื่อฐานด้วย จึงไม่เหมาะกับงานนี้

3.2 เยื่อประกอบที่เตรียมโดยวิธีอัดความดัน

ทดลองเคลือบโดยบันทึกเวลาที่ใช้ในการอัดความดันเพื่อให้ไคโตแซนผ่านจากด้าน Skin layer ไปยังด้าน Sub layer ของเยื่อฐาน (ดูภาพประกอบใน Figure 6) พบว่าสำหรับไคโตแซน 1% ปริมาตร 1 ml ต้องใช้ความดัน 100 kPa อัดเป็นเวลานาน 5 นาที จึงจะมีสารละลายทะลุผ่านไปยังผิวล่างได้ ซึ่งสามารถทราบจากการสังเกตการไหลของน้ำที่อยู่ในส่วนของ Drainage ออกมาจากท่อเนื่องจากไคโตแซนเข้าไปไล่ที่นั่นเอง จึงแบ่งการทดสอบเยื่อประกอบที่ได้เป็น 2 ส่วน คือ วัดฟลักซ์น้ำดีเพื่อหาค่าสภาพนำน้ำ และศึกษาจากภาพถ่าย SEM ดังนี้

3.2.1 ฟลักซ์น้ำดี

Figure 7 เปรียบเทียบฟลักซ์น้ำดีก่อนและหลังการเคลือบของเยื่อชุด C12 และ C25 พบว่าการเคลือบทำให้ฟลักซ์น้ำดีในเยื่อทั้ง 2 ชนิดลดลง จากกราฟจะเห็นว่าฟลักซ์น้ำดีของเยื่อ C12 และ C12CH ลดลงจาก 140 $Lm^{-2}h^{-1}$ เหลือประมาณ 30 $Lm^{-2}h^{-1}$ (ประมาณ 3 เท่า) และของเยื่อ C25 ซึ่งผลิตจากจำนวนจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่นกว่า ให้ผลฟลักซ์น้ำดีลดลงเช่นกันกล่าวคือลดจาก 30 $Lm^{-2}h^{-1}$ เป็น 18 $Lm^{-2}h^{-1}$ (ประมาณ 2 เท่า) การศึกษานี้สามารถตีความได้สองนัยคือ **ไคโตแซนทำให้เยื่อมีรูแคบลง** และ **ไคโตแซนอุดรูเดิมซึ่งเล็กอยู่แล้วให้ตันแล้วทำให้จำนวนรูลดลงตาม** สมมติฐานนี้จะศึกษาด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดต่อไป

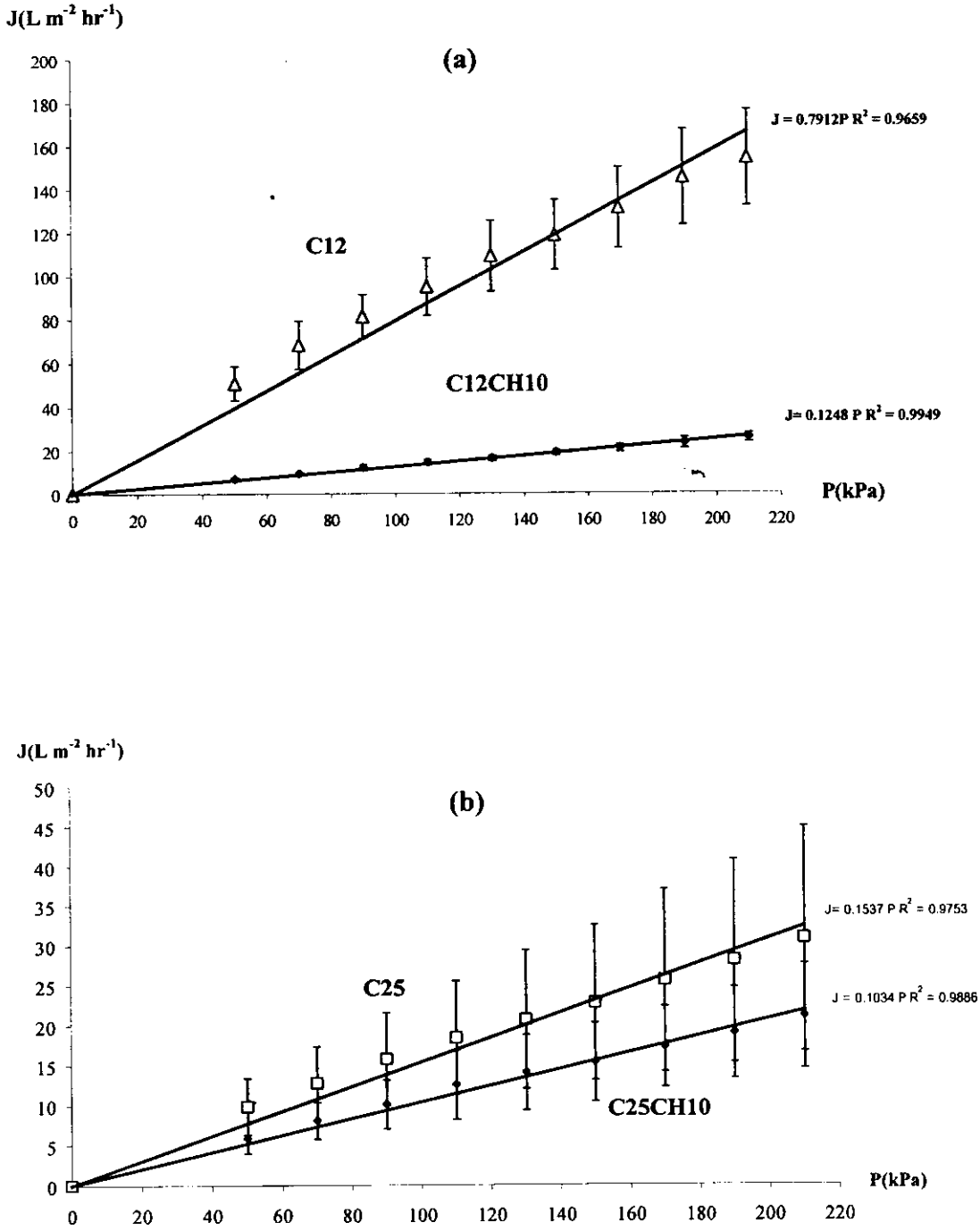


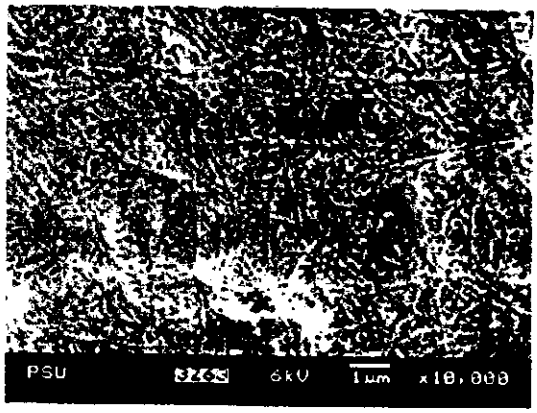
Figure 7 Water flux obtained from cellulose and cellulose/chitosan composite membranes.

(a) comparing between cellulose membrane (C12) and composite membrane (C12CH10)

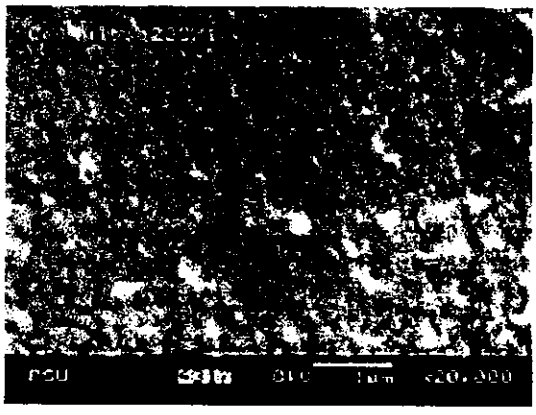
(b) comparing between cellulose membrane (C25) and composite membrane (C25CH10)

3.2.2 เปรียบเทียบขนาดรูและความพรุนของเยื่อฐาน

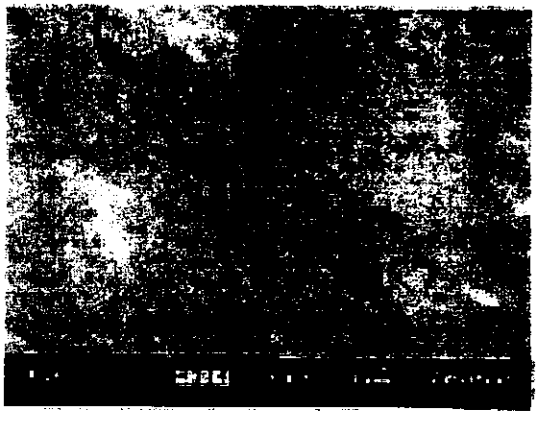
เคลือบเยื่อฐานด้วยไคโตแซนแบบอัดความดัน (ΔP = 100 kPa) นาน 5 นาที



(a)
Skin layer of cellulose membrane before coating.



(b)
Skin layer of cellulose membrane, coated with chitosan.



(c)
Sub layer of cellulose membrane after being coated with chitosan solution, using in a dead end unit.

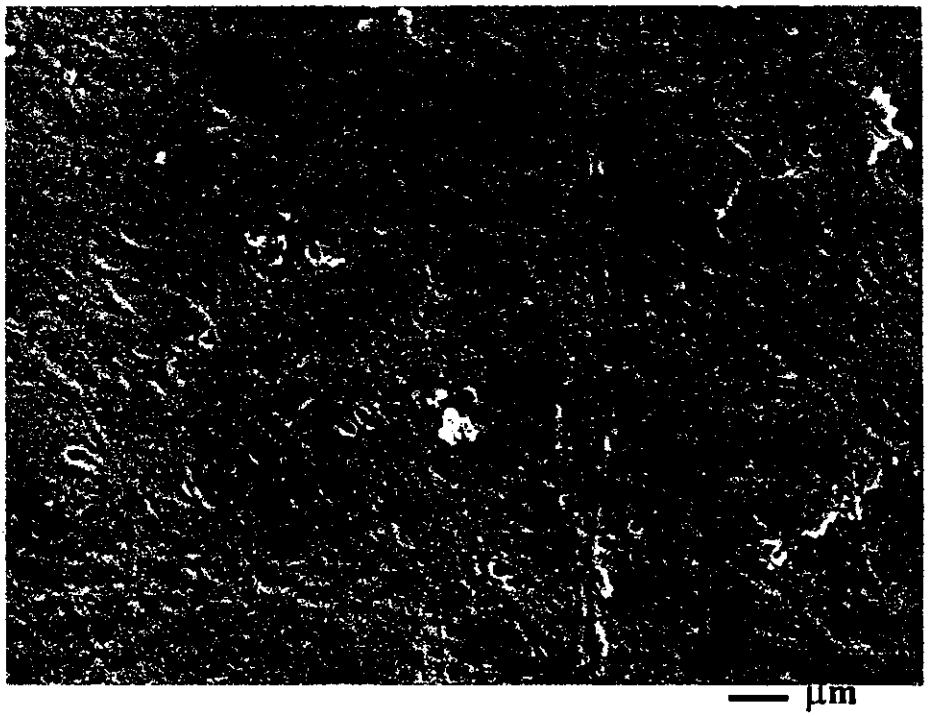
Figure 8 Comparing skin and sub layer of cellulose membrane after being coated with chitosan solution.

หมายเหตุ ใช้ไคโตแซน 1 ml ต่อพื้นที่ผิวของเยื่อฐาน 1.4×10^{-3} m^2 หรือ 0.71 ลิตร/ตร.เมตร

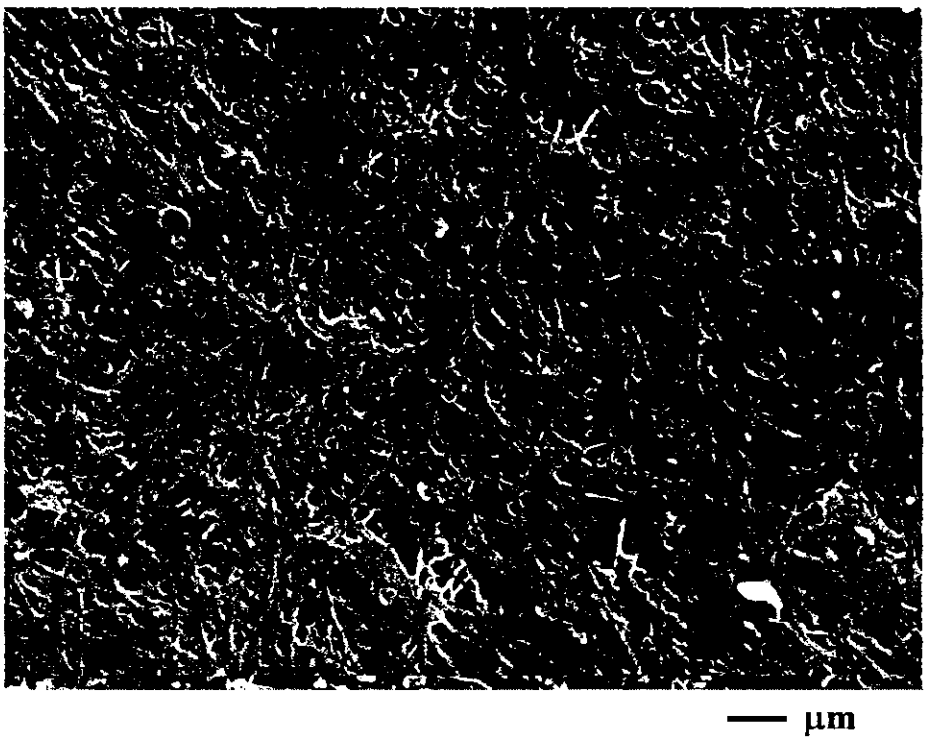
อย่างไรก็ดี เมื่อเคลือบไคโตแซน 1% บนเยื่อฐาน C25 โดยวิธีเดียวกัน พบว่ามีการออกันของไคโตแซนที่ผิวบนมาก ทำให้ความพรุนของเยื่อประกอบลดลง (Figure 9a) จึงพยายามคงความพรุนของเยื่อประกอบโดยการลดความเข้มข้นของไคโตแซนลงเหลือ 0.5% แทน ได้ผลดัง Figure 9b ส่วนภาพใน Figure 9c แสดงการเคลือบผิวโดยใช้ไคโตแซน 0.5% ที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ 5% แล้วเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของผิวบนแต่ยังใช้เวลาในการอัดความดันไม่นานพอ จะได้เยื่อประกอบที่มีผิวด้านบนเป็นเยื่อชนิดเนื้อแน่นทำหน้าที่เป็น Selective layer (ซึ่งลักษณะของเยื่อผิวที่เป็นชนิดเนื้อแน่นนี้เหมือนกันกับผิวที่เคลือบด้วยไคโตแซนอย่างเดียวดังภาพในภาคผนวก 3) งานวิจัยนี้จึงเลือกเยื่อฐานที่มีความพรุนสูงกว่าคือเยื่อชนิด C12 เพื่อทำเป็นเยื่อประกอบโดยใช้วิธีอัดด้วยความดัน ภาพถ่าย SEM ใน Figure 10 a และ 10b แสดงความพรุนของเยื่อประกอบที่ได้

สำหรับเยื่อที่เคลือบไคโตแซนโดยวิธีจุ่ม วิธีรีด และวิธีอาศัยแรงโน้มถ่วง จะได้ผิวบนเป็นชนิดเนื้อแน่น ลักษณะเดียวกับ ภาพถ่าย SEM ใน Figure 9c เยื่อประกอบที่ผลิตโดยวิธีดังกล่าว น่าจะอาศัยเฉพาะคุณสมบัติของไคโตแซนเป็นหลัก ทั้งนี้เพอมิเอทที่ได้จากการกรองจะขึ้นกับความหนาของไคโตแซนด้วย การศึกษาวิจัยนี้จึงไม่ได้นำเยื่อประกอบชนิดนี้ไปศึกษาต่อ เนื่องจากการแยกด้วยวิธีกรองภายใต้ความดันจำเป็นต้องใช้เมมเบรนที่มีความพรุนสูง ผลการศึกษาเกี่ยวกับเยื่อประกอบต่อจากหัวข้อนี้เป็นต้นไป จึงใช้วิธีเคลือบด้วยการอัดความดันเพียงอย่างเดียว

(a) C25CH10X (5 min)



(b) C25CH05X (5 min)



(c) C25CH05X (3 min)

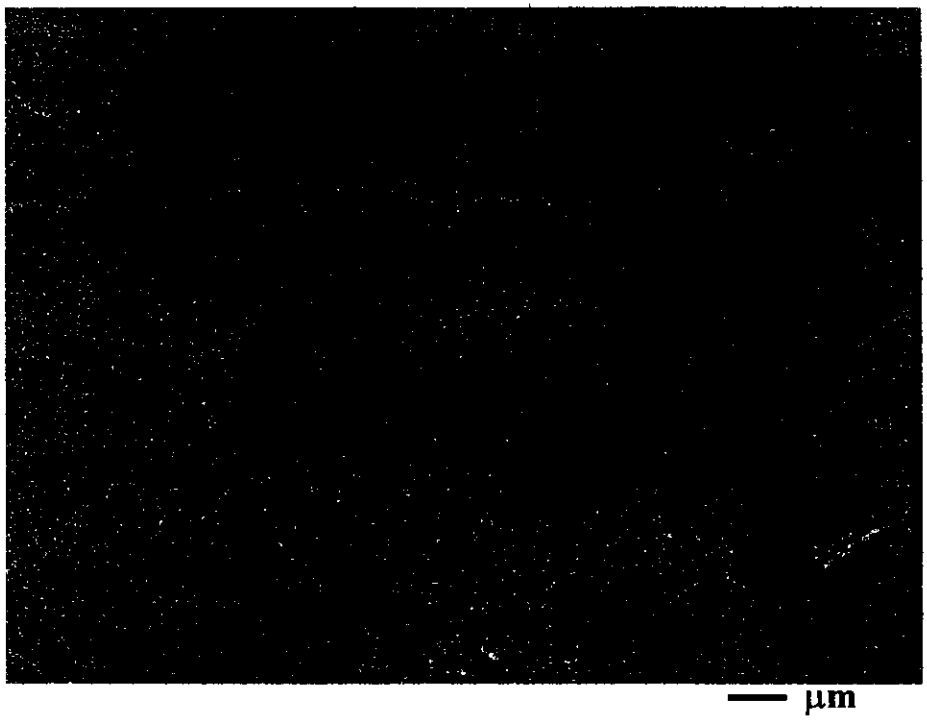
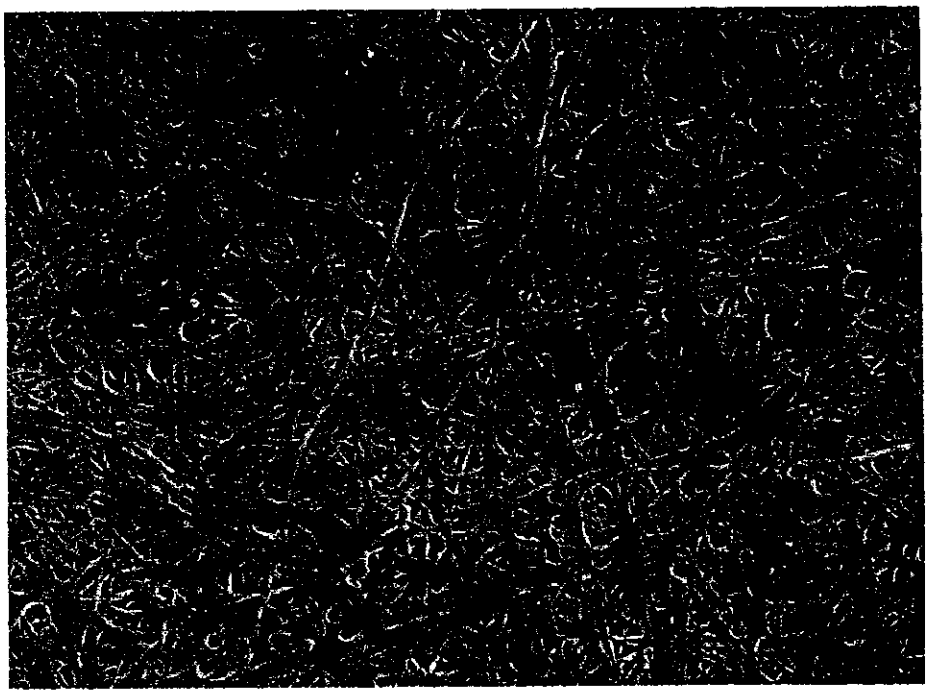


Figure 9
Comparing C25 membranes coated with chitosan solution of 5% glutaraldehyde cross-linking

(a) using 1.0% chitosan
(b) using 0.5% chitosan
(c) dense skin layer of C25 membrane after 3 min coating. Noted that some chitosan solution was remained on the skin layer.

(a) Un-coated layer



(b) Coated with 0.5% chitosan

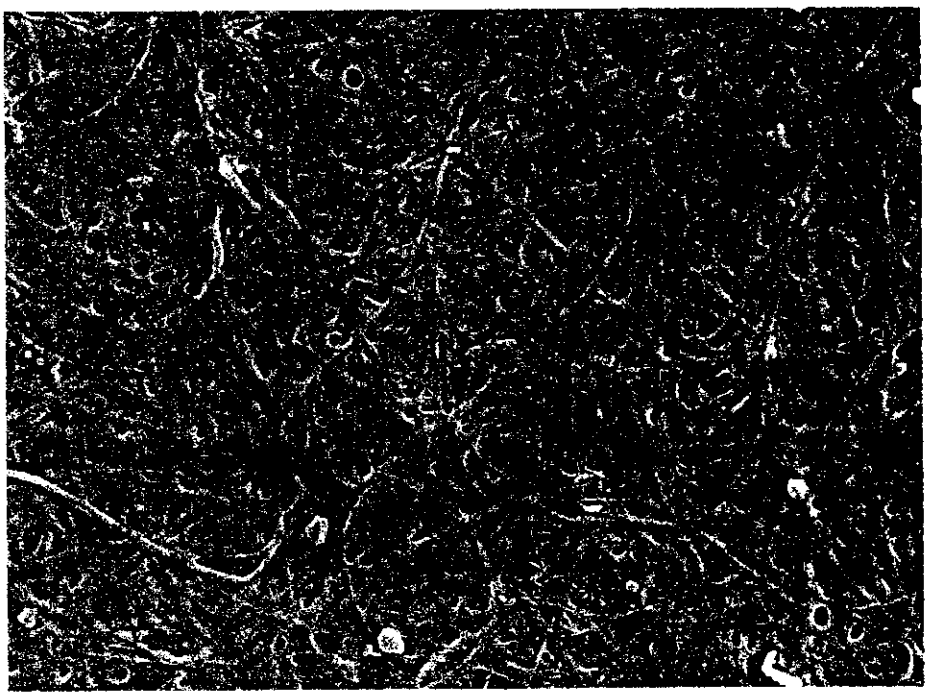


Figure 10 Comapring C12 membrane before and after being coated with 0.5% chitosan, which was cross-linked with 0.5% glutaraldehyde.

3.3 การศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าโดยวิธีอิมพีแดนซ์สเปคโตรสโคปี

3.3.1 ผลของการเชื่อมขวางต่ออิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อไคโตแซน

เนื่องจากการเชื่อมขวางจะช่วยให้โซ่พอลิเมอร์ถูกจับยึดให้แน่นขึ้น ความหนาแน่นของเยื่อที่เชื่อมขวางจึงน่าจะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อที่ผลิตได้ งานนี้จึงต้องการเปรียบเทียบผลระหว่างเยื่อไคโตแซนที่มีและไม่มีการเชื่อมขวางด้วยกลูตาราลดีไฮด์ 4% และแปรผันค่า pH 3 ระดับ เพื่อเปรียบเทียบผล Figure 11 a และ b แสดงให้เห็นว่าค่า Z ของเยื่อในทุกกรณีมีการ Dispersion เมื่อเปลี่ยนความถี่สูงขึ้นถึงระดับ 1 kHz เป็นต้นไป ซึ่งเป็นไปตามหลัก Maxwell Dispersion ของวัสดุ การศึกษานี้ทำให้ทราบว่าการเชื่อมขวางด้วยกลูตาราลดีไฮด์ ทำให้เยื่อเมมเบรนมีค่า Z สูงขึ้น อย่างชัดเจน และค่า Z ขึ้นกับระดับ pH ของสารละลายด้วย สารละลายเกลือ KCl ในที่นี้ทำหน้าที่เป็นตัวกลางของสนามไฟฟ้า เพื่อให้ผิวสัมผัสทั้งสองด้านของเยื่อทดสอบมีความสมมาตร กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ หากประจุบวกที่ตรึงในเยื่อไคโตแซนกระจายอย่างสม่ำเสมอ การที่ผิวทั้งสองด้านสัมผัสสารละลายเดียวกันจึงน่าจะมีค่าความจุไฟฟ้าตรงผิวทั้งสองด้านเท่ากัน เป็นที่น่าสังเกตุว่า ระดับ pH ที่เป็นกลาง (=5.5) ให้ค่า Z ของเยื่อทั้งสองมีค่าสูง -ขณะที่ค่า Z ในสารละลายเดียวกันที่มีสภาพกรด (pH 3.5) และด่าง (pH 10) มีค่าน้อยลง

3.3.2 ผลของการเคลือบไคโตแซนต่อค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ของเยื่อฐานเซลลูโลส

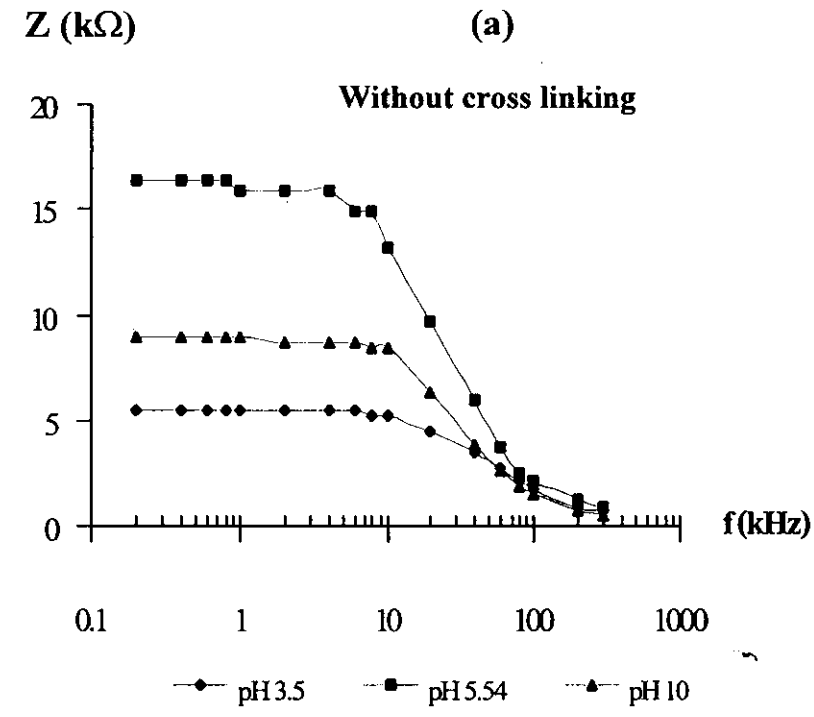
การเคลือบไคโตแซนบนเยื่อฐานในหัวข้อนี้ ใช้สารละลายไคโตแซน 1% ที่ไม่มีการเชื่อมขวาง และเคลือบด้วยวิธีอัดด้วยความดัน 100 kPa ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ความนำยังผล (G_{eff}) และความจุยังผล (C_{eff}) ที่คำนวณได้แสดงไว้ใน Figure 12a, b และ c เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเยื่อแต่ละชนิดพบว่า C25 มีค่า Z สูงกว่าเยื่อ C12 ประมาณ 3 เท่า ทั้งๆที่จากการศึกษาด้วยภาพ SEM พบว่าขนาดรูบนผิว Skin layer และความพรุนของเยื่อทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าภาพ SEM ให้ข้อมูลเฉพาะผิว ซึ่งหากเยื่อไม่ได้เป็นท่อทรงกระบอกจะได้ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดรูและความพรุนไม่ชัดเจน เป็นที่น่าสังเกตว่าฟลักซ์น้ำดีของเยื่อ C25 มีค่าประมาณ 1/3 เท่าของเยื่อ C12 (Figure 7) จึงเป็นไปได้ว่าเยื่อ C25 ซึ่งใช้จุลินทรีย์หนาแน่นกว่าเป็น 2 เท่า น่าจะมีเซลลูโลสมากกว่าจึงขวางทางเดินของน้ำ **แสดงว่าเยื่อชนิดใดๆที่มีทางเดินน้ำภายในเยื่อคดเคี้ยว การใช้ภาพถ่าย SEM เพื่อศึกษาขนาดรูเพียงอย่างเดียวย่อมไม่เพียงพอ เพราะจะทำให้การสรุปผลผิดพลาดได้**

เมื่อเปรียบเทียบเยื่อประกอบที่เคลือบไคโตแซน Figure 12a แสดงให้เห็นว่าค่า Z ของเยื่อทั้งสองไม่แตกต่างกัน แต่มีค่าสูงกว่าเยื่อที่ไม่เคลือบไคโตแซน แสดงว่าไคโตแซนที่เคลือบไปขวางทางเดินน้ำให้มีรูเล็กลง ในขั้นตอนนี้ไม่สามารถอธิบายได้ว่าเหตุใดค่า Z ของเยื่อ C12CH10 และ C25CH10 จึงเท่ากัน อย่างไรก็ดีการที่ไคโตแซนมีประจุตรึงและอาจจะอออยู่ที่ผิวบนของ C25 ได้มากกว่าจึงมีส่วนทำให้เกิดผลดังกล่าว ส่วน Figure 12b แสดงค่าความนำไฟฟ้า (G_{eff}) ของเยื่อทั้งสองทั้งก่อนและหลังเคลือบ จะเห็นว่าขณะที่ Z ลดลง ค่า G_{eff} จะเพิ่ม และหากเยื่อที่มี Z สูงกว่าย่อมมีค่า G_{eff} ที่ต่ำกว่าด้วย ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามที่คาด พึงสังเกตุว่าเยื่อ C12 ซึ่งให้ฟลักซ์น้ำดีสูงกว่าย่อมมีค่า

G_{eff} สูงกว่าด้วย แสดงว่าสามารถโยงค่า G_{eff} กับรูพรุนบนเยื่อได้ กล่าวคือเยื่อที่มีความพรุนสูงกว่าย่อมให้น้ำผ่านดีกว่าและไฟฟ้าย่อมผ่านได้ดีด้วยเนื่องจากเยื่อจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สำหรับค่าความจุ C_{eff} ของเยื่อ Figure 12c แสดงให้เห็นว่า C_{eff} ของ C25CH10 มีค่าสูงสุด การเคลือบไคโตแซนซึ่งมีประจุตรึงบวกจะทำให้ประจุต่าง (Counter ion) มาออกันที่ผิวทั้งสองด้านของเยื่อเกิดเป็นตัวเก็บประจุยังผลขึ้น ดังนั้น C_{eff} ของเยื่อชนิดนี้จึงควรมีค่าสูงกว่า C_{eff} ของเยื่อ C12CH10 หากไคโตแซนออกันที่ผิวหน้า C25CH10 ได้มากกว่าตามเหตุผลข้างต้น ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเยื่อที่แน่นกว่าซึ่งเคลือบ (C25CH10) กับเยื่อที่ไม่เคลือบไคโตแซน (C25) จะเห็นว่าที่ความถี่น้อยกว่า 10 kHz ค่า C_{eff} ของ C25CH10 มีค่าสูงกว่าอย่างชัดเจน แสดงว่ามีการออของ Co-ions ที่ผิวของเยื่อประกอบได้มากกว่าเยื่อที่ไม่เคลือบไคโตแซน Co-ions ดังกล่าวเกิดจากคู่ประจุในสารละลาย KCl 0.1 mM ซึ่งในที่นี้คือกลุ่มประจุของ Cl ไอออนนั่นเอง (การออของประจุเป็นไปตาม Gouy and Chapman model โดยมีสาเหตุจากประจุตรึงของไคโตแซน) แสดงว่าสภาพความเป็นบวกของไคโตแซนเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดการเพิ่ม C_{eff} ของเยื่อโดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำๆ และเมื่อเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้น Dispersion ของวัสดุทำให้ค่า C_{eff} ลดลง

3.4 ภาพถ่าย SEM ของเยื่อประกอบ

สำหรับงานในขั้นตอนนี้ จะแสดงเฉพาะภาพถ่าย SEM ของเยื่อที่เคลือบไคโตแซนโดยวิธีอัดความดัน เพราะให้ผลการเคลือบดีที่สุด จากข้อมูลใน Figure 8 ทำให้ทราบว่าสารละลายไคโตแซนเข้มข้น 0.5% จะเหมาะสมสำหรับการเคลือบให้เยื่อที่มีรูพรุนเล็กกว่าเยื่อฐานแต่ยังคงความพรุนเดิมไว้ได้มากกว่าความเข้มข้นอื่นที่สูงกว่า งานในหัวข้อนี้จึงใช้สารละลายไคโตแซน 0.5% ดังนั้นภาพใน Figure 13 แสดงตัวอย่างของการวิเคราะห์ความพรุนของเยื่อประกอบ จากภาพถ่ายใน Figure 13a แสดงให้เห็นว่าจุดดำบนผิวของเยื่อคือ รูบนเยื่อบาง แสดงว่าสารละลายสามารถแทรกผ่านเยื่อฐานได้ค่อนข้างดี จากข้อมูลที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Carnoy พบว่าขนาดรูอยู่ในช่วงระหว่าง 0.21-0.02 μm (Maximum-Minimum) และมีค่าเฉลี่ย (Mean±Standard Deviation) 0.06±0.02 μm ส่วน Figure 13b แสดงการกระจายของรูเหล่านั้นตามขนาดในหน่วยไมครอน ซึ่งมีอยู่ทั้งสิ้น 347 รู จะเห็นว่าเมื่อเทียบกับพื้นที่ของเยื่อทั้งแผ่น ($1.4x10^{-3}$ m^2) มีรูขนาดระหว่าง 0.02-0.10 μm กระจายอยู่บนผิวคิดเป็น 96.0% โดยมีรูขนาดใหญ่กว่า 0.10 μm เพียง 3.7% เมื่อคิดเป็นพื้นที่รูเทียบกับพื้นที่ของเยื่อแผ่น พบว่าเยื่อที่ได้มีความพรุน 0.94% [คำนวณจาก $(A_p/A_m)x100$] จะเห็นว่าความพรุนนี้คิดเป็น 50% ของเยื่อฐานชนิด C12 ซึ่งมีความพรุน 1.86% (ดูข้อมูลจาก Table 1) ความพรุนที่น้อยกว่า 1% เกิดจากไคโตแซนไปอุดรูขนาดเล็กของเยื่อฐานและทำให้รูขนาดใหญ่มีขนาดเล็กลงด้วย กล่าวคือรูขนาดใหญ่กว่า 0.20 μm จะถูกเคลือบด้วยไคโตแซนทำให้มีขนาดเล็กลงและรูขนาดเล็กกว่า 0.02 μm น่าจะถูกปิด จึงมีจำนวนรูลดลงด้วย (ดูภาพในภาคผนวก) ซึ่งช่วยให้การกระจายของขนาดรูไม่กว้างมาก เป็นประโยชน์ต่อการนำเยื่อไปใช้ในงานกรองเพราะช่วยเพิ่มความเจาะจงของขนาดอนุภาคที่ต้องการกรองได้ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกรองได้อีกทางหนึ่ง



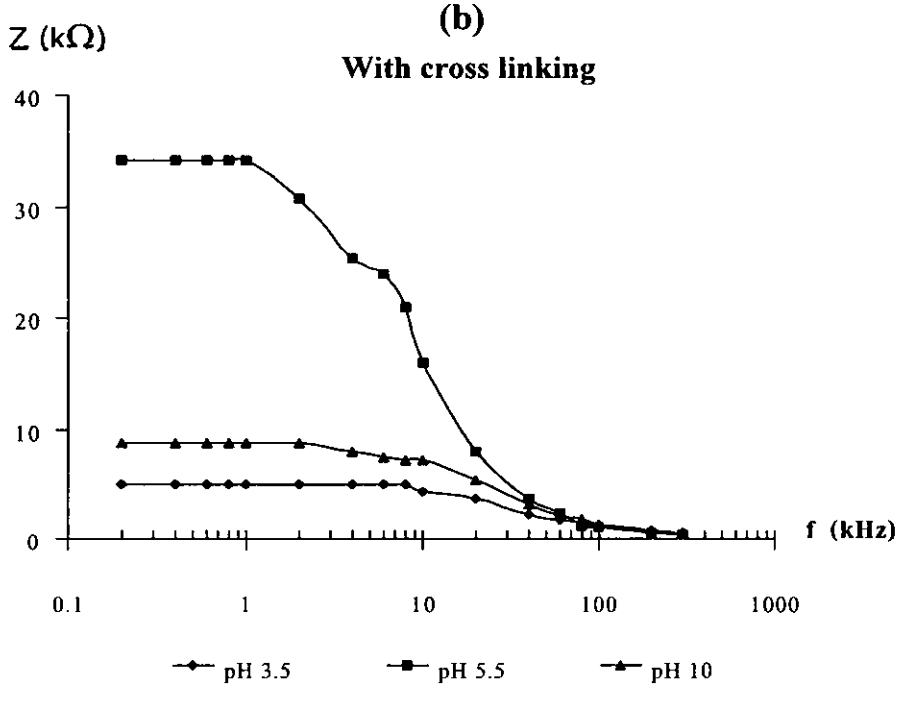


Figure 11

Effect of solution pH on the impedance of chitosan membranes. The membrane was immersed in 0.1 mM KCl solution.

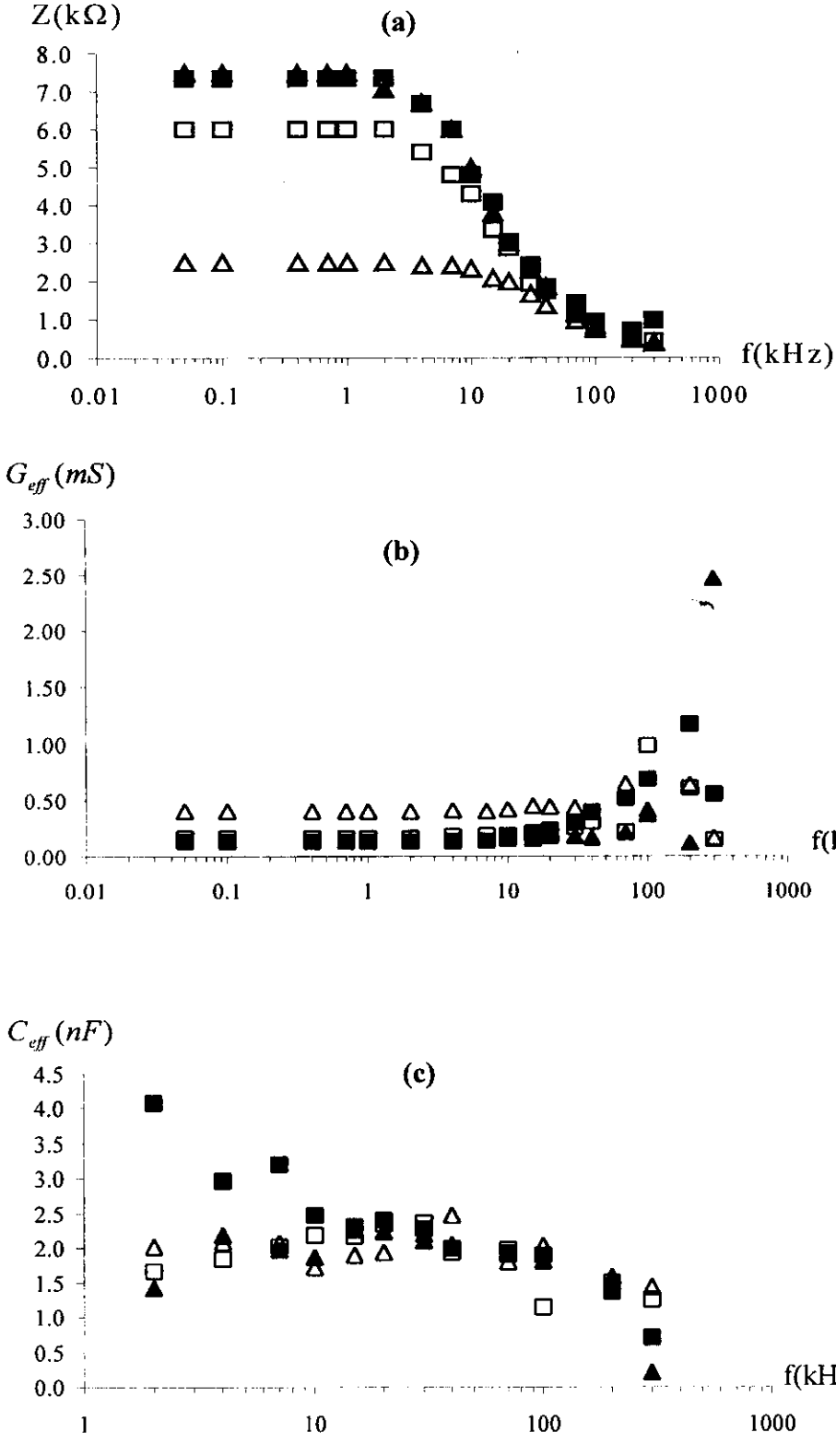
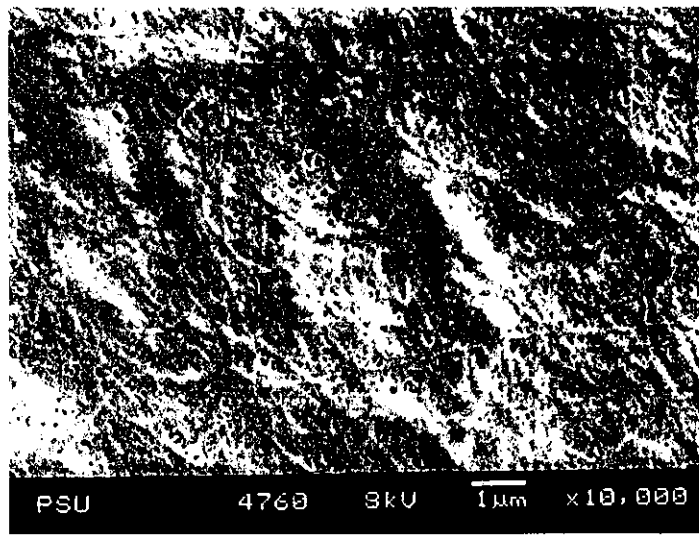


Figure 12 Comparing Z, G_{eff} and C_{eff} values of coated (dark) and un-coated (white) membrane. Noted that (Δ, ▲) is for C12 and C12CH10, and (□, ■) is for C25 and C25CH10 membrane.

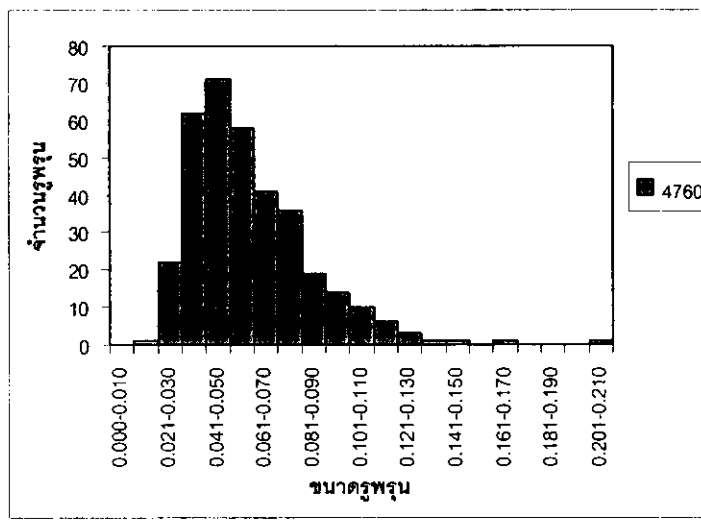
4760 Number of pore: 347

pore density (track/cm2)	porosity(%)
2.83E+08	0.941416

area	perimeter	dimeter
Minimum: 0.0001	Minimum: 0.09	Minimum: 0.02
Mean: 0.0033251	Mean: 0.2374063	Mean: 0.0631988
Max: 0.0195	Max: 0.59	Max: 0.21
Standard deviation:	Standard deviation:	Standard deviation:
0.0024276	0.0900749	0.0251095



(a)



(b)

Figure 13 Information of pore size and distribution using computer Carnoy program with a SEM micrograph.

Figure 14a,b,c แสดงภาพตัดขวางของเยื่อไคโตแซน 1% เยื่อเซลลูโลส และเยื่อประกอบ C12CH10 จะเห็นว่าไคโตแซนเป็นเยื่อเนื้อแน่นขณะที่เซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นใยที่มีความพรุนกว่ามาก รูป c แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำไคโตแซนไปเคลือบบนผิวของเยื่อเซลลูโลสจะทำให้ผิวด้านบนซึ่งบางน้อยกว่า 1 μm กลายเป็น Selective layer ความขรุขระของผิวบนเป็นไปตามร่องรอยของรูบนเยื่อฐาน ผิวบนนี้จะคัดเลือกอนุภาคที่จะผ่านไปยังเยื่อฐานภายใต้การกรอง ซึ่งหากเคลือบไคโตแซนด้วยวิธีอื่น ผิวบนจะเรียบในทำนองเดียวกับผิวบนของเยื่อใน Figure 14a

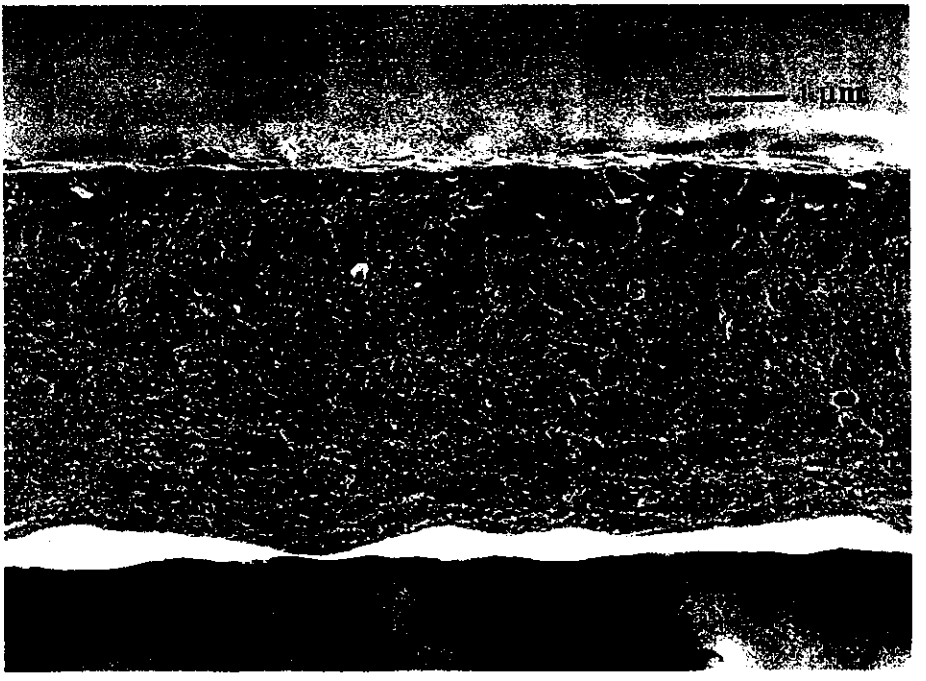
อย่างไรก็ดี เยื่อระดับอัลตร้าจะมีขนาดรูระหว่าง 10-10,000 อังสตรอม (10^{-3}-1ไมครอน) หากประสงค์จะใช้แยกสารที่มีขนาดเล็ก ควรเลือกวิธีเคลือบแบบรีดเนื่องจากสามารถควบคุมความหนาได้ดีกว่าการเคลือบด้วยวิธีจุ่ม

3.5 ผลการกรองเซลล์และ BSA

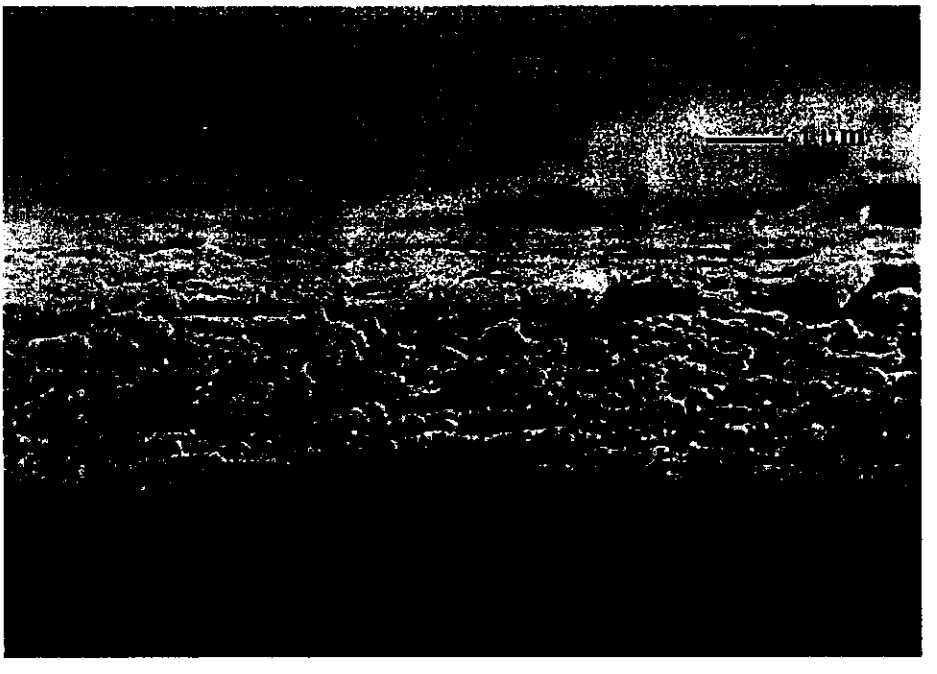
จากผลการกรองเซลล์ในการศึกษาตอนแรก พบว่าเยื่อฐานสามารถกักกันเซลล์ได้เกือบ 100 % จึงไม่ได้ทดลองกรองเซลล์ ส่วนสารละลาย BSA มักใช้เป็นสารป้อนสำหรับการทดสอบเยื่อกรองเพื่อหาขนาด MWCO (Molecular weight cut off) ของเยื่อ อย่างไรก็ดีมีผู้รายงานว่า BSA มีประจุลบหากพีเอชเป็นด่าง ดังนั้นงานนี้จึงไม่ได้ทำการกรอง BSA ด้วยเยื่อประกอบ เพราะจะเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตระหว่าง BSA กับไคโตแซนซึ่งเคลือบบนเยื่อเซลลูโลส ซึ่งมีผลการทดสอบด้วยเยื่อประกอบ PES/Chitosan (วิทยานิพนธ์ ปี 2546 นายวราวุฒิ พุทธให้) แล้วว่า BSA ถูกกักกันได้ 100% นอกจากนี้การกรอง BSA ด้วยเยื่อฐานเซลลูโลสชนิด C25 ในการศึกษาขั้นตอนแรก ก็พบว่าสามารถกรอง BSA ได้เกือบ 100% เช่นกัน

3.6 ความทนต่อแรงดันของเยื่อประกอบ

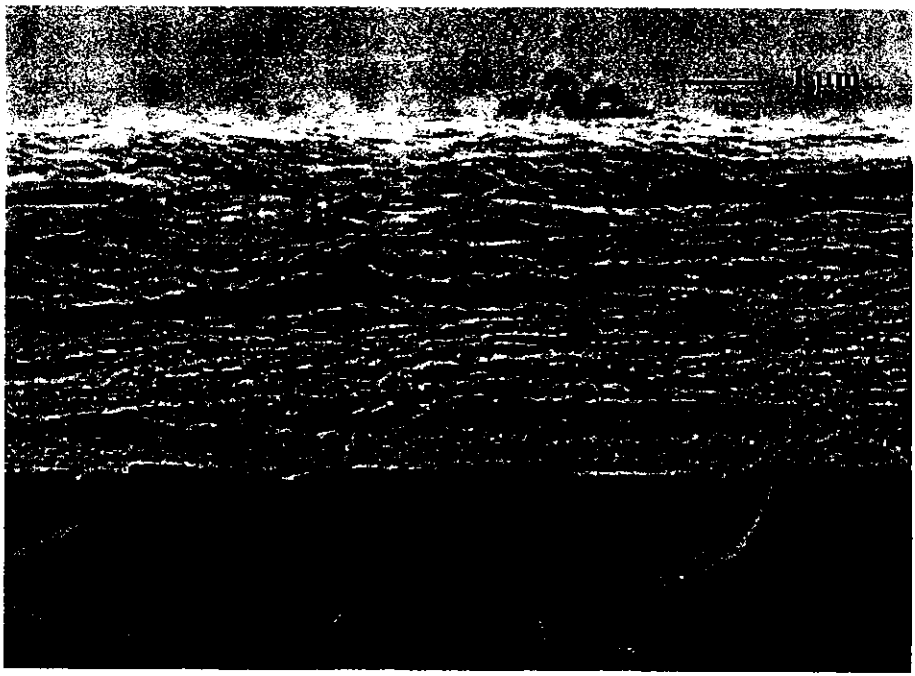
เนื่องจากการเตรียมเยื่อประกอบทำในอุปกรณ์แบบปิดตายที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4.7 ซม. ทำให้ได้ชิ้นงานที่เล็กเกินไป ไม่สามารถนำไปจับยึดกับเครื่องที่ใช้ศึกษาความทนแรงดึงของชิ้นงานวัสดุได้ อย่างไรก็ดี จากการศึกษานี้พบว่าเยื่อประกอบทนแรงอัดได้ถึง 0.2 MPa (Figure 7)



(a) Chitosan membrane (x800 times)



(b) Cellulose membrane (x10,000 times)



(c) Chitosan on cellulose membrane (x10,000 times)

Figure 14

Cross section of chitosan (a), cellulose (b) and coated cellulose membrane (c) with 1% chitosan solution under 100 kPa in a dead end unit.