

การบำบัดน้ำเค็มด้วยเมมเบรนไคโตซานในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

Water Desalination by Chitosan Membrane in Forward Osmosis Process

ประกอบเกียรติ วรรณชา (Prakobkiat Wannacha)* ดร.ขันทอง สุนทรภา (Dr.Khantong Soontarapa)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจการบำบัดน้ำเค็มด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตน้ำจืด โดยใช้เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่น 2 ชนิด คือเมมเบรนที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกและไม่ผ่านการเชื่อมขวาง ในการเพิ่มความชอบน้ำให้กับเมมเบรน งานวิจัยนี้ใช้วิธีการปรับปรุงผิวหน้าของเมมเบรนด้วยสารละลายของพอลิไอโซบิวทิลีนอัลเทอเนติงมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PIAM) ในแอซิโตนความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร พบว่าการแช่เมมเบรนในสารละลายดังกล่าวเป็นเวลา 1 ชม. เพียงพอให้ปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนบนพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานกับหมู่แอนไฮไดรด์ของ PIAM เกิดขึ้นสมบูรณ์ ผลการทดสอบค่ามุมสัมผัส พบว่าค่ามุมสัมผัสของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวางลดลงประมาณร้อยละ 20 และ 50 ตามลำดับ ได้ใช้เมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางทั้งที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุงและที่ได้ปรับปรุงแล้วในการบำบัดน้ำเค็มด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส พบว่าการปรับปรุงความชอบน้ำของเมมเบรนส่งผลต่อสมรรถนะของเมมเบรนเพียงเล็กน้อย โดยค่าฟลักซ์น้ำของเมมเบรนก่อนและหลังการปรับปรุง ความชอบน้ำมีค่าเท่ากับ 1.28 ± 0.0 และ 1.32 ± 0.0 ลิตร/เมตร² ชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการกักกันเกลือมีค่าสูง เท่ากับร้อยละ 96.2 ± 0.0 และ 95.5 ± 0.1 ตามลำดับ

ABSTRACT

It is interested in this research in water desalination by forward osmosis as an alternative process for producing fresh water. Sulfuric acid crosslinked and uncrosslinked dense chitosan membranes were used in this study. Membrane surface treatment was selected in this research to enhance the membrane hydrophilicity. The method was done by immersing the membranes in Poly (isobutylene-alt-maleic anhydride)/Acetone solution of 1% w/v. The result showed that the immersion for 1 hr. was enough for the complete reaction of amine and anhydride. The contact angles of crosslinked and uncrosslinked membranes were reduced by 20 and 50%, respectively. The uncrosslinked and modified uncrosslinked membranes were tested for water desalination in forward osmosis process. It was found that the surface modification for hydrophilicity enhancement of membranes slightly affected the desalination performance. The water flux obtained from uncrosslinked and modified uncrosslinked membranes were 1.28 ± 0.0 L/m² h and 1.32 ± 0.0 L/m² h, respectively. Their salt rejections were $96.2 \pm 0.0\%$ and $95.5 \pm 0.1\%$, respectively.

คำสำคัญ: การบำบัดน้ำเค็ม ฟอร์เวิร์ดออสโมซิส เมมเบรนไคโตซาน

Keywords: Water desalination, Forward osmosis, Chitosan membrane

* นิสิต หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

** รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทนำ

กระบวนการบำบัดน้ำเค็มเป็นกระบวนการที่สำคัญมากในปัจจุบันเนื่องจากปัญหาการขาดแคลนน้ำจืด โดยมากกว่า 1 ใน 3 ของประชากรโลกอาศัยในพื้นที่ขาดแคลนน้ำ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 2 ใน 3 ในปี ค.ศ.2025 (Elimelech, Phillip, 2011) ที่ผ่านมามีวิธีการแก้ปัญหาด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis, RO) โดยใช้แรงดันสูงแก่น้ำให้ซึมผ่านเมมเบรน (Membrane) เป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานมาก (Service, 2006) เนื่องจากมีประสิทธิภาพดีกว่า และใช้พลังงานน้อยกว่าการบำบัดน้ำเค็มด้วยความร้อน (Thermal desalination) แต่ข้อเสียของการผลิตน้ำจืดด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสคือมีต้นทุนสูง ซึ่งสร้างภาระที่หนักเกินไปกับประเทศที่มีรายได้น้อย จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส (Forward osmosis) เป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ ด้วยความที่ไม่ต้องใช้พลังงานในการให้แรงดันสูง แต่อาศัยความแตกต่างของความดันออสโมติกของสารละลายฟีด (Feed) และสารละลายที่อยู่อีกฝั่งของเมมเบรนคือสารละลายดิง (Draw solution, DS) ทำให้ใช้พลังงานต่ำ ลดการอุดตันเนื่องจากแรงดันของเมมเบรน (Fouling) และได้อัตราการผลิตสูง (Nguyen et al., 2015) อย่างไรก็ตามหากต้องการผลิตน้ำจืดที่เป็นน้ำบริสุทธิ์ก็ยังคงอาศัยกระบวนการแยกอื่น ๆ เช่น รีเวิร์สออสโมซิส ร่วมด้วย เพราะว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสประกอบด้วยน้ำสะอาดผสมอยู่กับสารละลายดิง แต่หากเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานระหว่างการบำบัดน้ำเค็มด้วยกระบวนการรีเวิร์สออสโมซิสเพียงอย่างเดียว กับกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสร่วมกับรีเวิร์สออสโมซิสพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน (Shaffer et al., 2015)

จากความจริงดังกล่าวมานำมาสู่การประยุกต์ใช้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสในรูปแบบอื่นที่ไม่ต้องการผลิตภัณฑ์ในรูปแบบบริสุทธิ์ เพราะผลิตภัณฑ์จากฟอร์เวิร์ดออสโมซิสคือน้ำบริสุทธิ์ที่รวมกับสารละลายดิง แต่ถ้าหากสารละลายดิงนั้นสามารถบริโภคได้โดยไม่เป็นอันตราย การใช้กระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสผลิตน้ำจืดจะเป็นกระบวนการทางเลือกที่ใช้พลังงานต่ำที่น่าสนใจในอนาคต ซึ่งแนวคิดนี้ได้รับความสนใจจากองค์การนาซ่า (NASA) โดยได้พัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่มีชื่อว่า Forward osmosis bag หรือ FOB ซึ่งมีต้นแบบมาจาก X-Pact™ ของบริษัท HTI หรือ Hydration technology innovation ที่มีหลักการใช้เมมเบรนเป็นตัวแบ่งช่องภายในถุงดังกล่าวออกเป็น 2 ส่วน สำหรับเติมสารละลายฟีดและสำหรับบรรจุสารละลายดิงซึ่งใช้สารละลายน้ำตาล เมื่อใช้งานแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำสะอาดรวมอยู่กับน้ำตาล (Flynn et al., 2012) อย่างไรก็ตามการใช้ซูโครสเป็นสารละลายดิงยังคงให้ค่าฟลักซ์น้ำ (Water flux) ต่ำ จึงควรมีการปรับปรุงเมมเบรนให้มีความชอบน้ำ (Hydrophilicity) มากขึ้น ซึ่งค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างหยดน้ำกับเมมเบรนเป็นลักษณะสมบัติหนึ่งที่ใช้เพื่อบ่งบอกความชอบน้ำของเมมเบรน โดยเมมเบรนที่ให้ค่ามุมสัมผัสต่ำลงแสดงถึงความชอบน้ำมากขึ้น ซึ่งทำให้ได้ค่าฟลักซ์น้ำเพิ่มขึ้นด้วย (Chapman et al., 2008; Rana, Matsuura, 2010)

เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน ลดการพึ่งพาการนำเข้าวัสดุจากต่างประเทศ งานวิจัยนี้จึงสนใจใช้เมมเบรนไคโตซาน ซึ่งสามารถผลิตได้ในประเทศในการศึกษาการบำบัดน้ำเค็มด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส การเพิ่มความชอบน้ำของ เมมเบรนไคโตซานทำได้หลายวิธี โดยวิธีการหนึ่งคือการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (Carboxylic group) ที่ผิวหน้าของเมมเบรนด้วยการทำปฏิกิริยากับแอซิดแอนไฮไดรด์ (Acid anhydride) ในสารละลาย (Tangpasuthadol et al., 2003; Zhang et al., 2007) อย่างไรก็ตามแอซิดแอนไฮไดรด์ส่วนใหญ่มีระดับความเป็นพิษต่อร่างกายค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึง สนใจใช้แอซิดแอนไฮไดรด์ชนิดพอลิไอโซบิวทิลีนอัลเทอนดิงมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Poly(isobutylene-alt-maleic anhydride, PIAM) ที่มีระดับความเป็นพิษต่อสุขภาพในระดับต่ำสุดตามมาตรฐาน NFPA หรือ National fire protection association (Sigma-Aldrich Corporation, 2004) มาทำปฏิกิริยากับเมมเบรนไคโตซาน โดยมีสมมติฐานว่า

เมมเบรนที่ ปรับปรุงแล้วจะให้ค่าฟลักซ์น้ำมากกว่าเมมเบรนเดิม เมื่อใช้ซูโครสเป็นสารละลายตั้งในการบำบัดน้ำเค็ม ด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษาการปรับปรุงความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซาน และการบำบัดน้ำเค็มด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

วิธีการวิจัย

วัสดุเมมเบรนและการปรับปรุงพื้นผิวเมมเบรน

งานวิจัยนี้ใช้เมมเบรนไคโตซานแบบเนื้อแน่น (Dense membrane) 2 ชนิด คือชนิดที่ไม่ได้ผ่านการเชื่อมขวาง และชนิดที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด

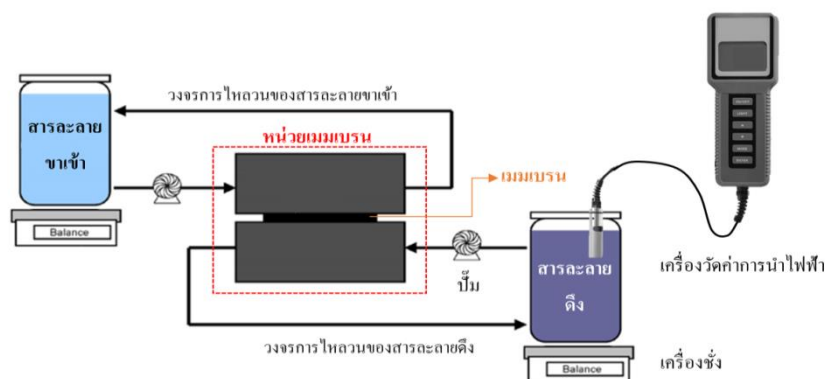
การปรับปรุงพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานทั้ง 2 ชนิด ทำได้โดยการแช่ในสารละลาย PIAM/Acetone ความเข้มข้น 1% w/v ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-5 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยสารละลาย Acetone 25% และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (Zhang et al., 2007)

การศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรน

ศึกษาความชอบน้ำของเมมเบรนจากการทดสอบวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างเมมเบรนกับหยดน้ำด้วยเครื่อง Rame-hart รุ่น 200F1 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรนด้วยเครื่อง FTIR -Thermo รุ่น Nicolet 6700 และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเมมเบรนด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-7610F

การศึกษากำบัติน้ำเค็มในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

ชุดการศึกษามีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 ที่หน่วยเมมเบรน (Membrane unit) มีห้อง (Chamber) สำหรับสารละลายขาเข้าและสำหรับสารละลายตั้งปะกอบอยู่คนละด้านของเมมเบรนซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายเท่ากับ 50 ตร.ซม. ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.05 โมลาร์ เป็นสารละลายขาเข้า และใช้สารละลายซูโครส 1.0 โมลาร์ เป็นสารละลายตั้ง ใช้ปั๊มกระแสน้ำแรงดันต่ำ อัตราการไหลสูงสุด 240 ลิตร/ชั่วโมง เป็นอุปกรณ์ช่วยให้เกิดการไหลวนของสารละลายทั้งสองชนิดผ่านผิวหน้าของเมมเบรนตลอดเวลา ทำการทดลองเป็นระยะเวลานานรวม 6 ชั่วโมง โดยเก็บค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากเครื่องชั่งทุก ๆ 1 ชั่วโมง เพื่อนำไปคำนวณค่าฟลักซ์น้ำ พร้อมกับวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารละลายทั้งสองชนิดด้วยเครื่อง Handheld Conductivity รุ่น YSI 30 เพื่อนำไปคำนวณค่าร้อยละการกักกันเกลือ



รูปที่ 1 ไดอะแกรมชุดทดสอบด้วยกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

ค่าฟลักซ์น้ำและค่าร้อยละการกักกันเกลือสามารถคำนวณตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ (ขั้นตอน, 2547)

$$J_w = Q/AT \quad \text{----- (1)}$$

โดยที่ J_w = ฟลักซ์ของน้ำ (ลิตร/ม² ชม.)

Q = ปริมาณของน้ำที่ผ่านเมมเบรน (ลิตร)

A = พื้นที่ของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายโอนมวล (เมตร²)

T = ระยะเวลา (ชั่วโมง)

$$R = (1 - C_p/C_f) \times 100 \quad \text{----- (2)}$$

โดยที่ R = ค่าการกักกันเกลือ (%)

C_p = ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายคิง

C_f = ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายขาเข้า

ผลการวิจัย

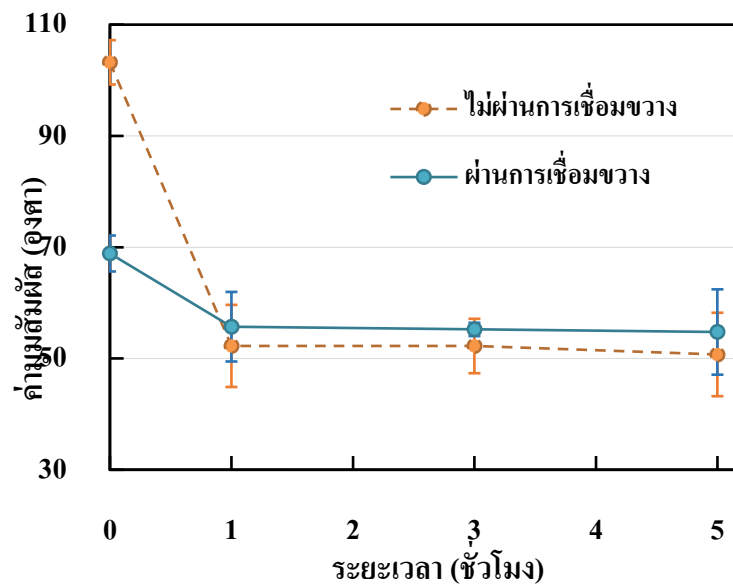
การปรับปรุงความชอบน้ำของเมมเบรน

ความชอบน้ำของเมมเบรนในเทอมของค่ามุมสัมผัสแสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 1 พบว่าเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวางมีความชอบน้ำมากกว่าเมมเบรนที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางจากค่ามุมสัมผัสที่ต่ำกว่า เนื่องจากการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริกเป็นการเพิ่มหมู่ $-SO_4^{2-}$ ที่มีความชอบน้ำให้กับเมมเบรน เมื่อมีหมู่ที่ชอบน้ำมากขึ้น เมมเบรนจึงมีความชอบน้ำมากขึ้นด้วย

หลังจากผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเชื่อมเมมเบรนในสารละลาย PIAM พบว่าเมมเบรนทั้ง 2 ชนิด มีค่ามุมสัมผัสกับหยดน้ำลดลงและเริ่มคงที่ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 แสดงว่าสามารถใช้เวลาเพียง 1 ชั่วโมง ในการปรับปรุงความชอบน้ำของเมมเบรนด้วยสารละลาย PIAM ความเข้มข้น 1% w/v ส่วนสาเหตุการลดลงของมุมสัมผัสนั้นน่าจะเกิดจากการทำปฏิกิริยากันของหมู่เอมีนบนพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานกับหมู่แอนไฮไดรด์ของ PIAM เกิดเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก (Tangpasuthadol et al., 2003; Zhang et al., 2007) ส่งผลให้เมมเบรนมีความความชอบน้ำมากขึ้น ดังเห็นได้จาก FT-IR Spectra ในรูปที่ 3

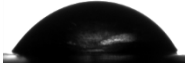
เมื่อพิจารณาที่เวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง พบว่าเมมเบรนไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางมีค่ามุมสัมผัสลดลงเพียงเล็กน้อยประมาณ 20% (จาก 68.9 ± 3.2 เป็น 55.7 ± 6.2 องศา) อาจเกิดจากการที่หมู่เอมีนบนพื้นผิวของเมมเบรนได้ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกในขั้นตอนการเชื่อมขวางแล้ว จึงมีหมู่คาร์บอกซิลิกเกิดขึ้นน้อย แต่ในกรณีของเมมเบรนที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางพบว่าค่ามุมสัมผัสลดลงเกือบ 50% (จาก 103.2 ± 4.0 เป็น 52.3 ± 7.4 องศา) เนื่องจากไม่มีการสูญเสียของหมู่เอมีน จึงมีหมู่เอมีนจำนวนมากในการทำปฏิกิริยากับ PIAM เกิดเป็นหมู่คาร์บอกซิลิกที่มีความชอบน้ำสูง

จากผลดังกล่าวทำให้เลือกใช้เมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวางในการศึกษาขั้นตอนต่อไป



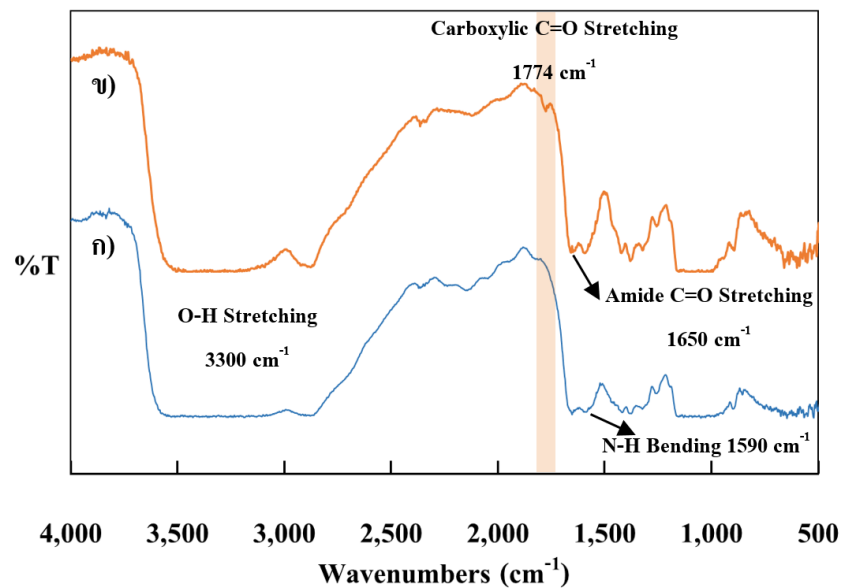
รูปที่ 2 ค่ามุมสัมผัสของเมมเบรนไคโตซานก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยสารละลาย PIAM 1% w/v

ตารางที่ 1 ค่ามุมสัมผัสของเมมเบรนไคโตซานก่อนและหลังการปรับปรุงด้วย PIAM 1% w/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ชนิดของเมมเบรนไคโตซาน	ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวหน้าของเมมเบรน	ค่ามุมสัมผัส (องศา)
ผ่านการเชื่อมขวาง		68.9±3.2
ผ่านการเชื่อมขวาง+ปรับปรุงพื้นผิว		55.7±6.2
ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง		103.2±4.0
ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง+ปรับปรุงพื้นผิว		52.3±7.4

โครงสร้างทางเคมี

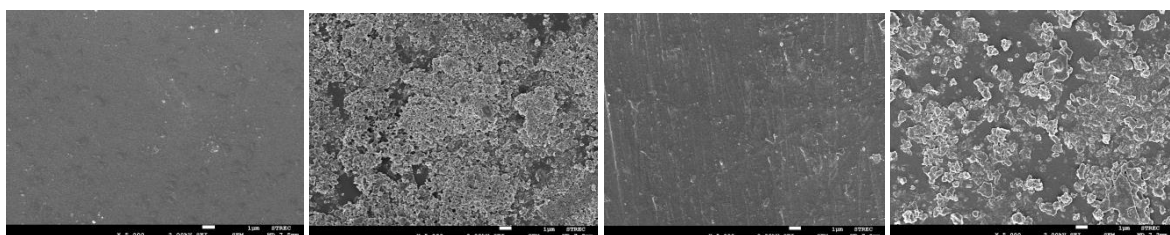
รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวางก่อนและหลังการปรับปรุงความชอบน้ำซึ่งปรากฏที่สำคัญที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของไคโตซาน ได้แก่ พีค O-H stretching, พีค Amine C=O Stretching และ Amine N-H Bending ที่หมายเลขคลื่นประมาณ 3300, 1650 และ 1590 cm^{-1} ตามลำดับ หลังจากการปรับปรุงพื้นผิวเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางด้วยการทำปฏิกิริยากับ PIAM 1% w/v เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบพีค Carboxylic C=O Stretching ที่หมายเลขคลื่น 1774 cm^{-1} ที่แสดงถึงการเกิดหมู่คาร์บอกซิลิกบนพื้นผิวของเมมเบรน (Zhang et al., 2007) ซึ่งน่าจะเกิดจากการทำปฏิกิริยากันของหมู่เอมีนบนพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานกับหมู่แอนไฮไดรด์ของ PIAM โดยหมู่คาร์บอกซิลิกที่เกิดขึ้นนี้มีความชอบน้ำสูง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ความชอบน้ำของเมมเบรนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 FT-IR Spectra ของเมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง (ก) ก่อนการปรับปรุงพื้นผิว (ข) หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วย PIAM 1% w/v เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานทั้ง 2 ชนิด ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงความชอบน้ำด้วย PIAM ด้วยเครื่อง FESEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4 พบว่า เมมเบรนไคโตซานก่อนการปรับปรุงทั้ง 2 ชนิด มีพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ (รูป ก และ ค) แต่หลังการปรับปรุงพบว่า เมมเบรนทั้งสองชนิดมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่อนุภาคของ PIAM เข้ามาเกาะติดบนพื้นผิวของเมมเบรนเพื่อทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่แอนไฮโดรกับหมู่เอมีน เกิดเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก โดยเมมเบรนชนิดไม่เชื่อมขวางสามารถเห็นความหนาแน่นของอนุภาค PIAM บนผิวหน้าเมมเบรนสูง (รูป ข) ในขณะที่เมมเบรนที่ผ่านการเชื่อมขวางเห็นความหนาแน่นของอนุภาค PIAM เบาบางกว่าอย่างเห็นได้ชัด (รูป ง) ความหนาแน่นของอนุภาค PIAM บนพื้นผิวเมมเบรนทั้งสองชนิดที่แตกต่างนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบมุมสัมผัส ข้างต้นที่พบว่า เมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางหลังการปรับปรุงพื้นผิวมีความชอบน้ำมากกว่า



ก)

ข)

ค)

ง)

รูปที่ 4 ลักษณะพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ก) แบบไม่เชื่อมขวางก่อนการปรับปรุงพื้นผิว

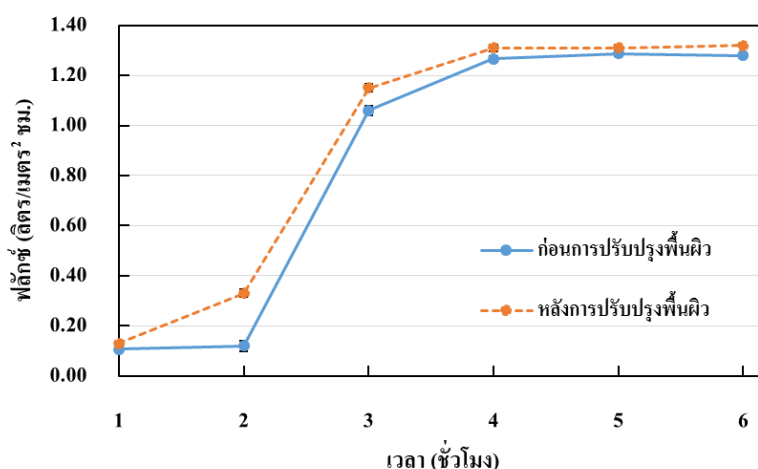
ข) แบบไม่เชื่อมขวางหลังการปรับปรุงพื้นผิว ค) แบบเชื่อมขวางก่อนการปรับปรุงพื้นผิว ง) แบบเชื่อมขวางหลังการปรับปรุงพื้นผิว

สมรรถนะของเมมเบรนในกระบวนการฟอว์เวิร์คคอสโมซิส

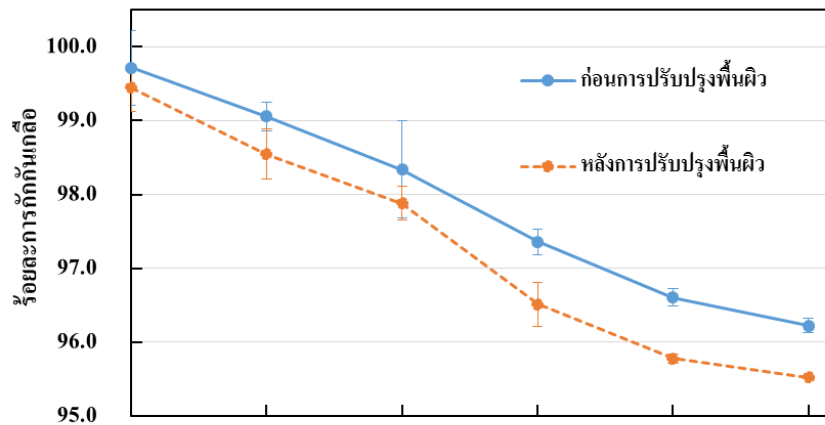
กลไกการถ่ายโอนมวลน้ำผ่านเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเป็นแบบ “Solution-Diffusion Model” (จันทอง, 2547) โดยการแทรกตัวของโมเลกุลน้ำที่สะสมเป็นชั้นโมเลกุลน้ำอยู่ที่ผิวหน้าตามระดับความชอบน้ำเข้าไปในเนื้อของเมมเบรน แล้วเกิดการแพร่ของโมเลกุลน้ำจากผิวด้านหนึ่งไปสู่ผิวด้านหนึ่งของเมมเบรนด้วยเกรเดียนต์ความเข้มข้นของโมเลกุลน้ำ ก่อนแพร่ออกจากเมมเบรนเข้าสู่สารละลายดัง จากรูปที่ 5 สังเกตเห็นได้ว่าในช่วงเวลาชั่วโมงที่ 1-4 ค่าฟลักซ์น้ำค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเริ่มคงที่ที่ชั่วโมงที่ 4 เนื่องจากช่วงนี้เกิดการละลายของโมเลกุลน้ำเข้าสู่เนื้อเมมเบรนมากกว่าการแพร่ออกจากเมมเบรน ผลผลิตที่ได้ในช่วงนี้จึงมีจำนวนน้อย ค่าฟลักซ์ที่วัดได้จึงน้อยตามไปด้วย จนขั้นตอนการละลายเข้าสู่เมมเบรนสมบูรณ์แล้ว (ชั่วโมงที่ 4 - 6) การแพร่ของน้ำจึงเกิดได้เต็มที่ ช่วงดังกล่าวนี้จึงให้ผลผลิตมากและค่าฟลักซ์เริ่มคงที่

เมื่อพิจารณาถึงผลของการปรับปรุงความชอบน้ำด้วย PIAM พบว่าเมมเบรนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะให้ค่าฟลักซ์ในช่วง 2-3 ชั่วโมงแรกสูงกว่าเมมเบรนที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลิกบนพื้นผิวเมมเบรนที่มีความชอบน้ำสูงช่วยให้การละลายของโมเลกุลน้ำเข้าสู่เมมเบรนได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามหลังจากที่ละลายเข้าสู่เมมเบรนจนสมบูรณ์แล้ว การปรับปรุงพื้นผิวช่วยเพิ่มค่าฟลักซ์ของเมมเบรนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเมื่อเปรียบเทียบที่ชั่วโมงที่ 6 เมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางก่อนและหลังการปรับปรุงมีค่าฟลักซ์ใกล้เคียงกันเท่ากับ 1.28 ± 0.00 และ 1.32 ± 0.00 ลิตร/เมตร² ชั่วโมง ตามลำดับ

ค่าร้อยละการกักกันเกลือของเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวางในกระบวนการฟอว์เวิร์คคอสโมซิส แสดงในรูปที่ 6 พบว่า เมมเบรนทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวให้ค่าการกักกันเกลือสูง (มากกว่าร้อยละ 95) และมีการลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากผลการบวมตัวของเมมเบรนจากการละลายของโมเลกุลน้ำเข้าไปในเนื้อเมมเบรน และเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของความชอบน้ำของเมมเบรน (ค่ามุมสัมผัสไม่เท่ากับศูนย์) ทำให้เกลือโซเดียมคลอไรด์ในรูปของไอออน (Na^+ และ Cl^-) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลน้ำสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวพบว่า ค่าการกักกันเกลือที่ชั่วโมงที่ 6 มีค่าเท่ากับร้อยละ 96.2 ± 0.0 และ 95.5 ± 0.1 ตามลำดับ จะเห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวทำให้ค่าการกักกันเกลือลดลงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงกล่าวได้ว่าค่าการปรับปรุงความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวางด้วย สารละลาย PIAM 1% w/v ส่งผลน้อยมากต่อการปรับปรุงสมรรถนะของเมมเบรน



รูปที่ 5 ฟลักซ์น้ำจากกระบวนการฟอว์เวิร์คคอสโมซิสโดยใช้เมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง



รูปที่ 6 ร้อยละการกักกันเกลือของเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวางในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของเมมเบรนไคโตซานตามงานวิจัยนี้ในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสกับเมมเบรนเซลลูโลสไตรอะซีเตตซึ่งเป็นเมมเบรนที่นักวิจัยมักนิยมใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเมื่อใช้สารละลายซูโครสเป็นสารดึงเหมือนกัน ค่าฟลักซ์น้ำที่ได้จากเมมเบรนไคโตซานมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากเมมเบรนเซลลูโลสไตรอะซีเตต และต่ำกว่ามากในกรณีที่ใช้สารดึงเป็นสารละลายอินทรีย์ เช่น แอมโมเนีย-คาร์บอนไดออกไซด์ แต่มีค่าใกล้เคียงกันหรือสูงกว่า เมื่อใช้สารดึงเป็นสารในกลุ่มไฮโดรเจล อย่างไรก็ตามความสามารถในการกักกันเกลือของเมมเบรนไคโตซานและของเมมเบรนเซลลูโลสไตรอะซีเตตมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2 สมรรถนะในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

ที่มา	เมมเบรน	สารดึงและสารพาเข้า	สมรรถนะในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิส
Zhao, Zou (2011)	เซลลูโลสไตรอะซีเตต	สารดึง : ซูโครส 1 โมลาร์ สารพาเข้า : น้ำปราศจากไอออน	ฟลักซ์น้ำ : 3.8 ลิ./ม ² ชม. การกักกันเกลือ : ไม่ระบุ
McCutcheon et al. (2006)	เซลลูโลสอะซีเตต	สารดึง : แอมโมเนีย-คาร์บอนไดออกไซด์ 1.1 โมลาร์ สารพาเข้า : โซเดียมคลอไรด์ 0.05 โมลาร์	ฟลักซ์น้ำ : 19.08 ลิ./ม ² ชม. การกักกันเกลือ : ร้อยละ 97.9
Zeng et al. (2013)	เซลลูโลสไตรอะซีเตต	สารดึง : พอลิเมอร์-แกรไฟีน คอมโพสิตไฮโดรเจล สารพาเข้า : โซเดียมคลอไรด์ 0.034 โมลาร์	ฟลักซ์น้ำ : 0.75-3.1 ลิ./ม ² ชม. การกักกันเกลือ : ไม่ระบุ
Razmjou et al. (2013)	เซลลูโลสไตรอะซีเตต	สารดึง : ไฮโดรเจล สารพาเข้า : โซเดียมคลอไรด์ 0.034 โมลาร์	ฟลักซ์น้ำ : 0.5-1.5 ลิ./ม ² ชม. การกักกันเกลือ : ไม่ระบุ
งานวิจัยนี้	ไคโตซาน	สารดึง : ซูโครส 1 โมลาร์ สารพาเข้า : โซเดียมคลอไรด์ 0.05 โมลาร์	ฟลักซ์น้ำ : 1.28 ลิ./ม ² ชม. การกักกันเกลือ : ร้อยละ 96.2

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การปรับปรุงความชอบน้ำของเมมเบรนไคโตซานโดยการแช่ในสารละลาย PIAM/Acetone 1% w/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถเพิ่มความชอบน้ำให้กับเมมเบรนไคโตซานได้ โดยพบว่าค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับเมมเบรนชนิดที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริกและไม่ผ่านการเชื่อมขวางลดลงประมาณร้อยละ 20 และ 50 ตามลำดับ ผลทดสอบโครงสร้างทางเคมีและลักษณะทางสัณฐานวิทยาทำให้ทราบว่าเมมเบรนมีความชอบน้ำเพิ่มขึ้นจากการเกิดหมู่คาร์บอกซิลิกบนพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซาน จากการนำเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวางมาศึกษาการบำบัดน้ำเค็มในกระบวนการฟอร์เวิร์ดออสโมซิสพบว่า การปรับปรุงความชอบน้ำของเมมเบรนส่งผลต่อสมรรถนะของเมมเบรนเพียงเล็กน้อย โดยค่าฟลักซ์น้ำของเมมเบรนก่อนและหลังการปรับปรุงความชอบน้ำมีค่าเท่ากับ 1.28 ± 0.00 และ 1.32 ± 0.00 ลิตร/เมตร² ชั่วโมง ในขณะที่การกักกันเกลือมีค่าสูง โดยเท่ากับร้อยละ 96.2 ± 0.0 และ 95.5 ± 0.1 ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เอส เอส เมมเบรน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เมมเบรนเพื่อใช้ในการงานวิจัย และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดค่ามุมสัมผัส

เอกสารอ้างอิง

- ชั้นทอง สุนทรภา. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2547.
- Chapman PD, Oliveira T, Livingstone AG, Li K. Membranes for the dehydration of solvents by pervaporation. *Journal of membrane science* 2008; 32(318): 5-37.
- Elimelech M, Phillip WA. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science* 2010; 130(333): 712-717.
- Flynn MT, Soler M, Howe AS, Shull S, Broyan J, Gormly S, et al. Forward osmosis cargo transfer bag. 42nd International conference on environmental systems; 2012 July 15-19; San Diego, California. Virginia: AIAA, 2012.
- McCutcheon JR, McGinnis RB, Elimelech M. Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance. *Journal of Membrane Science* 2006; 30(278): 114-123.
- Nguyen HT, Chen SS, Nguyen CN, Ngo HH, Guo W, Li CW. Exploring an innovative surfactant and phosphate-based draw solution for forward osmosis desalination. *Journal of membrane science* 2015; 39(489): 212-219.
- Razmjou A, Simon GP, Wang H. Effect of particle size on the performance of forward osmosis desalination by stimuli-responsive polymer hydrogels as a draw agent. *Chemical Engineering Journal* 2013; 25(215): 913-920.
- Rana D, Matsuura T. Surface modifications for antifouling membranes. *Chemical reviews* 2010; 86(110): 2448-2471.
- Service RF. Desalination freshens up. *Science* 2006; 126(313): 1088-1090.
- Sigma-Aldrich Corporation. Material Safety Data Sheet of PIAM [online] 2004 [cited 2015 Dec 27]. Available from: http://www.orcbs.msu.edu/msds/102604_EWM_024_POLYANHYDRIDE.PDF

- Shaffer DL, Werber JR, Jaramillo H, Lin S, Elimelech M. Forward osmosis: Where are we now?. *Desalination* 2015; 49(356): 271-284.
- Tangpasuthadol V, Pongchaisirikul N, Hoven VP. Surface modification of chitosan films. Effects of hydrophobicity on protein adsorption. *Carbohydrate research* 2003; 38(338): 937-942.
- Zeng Y, Qiu L, Wang K, Yao J, Li D, Simon GP, et al. Significantly enhanced water flux in forward osmosis desalination with polymer-graphene composite hydrogels as a draw agent. *RSC Advances* 2013; 2(3): 887-894.
- Zhang W, Li G, Fang Y, Wang X. Maleic anhydride surface-modification of crosslinked chitosan membrane and its pervaporation performance. *Journal of membrane science* 2007; 31(295): 130-138.
- Zhao S, Zou L. Relating solution physicochemical properties to internal concentration polarization in forward osmosis. *Journal of Membrane Science* 2011; 35(379): 459-467.