

บทที่ 4

ผลของการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการสังเคราะห์ไคโตซานต่อกิ่งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์

การสังเคราะห์ไคโตซานต่อกิ่งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ สิ่งที่จะต้องทำการวิเคราะห์คือ ค่า Conversion (%X) ของปฏิกิริยา ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันแบบต่อกิ่ง (Grafting efficiency หรือ %GE) และค่าอัตราส่วนการต่อกิ่ง (Grafting ratio หรือ GR) ซึ่งหาได้จากขั้นตอนโคโพลิเมอไรเซชันแบบต่อกิ่ง โดยมีสัดส่วนในการทำปฏิกิริยา คือ ไคโตซาน 15 g และเติมโมโนเมอร์ของไวนิลอะซิเตทปริมาณ 100 g โดยแบ่งการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การสังเคราะห์ CS-g-PVA และการสังเคราะห์ CS-g-PVA+PWA เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพของเมมเบรนไคโตซานต่อกิ่งด้วยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยใช้กรดฟอสโฟทังสติก (PWA) แม้ว่า PWA จะทำหน้าที่เสมือนตัวเติม (filler) เพื่อดึงดูดโปรตอนให้เคลื่อนที่ในเมมเบรน แต่การเติม PWA ใน CS-g-PVA ทำได้ยาก ดังนั้นจะต้องทำการเติม PWA ลงไปในขั้นตอนก่อนทำการสังเคราะห์ CS-g-PVA เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการทำปฏิกิริยาดังนี้ ซึ่งผลของการสังเคราะห์เป็นดังนี้

ตารางที่ 4.1

แสดงค่า conversion (%X), ค่าประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันแบบต่อกิ่ง (Grafting efficiency, GE) และค่าอัตราส่วนการต่อกิ่ง (Grafting ratio, GR) ของ CS-g-PVA (PWA 0%) และ CS-g-PVA+PWA

ปริมาณ PWA	PWA 0%	PWA 5%	PWA 10%	PWA 20%	PWA 40%
%X	61.84	62.79	74.88	75.86	67.18
%GE	22.22	29.47	21.05	23.79	18.18
GR	0.92	1.17	0.96	1.00	0.58

เมื่อพิจารณา ค่า %X, %GE และ GR ของ CS-g-PVA (PWA 0%) โดยทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Don และคณะ (2005) ที่ทำการสังเคราะห์ CS-g-PVA โดยใช้ไคโตซานและโมโนเมอร์ของไวนิลอะซิเตทปริมาณเท่ากันพบว่า มีค่า %X = 71.2%, %GE = 34.2% และ GR = 1.62 จะเห็นว่าค่าต่างๆของ CS-g-PVA ที่สังเคราะห์ได้ มีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Don เล็กน้อย แต่ก็ยัง

อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อาจเนื่องมาจากโคโตซานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นแบบชนิดมวลโมเลกุลสูง การเข้าทำปฏิกิริยากันระหว่างอนุมูลอิสระของโคโตซานกับโมโนเมอร์ของไวนิลอะซิเตท ทำได้ยากกว่าการทำปฏิกิริยาระหว่างโมโนเมอร์ของไวนิลอะซิเตทด้วยตัวเองเกิดปฏิกิริยาโฮโมโพลิเมอไรเซชัน เกิดเป็นสายของโพลิไวนิลอะซิเตท ดังนั้นค่า %GE และ GR จึงต่ำกว่าการทดลองของ Don ส่วนการแก้ไขเพื่อให้ค่าการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาโคโพลิเมอไรเซชันให้นานขึ้น อาจทำให้สายของโพลิไวนิลอะซิเตทยาวขึ้นหรือซับซ้อนกว่าเดิม เมื่อเปลี่ยนโพลิไวนิลอะซิเตทเป็นโพลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้ว สายยาวของโพลิไวนิลแอลกอฮอล์จะละลายในสารละลายกรดอะซิติกได้ยาก ส่งผลให้การขึ้นรูปของเมมเบรนมีความยุ่งยากไปด้วย ส่วนการแก้ไขอื่นๆ อาจทำได้เช่น การปรับความเร็วรอบของการกวนสารในการทำปฏิกิริยา หรือปรับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น

ส่วน CS-g-PVA+PWA (PWA 5 – 40%) พบว่าค่า %X, %GE และ GR มีแนวโน้มมากกว่า CS-g-PVA เล็กน้อย ยกเว้นที่ PWA 40% ซึ่งค่าต่างๆ ที่ได้จากการสังเคราะห์ในแต่ละครั้งก็จะไม่เท่ากัน แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน อาจขึ้นอยู่กับเงื่อนไขบางประการในกระบวนการสังเคราะห์ ส่วนค่าต่างๆ ของ PWA 40% ที่น้อยกว่าตัวอื่นๆ นั้น เนื่องจากมีปริมาณของ PWA ผสมอยู่ถึง 40% ของน้ำหนักโคโตซานก่อนทำปฏิกิริยา ในขั้นตอนของการผสมโคโตซานลงในสารละลายกรดอะซิติกและ PWA โคโตซานส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ PWA เกิดเป็นตะกอนสีขาวขึ้น ทำให้ปริมาณโคโตซานที่จะไปทำปฏิกิริยาต่อกับไวนิลอะซิเตทลดลง และโคโตซานที่ทำปฏิกิริยากับ PWA แล้วก็จะทำปฏิกิริยากับไวนิลอะซิเตทได้ยากขึ้นเช่นกัน ดังนั้น เมื่อทำการคำนวณค่าการทำปฏิกิริยา โดยลบน้ำหนักของ PWA ออกไป ค่า %X, %GE และ GR จึงมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากมีปริมาณ PWA มากที่สุดนั่นเอง

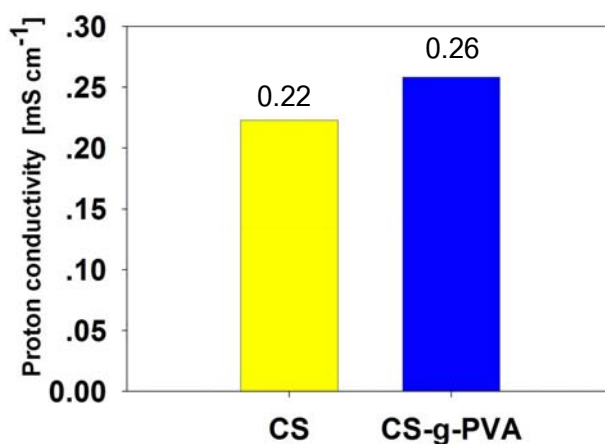
4.2 ผลการทดสอบการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA, CS-g-PVA+SDCB และ CS-g-PVA+PWA

การทำการเตรียมเมมเบรนเพื่อใช้ในขั้นตอนนี้ ประกอบด้วยเมมเบรนหลายรูปแบบ โดยเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของเมมเบรนไคโตซานต่อกิ่งด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยการเติมสารบางชนิดและทำการเชื่อมขวางเมมเบรน แล้วเปรียบเทียบกับเมมเบรนไคโตซานต่อกิ่งด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์แบบเดิม รวมทั้งเปรียบเทียบกับเมมเบรนที่ใช้กันในปัจจุบัน คือเมมเบรน Nafion®117 โดยใช้อุปกรณ์ four-probe-points cell ซึ่งต่อกับเครื่อง Potentiostat testing และใช้โปรแกรม Frequency Response Analysis วัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ที่ความถี่ไฟฟ้า 10 kHz และแอมพลิจูด 0.35 mA ค่าการนำไอออนที่คำนวณได้เป็นดังนี้

4.2.1 การวัดการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS, CS-g-PVA และ CS-g-PVA+H₂SO₄

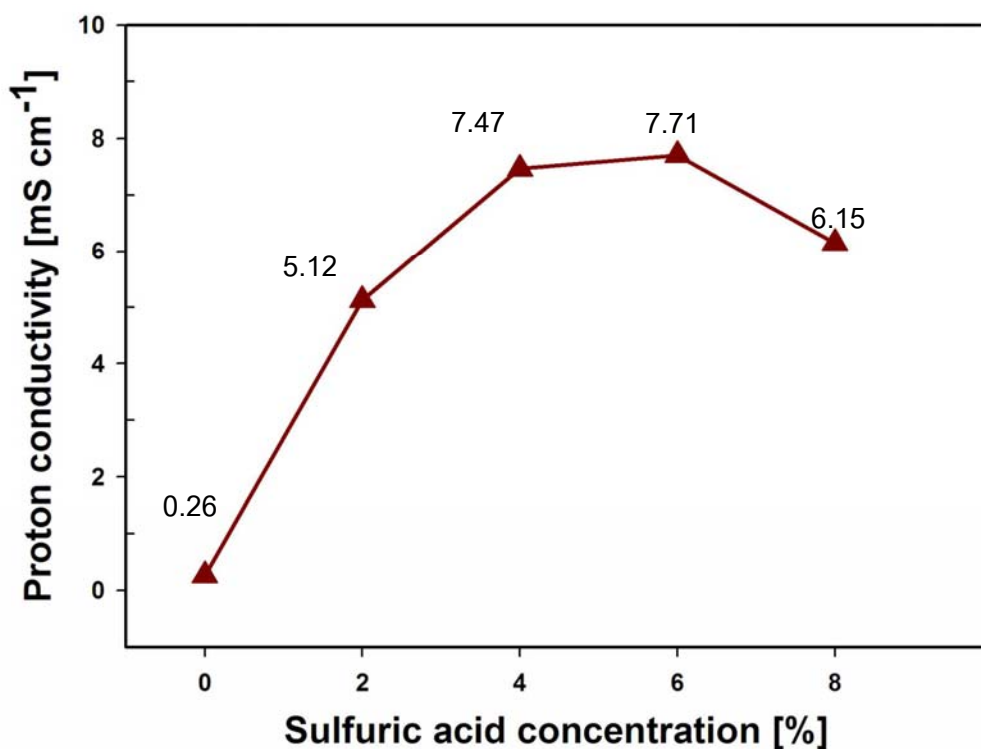
ภาพที่ 4.1

แสดงการเปรียบเทียบค่าการนำไอออนหรือโปรตอนระหว่างเมมเบรน CS (ไคโตซาน) และเมมเบรน CS-g-PVA



ภาพที่ 4.2

แสดงการเปรียบเทียบการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA แบบที่ไม่ได้ทำการเชื่อมขวางและแบบที่ทำการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่างๆ (CS-g-PVA+H₂SO₄)



จากภาพที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรนไคโตซาน (CS) กับเมมเบรน CS-g-PVA พบว่าค่าการนำไอออนของเมมเบรนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเพิ่มโพลีไวนิลแอลกอฮอล์เข้าไปในโครงสร้างของไคโตซานจะช่วยเพิ่มความชอบน้ำให้แก่ไคโตซาน น้ำเป็นตัวกลางสำคัญในการนำไอออนของเมมเบรนไคโตซานดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ดังนั้นเมื่อเมมเบรนดูดซึมน้ำได้มากขึ้นจึงจะทำให้ตัวเมมเบรนสามารถนำไอออนได้ดีขึ้น

ส่วนภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรนที่ไม่ได้เชื่อมขวางและที่ทำการเชื่อมขวางแล้ว (CS-g-PVA+H₂SO₄) พบว่าเมื่อทำการเชื่อมขวางเมมเบรน CS-g-PVA ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกและกลูตาโรลดีไฮด์ ค่าการนำไอออนเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมมาก โดยค่าการนำไอออนเพิ่มจากความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกเป็น 2, 4 จนถึง 6% ซึ่งมีค่า 7.713 mS/cm และลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มเป็น 8% อาจเนื่องมาจากกรดซัลฟูริกเป็นตัวเชื่อมขวางสำคัญที่ทำให้เมมเบรน CS-g-PVA นำไอออนได้ดีขึ้น ในขณะที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวเมมเบรนโดยการสร้างพันธะไอออนิกขึ้นในตัวเมมเบรนซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมาก เมื่อมีความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้น พันธะไอออนิกก็เกิดขึ้นได้มากขึ้นเช่นกันทำให้เมมเบรนมีความ

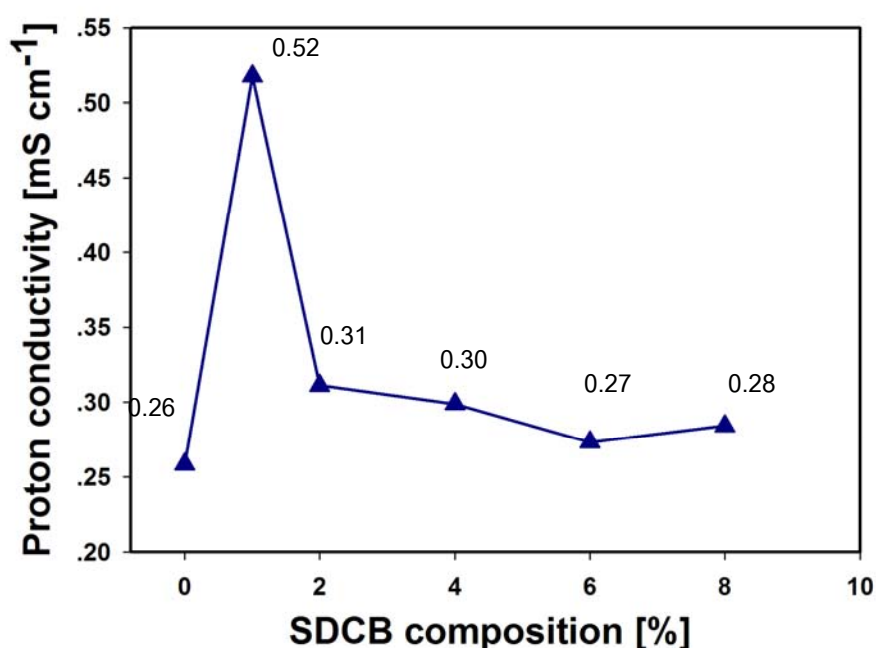
แข็ง และเมื่อโครงสร้างภายในของเมมเบรนเปลี่ยนไปจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในตัวเมมเบรน มากกว่าที่พันธะนี้ช่วยในการนำไอออน จึงเป็นผลให้ค่าการนำไอออนของเมมเบรนลดลง นอกจากนี้เมื่อทำการเชื่อมขวางเมมเบรนด้วยกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นสูง ทำให้ลักษณะทางกายภาพของเมมเบรนเปลี่ยนไป คือมีความเปราะมากขึ้น และมีความยืดหยุ่นของเมมเบรนลดลง ซึ่งเป็นเพราะพันธะไอออนิกที่เกิดขึ้นมากเกินไป จากผลการทดลองในขั้นตอนนี้อาจสรุปได้ว่า การเชื่อมขวางเมมเบรน CS-g-PVA ที่เหมาะสมควรใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นไม่เกิน 6%

4.2.2 การวัดการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA+SDCB

ภาพที่ 4.3

แสดงค่าการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA

และเมมเบรน CS-g-PVA+SDCB ที่ปริมาณ SDCB ต่างๆ กัน



จากภาพเป็นการเปรียบเทียบค่าการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA ที่เติมเขม่าดำขนาดนาโนเมตรชนิดกระจายตัว (Self-Dispersible Carbon Black nanoparticles, SDCB) ในปริมาณต่างๆ กัน SDCB เป็นสารที่มีประจุลบที่ผิว (COO^-) และอาจเหนี่ยวนำโปรตอนซึ่งมีประจุบวกให้เคลื่อนที่ในเมมเบรนได้มากขึ้น พบว่าเมื่อผสม SDCB เข้าไปที่ 1% ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ 0.518 mS/cm จากนั้นเมื่อเพิ่ม SDCB เป็น 2% ค่าการนำโปรตอนจะลดลง และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่จนถึง SDCB 8% ซึ่งอาจเป็นเพราะ แม้ว่า Carbon

black จะช่วยในการดึงดูดโปรตอนให้เคลื่อนที่ในเมมเบรนได้ แต่ตัวของ Carbon black เองก็มีสมบัติในการลดการดูดซึมน้ำด้วย เมื่อเมมเบรนมีความชอบน้ำน้อยลง ทำให้โมเลกุลน้ำซึ่งเป็นตัวกลางสำคัญในการเคลื่อนที่ของไอออนในตัวเมมเบรนเคลื่อนตัวไปในตัวเมมเบรนได้ยากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ SDCB จึงทำให้การนำโปรตอนของเมมเบรนมีแนวโน้มลดลง

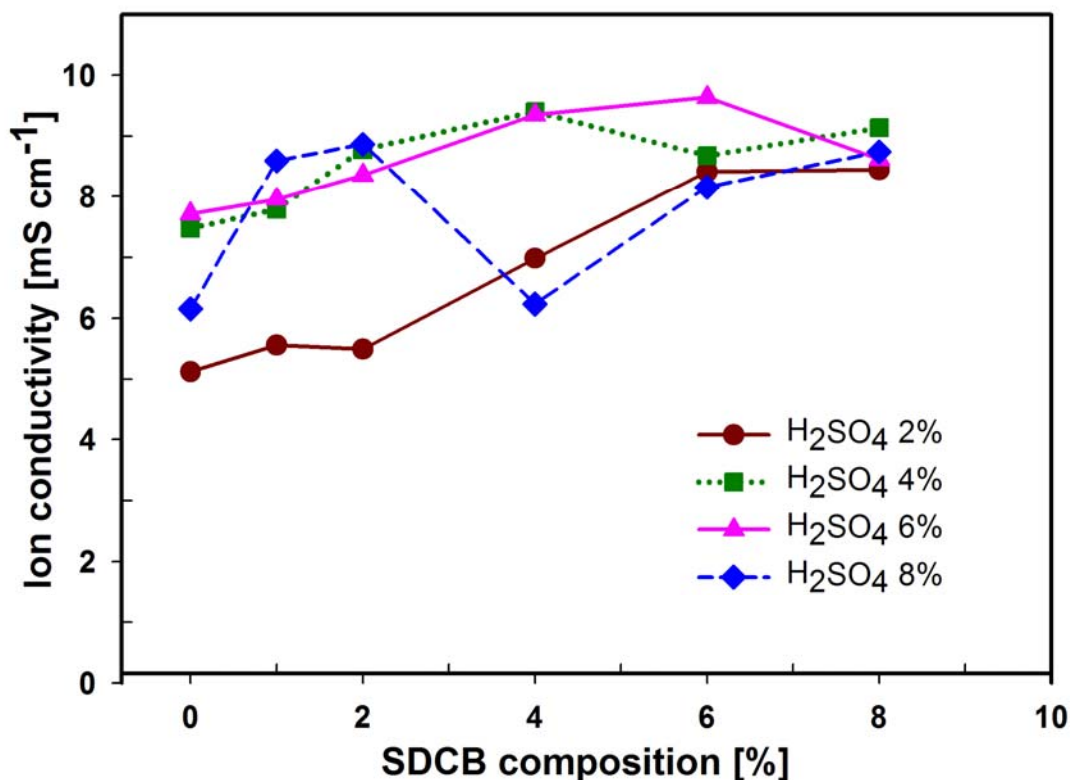
ตารางที่ 4.2

แสดงค่าการนำไอออนหรือโปรตอน (mS/cm) ของเมมเบรน CS-g-PVA และ CS-g-PVA+SDCB ที่ SDCB ปริมาณต่างๆ และทำการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟริกความเข้มข้นต่างๆ

H_2SO_4 SDCB	H_2SO_4 0%	H_2SO_4 2%	H_2SO_4 4%	H_2SO_4 6%	H_2SO_4 8%
SDCB 0%	0.258	5.123	7.472	7.713	6.154
SDCB 1%	0.518	5.557	7.791	7.952	8.592
SDCB 2%	0.311	5.497	8.777	8.355	8.866
SDCB 4%	0.299	6.982	9.405	9.352	6.236
SDCB 6%	0.273	8.413	8.676	9.640	8.155
SDCB 8%	0.284	8.446	9.137	8.617	8.743

ภาพที่ 4.4

แสดงการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA+SDCB+ H_2SO_4
ที่ปริมาณ SDCB และความเข้มข้น H_2SO_4 ต่างๆ กัน



จากภาพกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติม SDCB และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่ใช้เชื่อมขวาง เมื่อพิจารณาแนวโน้มของกราฟแต่ละเส้น จะเห็นว่าเมื่อใช้กรดซัลฟูริก 2% ในการเชื่อมขวาง เมื่อเพิ่ม SDCB มากขึ้น ค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นไปจนถึงที่ระดับ SDCB 6% จากนั้นจะลดลงเล็กน้อย ส่วนเส้นที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2% และ 4% มีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกัน โดยเส้นกราฟจะเริ่มคงที่ ที่ปริมาณ SDCB ตั้งแต่ 6% ขึ้นไป ซึ่งค่าการนำโปรตอนสูงที่สุดที่ได้ คือ เมมเบรน CS-g-PVA+SDCB 6% เชื่อมขวางด้วย H_2SO_4 6% มีค่าการนำโปรตอน 9.640 mS/cm ส่วนเส้นกราฟที่ใช้กรดซัลฟูริก 8% เชื่อมขวาง ค่าการนำโปรตอนมีแนวโน้มไม่แน่นอน เป็นเพราะเมื่อต้องทำการเชื่อมขวางเมมเบรนในกรดที่มีความเข้มข้นสูงจำเป็นต้องเลือกเมมเบรนที่มีความหนามากขึ้น เพราะเมื่อความเข้มข้นของกรดสูง หลังการเชื่อมขวางเมมเบรนจะเปราะแข็งมากขึ้นและหักหรือขาดได้ง่าย ความหนาของเมมเบรนก็จะลดลงด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มความหนาของเมมเบรนแล้วนำมาคำนวณค่าการนำโปรตอน จะทำให้ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนต่ำลง รวมทั้งเมื่อนำกรดความเข้มข้นสูงมาเชื่อมขวางจะทำให้พันธะใน

เมมเบรนมีจำนวนมากและหนาแน่นเกินไป ทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำผ่านเมมเบรน เป็นผลให้ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนลดลง

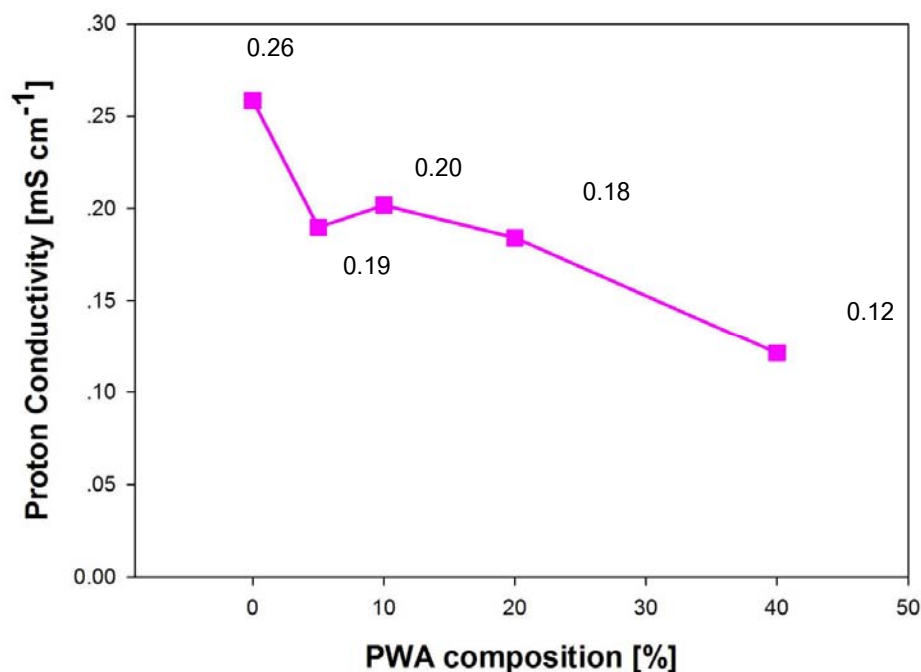
จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึง Synergistic effect หรือ ภาวะการส่งเสริมซึ่งกันและกัน ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สารทั้งสองชนิดร่วมกัน แล้วสารทั้งสองชนิดนี้จะช่วยส่งเสริมซึ่งกันและกัน ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เพิ่มมากขึ้นหลายเท่า แต่หากใช้สารเพียงชนิดเดียวก็จะทำให้ได้ผลดีขึ้นได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ยกตัวอย่าง เช่น เมมเบรน CS-g-PVA มีค่าการนำโปรตอน 0.258 mS/cm เมื่อผสม SDCB เข้าไป 4% พบว่าค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนเพิ่มเป็น 0.299 mS/cm หรือประมาณ 1.2 เท่า แต่เมื่อทำการเชื่อมขวางเมมเบรน CS-g-PVA ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4% ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนเท่ากับ 7.472 mS/cm หรือประมาณ 28.7 เท่าจากเดิม และเมื่อใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน คือผสม SDCB 4% และเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริก 4% ค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นเป็น 9.405 mS/cm หรือประมาณ 36.2 เท่าจากเมมเบรน CS-g-PVA ดังนั้น Synergistic effect นี้เองที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำโปรตอนของเมมเบรนได้เป็นอย่างดี

4.2.3 การวัดการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA+PWA

การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีนี้ต้องเติมกรดฟอสโฟทังสติก (PWA) เข้าไปในขั้นตอนของการสังเคราะห์สาร ข้อสังเกตให้เห็นความแตกต่างระหว่างการเติม PWA กับ SDCB คือ จะเติม PWA ที่ปริมาณ 5, 10, 20 และ 40% ของน้ำหนักโคโตนานที่ซึ่งได้ก่อนทำปฏิกิริยา แต่ SDCB จะทำการเติมปริมาณซึ่งคิดจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของ CS-g-PVA เมื่อกระบวนการสังเคราะห์เสร็จแล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ CS-g-PVA+PWA ซึ่งคำนวณค่า %X, %GE และ GR ที่หาได้จากขั้นตอนการสังเคราะห์ไปแล้วตามหัวข้อ 4.1 โดยกรดฟอสโฟทังสติกนี้เมื่อละลายในน้ำจะแตกตัวให้ประจุลบที่เรียกว่า Keggin ion ($PW_{12}O_{40}^{3-}$) จากลักษณะของประจุที่มีความเป็นลบมากถึงสามตัว จึงน่าที่จะดึงดูดโปรตอนให้เคลื่อนที่ในเมมเบรนได้มากขึ้น ค่าการนำโปรตอนที่วัดได้ เป็นดังนี้

ภาพที่ 4.5

แสดงค่าการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA
และเมมเบรน CS-g-PVA+PWA ที่ปริมาณ PWA ต่างๆกัน



จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติม PWA เข้าไปใน CS-g-PVA ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนมีแนวโน้มลดลง ยิ่งปริมาณ PWA มีเพิ่มขึ้นเท่าไร ค่าการนำโปรตอนก็จะยิ่งลดลงตามไปด้วย โดยค่าการนำโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA+PWA สูงที่สุดคือที่ปริมาณ PWA 10% มีค่า 0.202 mS/cm และค่าการนำโปรตอนต่ำที่สุดคือที่ปริมาณ PWA 40% มีค่า 0.121 mS/cm ถ้าพิจารณาตามทฤษฎีแล้วค่าการนำโปรตอนควรจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของประจุลบที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งงานวิจัยอื่นที่สนับสนุนทฤษฎีนี้ เช่น Cui และคณะ (2009) เตรียมเมมเบรนผสมระหว่างไคโตซาน (CS) และ PWA โดยทำการแช่เมมเบรนลงในสารละลาย PWA ความเข้มข้น 0.05 M เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อนำไปทดสอบที่ 25°C เมมเบรนผสมให้ค่าการนำโปรตอนที่ขึ้นเป็น 0.0122 S/cm ดีกว่าเมมเบรน CS ที่มีค่าการนำโปรตอน 0.0035 S/cm สาเหตุที่ค่าการนำโปรตอนลดลงอาจเนื่องมาจากความแตกต่างของวิธีการผสมสารทั้งสอง จากการที่ PWA ไม่สามารถผสมให้เข้ากันได้กับ CS-g-PVA จึงจำเป็นต้องผสม PWA กับไคโตซานในขั้นตอนการสังเคราะห์สาร ซึ่งเมื่อ PWA ทำปฏิกิริยากับไคโตซาน Keggin ions จะจับกับโปรตอนที่ติดกับหมู่เอมีนของไคโตซาน (protonated amine, NH_3^+) และเกิดพันธะระหว่างกันขึ้น ซึ่งทำให้ประจุลบของ Keggin ions ถูกใช้ไปในการสร้างพันธะ

พร้อมกันนี้หมู่เอมีนที่โปรตอน (H^+) สามารถกระโดดจากหมู่เอมีนหนึ่งไปยังอีกหมู่เอมีนหนึ่งได้ถูกใช้งานไป ดังนั้นค่าการนำโปรตอนจึงลดลง

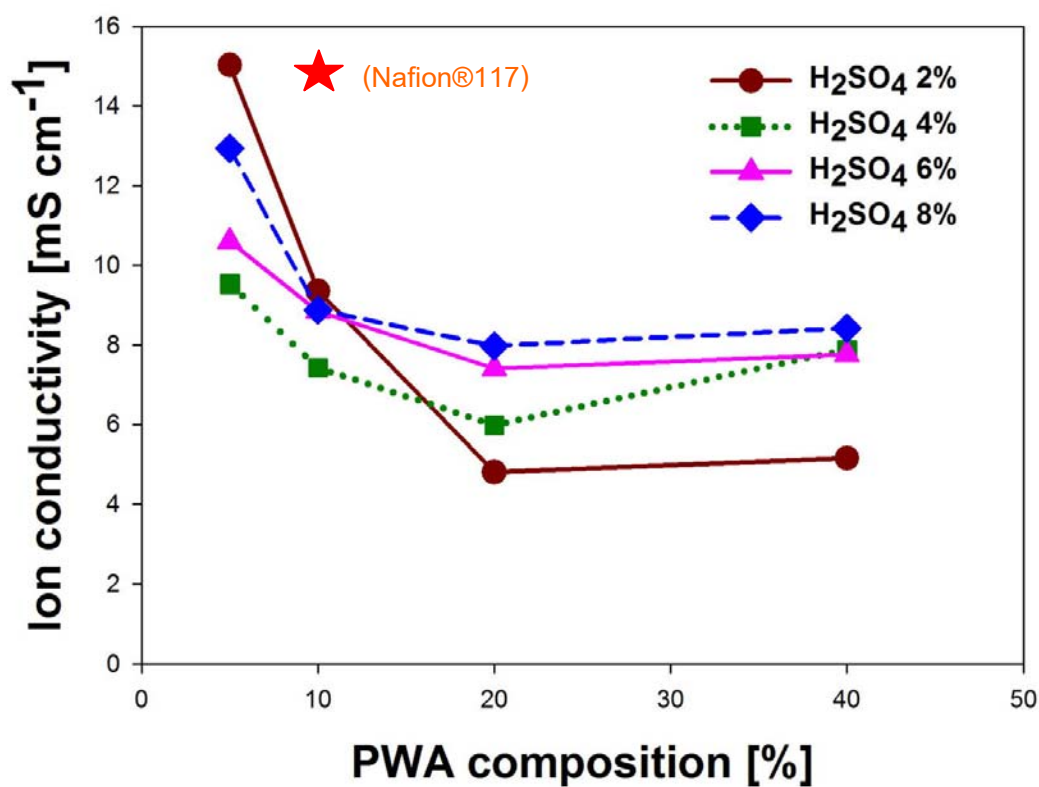
ตารางที่ 4.3

แสดงค่าการนำไอออนหรือโปรตอน (mS/cm) ของเมมเบรน CS-g-PVA+PWA ที่ปริมาณต่างๆ และทำการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่างๆ

เมมเบรน	H ₂ SO ₄ 2%	H ₂ SO ₄ 4%	H ₂ SO ₄ 6%	H ₂ SO ₄ 8%
CS-g-PVA with PWA 5%	15.022	9.525	10.595	12.941
CS-g-PVA with PWA 10%	9.353	7.424	8.842	8.874
CS-g-PVA with PWA 20%	4.518	5.977	7.403	7.972
CS-g-PVA with PWA 40%	4.798	7.877	7.761	8.414

ภาพที่ 4.6

แสดงค่าการนำไอออนหรือโปรตอนของเมมเบรน CS-g-PVA+PWA+H₂SO₄ ที่ปริมาณ PWA และความเข้มข้น H₂SO₄ ต่างๆ กัน



เมื่อใช้การผสมกรดฟอสฟอริกทั้งสติก ที่อัตราส่วน 5, 10, 20 และ 40% ของน้ำหนักไคโตซาน ร่วมกับการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 2, 4, 6 และ 8% แล้วนำเมมเบรนที่เตรียมได้ ไปวัดค่าการนำโปรตอน พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือเมมเบรนที่มี PWA ปริมาณ 5% แล้วทำการเชื่อมขวางด้วยกรดทุกค่าความเข้มข้นจะได้ค่าการนำโปรตอนสูงที่สุด โดยค่าสูงสุดเมื่อใช้ PWA 5% และเชื่อมขวางด้วยกรดเข้มข้น 2% ได้ค่า 15.022 mS/cm ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดที่ได้ในการทดลองนี้ สูงกว่าเมมเบรน Nafion®117 ที่ทดลองในสภาวะเดียวกัน วัดได้ 14.917 mS/cm จากนั้นค่าการนำโปรตอนจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ PWA ไปจนกระทั่ง PWA เท่ากับ 20% จากนั้นเมื่อเพิ่ม PWA เป็น 40% ค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือคงที่ สาเหตุที่เมื่อใช้ ปริมาณ PWA น้อยๆ แล้วให้ค่าการนำโปรตอนที่ดี อาจเนื่องมาจากการที่ PWA จะทำปฏิกิริยากับ ไคโตซานก่อนที่ไคโตซานจะตอกรับกับโพลีไวนิลอะซิเตท ที่ปริมาณ PWA น้อยๆ ก็จะทำปฏิกิริยากับ ไคโตซานในสัดส่วนน้อยด้วย ดังนั้นจึงมีปริมาณไคโตซานที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลือ อยู่มาก เมื่อนำ เมมเบรนมาทำการเชื่อมขวาง ซัลเฟตไอออนจึงมีตำแหน่งเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของไคโตซาน มากขึ้นด้วย ในทางตรงข้ามที่สัดส่วนของ PWA มากๆ แสดงว่าไคโตซานถูกใช้ในการทำปฏิกิริยา มากไปด้วย ตำแหน่งในการเชื่อมขวางด้วยซัลเฟตไอออนก็จะน้อยลงไปด้วย เมื่อการเชื่อมขวางทำ ได้น้อยลงก็ทำให้ค่าการนำโปรตอนลดลงไปด้วย

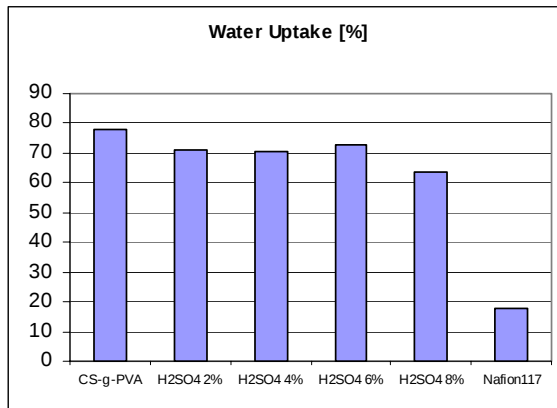
4.3 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำและเมทานอล

ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และ 3 เมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมทานอลโดยตรงควรมีค่าดูดซึมน้ำสูง ค่าการดูดซึมเมทานอลและค่าการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรนต่ำ เนื่องจากน้ำเป็นตัวกลางสำคัญในการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านเมมเบรน ส่วนเมทานอลที่ใช้เป็น เชื้อเพลิงหลักของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ ดังนั้นเมมเบรนที่มีค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลต่ำจะ ช่วยลดการสูญเสียเชื้อเพลิงโดยไม่จำเป็นได้ นอกจากนี้เมทานอลที่แพร่ผ่านเข้ามาในปริมาณมาก จะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพลดลง จากการทดสอบโดยทำการชั่งน้ำหนักแห้งก่อน จากนั้นแช่เมมเบรนในน้ำกลั่นและเมทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักหลัง นำไปคำนวณ ค่าการดูดซึมน้ำและเมทานอลได้ผลการทดลองเป็นดังนี้

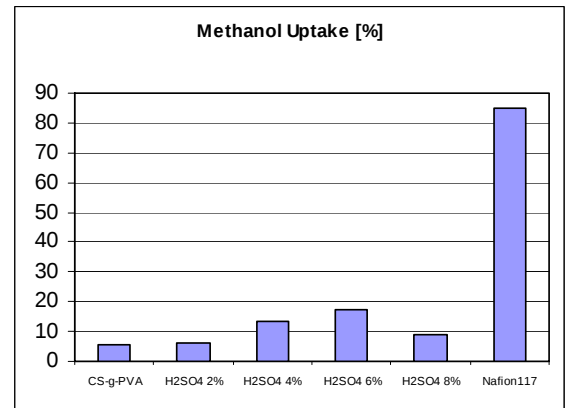
ภาพที่ 4.7

แสดงการเปรียบเทียบผลการดูดซึมน้ำ (ก) และเมทานอล(ข)

ของเมมเบรน CS-g-PVA, CS-g-PVA+H₂SO₄ และ Nafion®117



(ก)

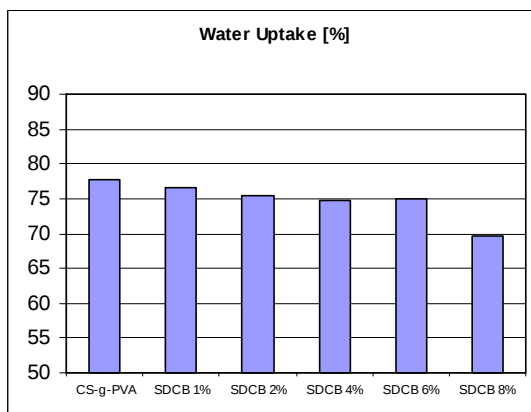


(ข)

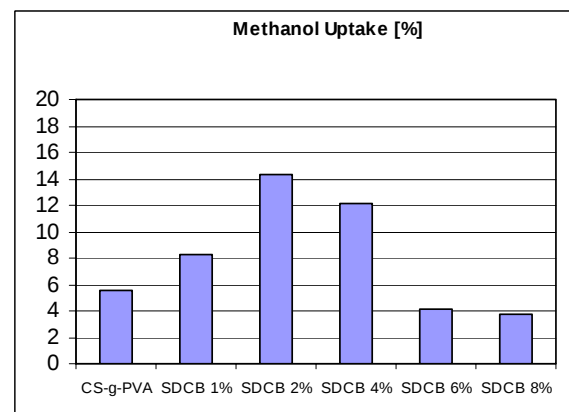
ภาพที่ 4.8

แสดงการเปรียบเทียบผลการดูดซึมน้ำ (ก) และเมทานอล (ข)

ของเมมเบรน CS-g-PVA และ CS-g-PVA+SDCB

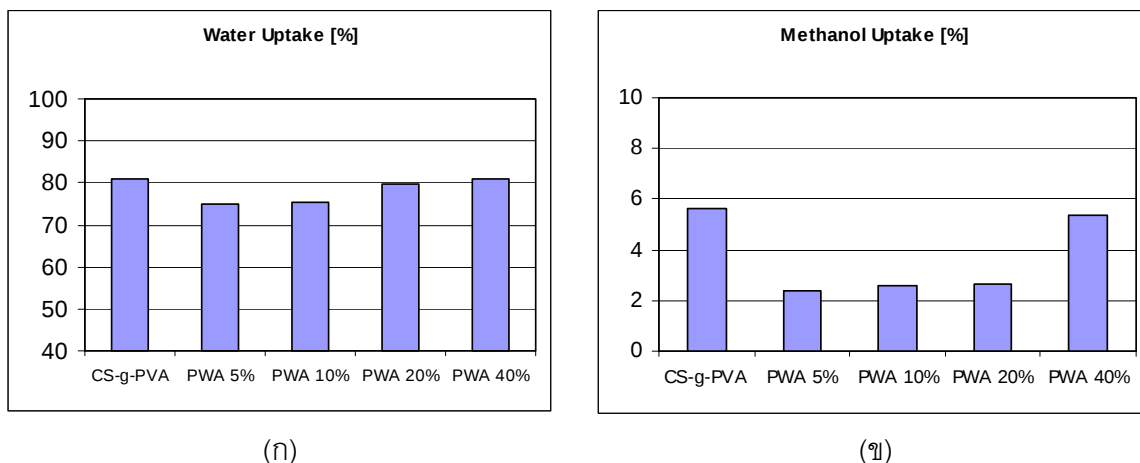


(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.9
แสดงการเปรียบเทียบผลการดูดซึมน้ำ (ก) และเมทานอล(ข)
ของเมมเบรน CS-g-PVA และ CS-g-PVA+PWA



เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำและเมทานอลพบว่า เมมเบรน CS-g-PVA สามารถดูดซึมน้ำได้ดีมาก คือ 77.8% และดูดซึมเมทานอลได้ต่ำคือ 5.6% เมื่อทำการเชื่อมขวางเมมเบรน CS-g-PVA แล้วมีผลทำให้โครงสร้างของเมมเบรนเคลื่อนไหวน้อยลง โมเลกุลของน้ำจึงเข้าไปในโครงสร้างได้น้อยลง ทำให้เมมเบรนดูดซึมน้ำได้น้อยลงด้วย แต่การเชื่อมขวางก็มีผลทำให้การดูดซึมเมทานอลมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยด้วย ส่วนเมมเบรน Nafion®117 นั้นมีการดูดซึมน้ำได้น้อยที่สุด แต่ดูดซึมเมทานอลได้มากถึง 85% ของน้ำหนักเดิม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่ดีของเมมเบรน Nafion®117

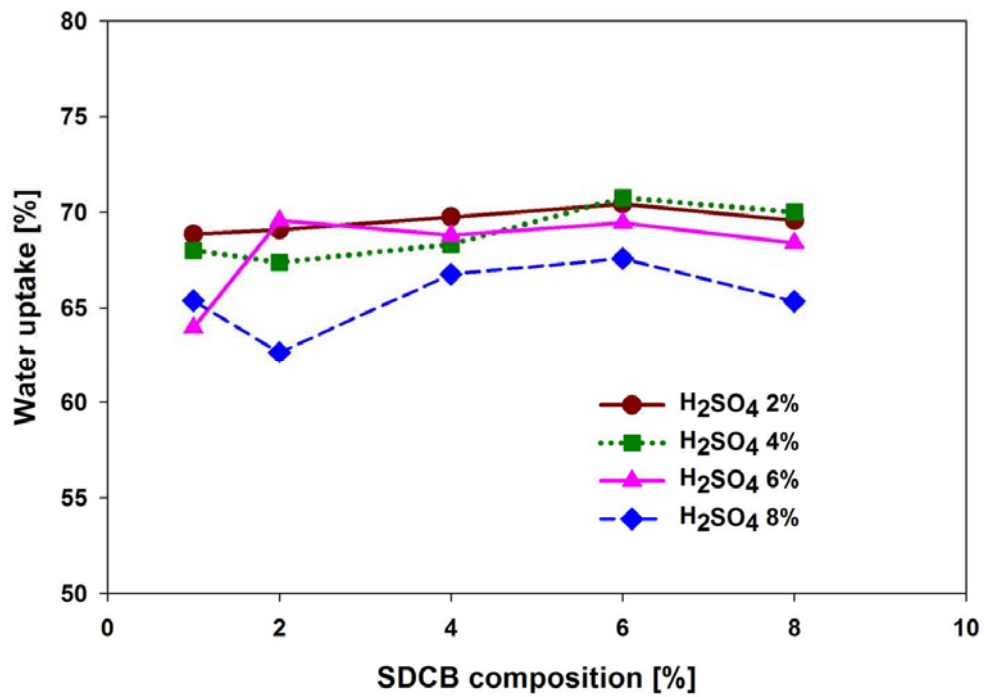
ส่วนเมมเบรน CS-g-PVA+SDCB ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น ส่วนการดูดซึมเมทานอลก็มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน อาจเนื่องมาจากเขม่าดำมีสมบัติในการลดการดูดซึมของสารโดยเฉพาะน้ำ มีผลให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปได้น้อย

เมื่อทำการเติม PWA ลงใน CS-g-PVA มีผลให้การดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ PWA 5% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ PWA มากขึ้น ก็ทำให้การดูดซึมน้ำดีขึ้น ซึ่งโดยปกติ PWA เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี แต่เมื่อทำการเติม PWA ลงในขั้นตอนการสังเคราะห์ CS-g-PVA โมเลกุลของ PWA ส่วนหนึ่งทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของไคโตซาน ทำให้โมเลกุลของไคโตซานที่จะทำปฏิกิริยากับโพลีไวนิลอะซิเตทลดลง ซึ่งทำให้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้หลังปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ลดลงด้วย ทำให้เมมเบรน CS-g-PVA with PWA ดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าเมมเบรน CS-g-PVA ปกติ ส่วนการดูดซึมเมทานอลนั้นโดยปกติ PWA มีสมบัติในการลดการดูดซึมเมทานอลของเมมเบรนลง จากงานวิจัย

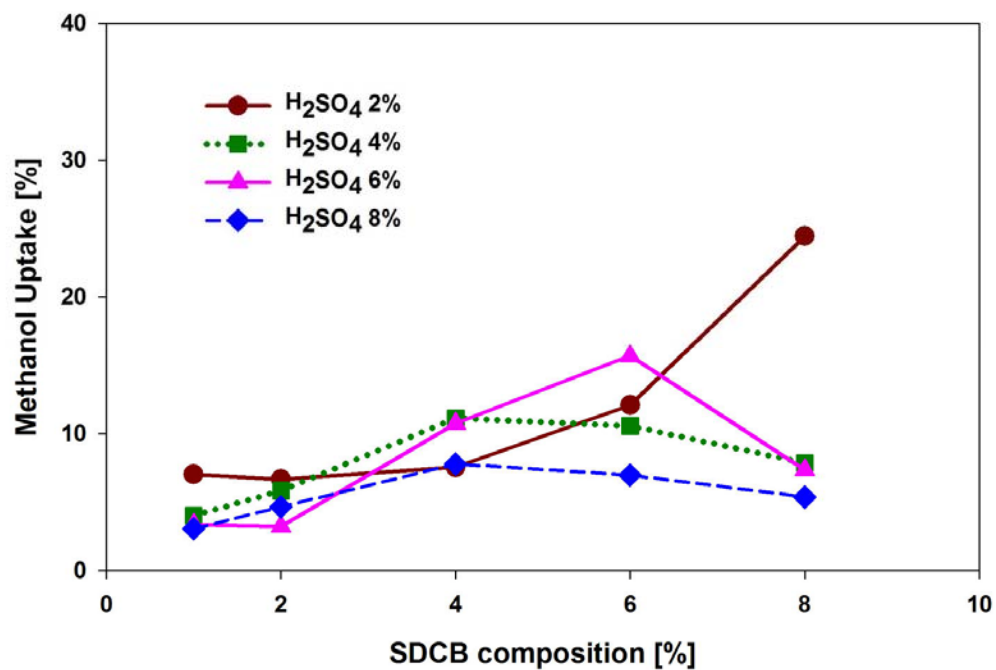
ของ Cui และคณะ (2007) ที่ใช้เมมเบรนผสมระหว่างไคโตซานและกรดฟอสโฟทังสติก พบว่าเมมเบรนมีค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลต่ำ คือ $3.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ แต่สำหรับผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกันอาจเป็นเพราะ โดยปกติไคโตซานมีสมบัติในการป้องกันเมทานอลที่ดีในระดับหนึ่ง และเมื่อใช้ร่วมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยกันเมทานอลได้ดี ก็จะทำให้เมมเบรน CS-g-PVA สามารถลดการดูดซึมเมทานอลได้ดีขึ้น แต่เมื่อทำการเติม PVA เข้าไป โดยต้องทำในขั้นตอนก่อนการสังเคราะห์ CS-g-PVA ทำให้โมเลกุลของไคโตซานและ PVA ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน และอาจเป็นผลมาจากการที่ใช้ไคโตซานชนิดมวลโมเลกุลสูงทำการทดลอง ปฏิกิริยาระหว่างสารทั้งสองจึงเกิดมากกว่าปกติ เมื่อโมเลกุลส่วนหนึ่งถูกใช้ไปทำให้สมบัติในการป้องกันเมทานอลลดลง จากนั้นเมื่อทำการต่อกิ่งไคโตซานด้วยโพลีไวนิลอะซิเตท ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ในภายหลัง ทำให้ประสิทธิภาพในการต่อกิ่งลดลงตามหัวข้อ 4.1 ดังนั้น PVA ที่มีสมบัติในการช่วยป้องกันเมทานอลในเมมเบรนจึงลดลง ส่งผลให้ค่าการดูดซึมเมทานอลของเมมเบรน CS-g-PVA+PVA สูงขึ้น ตามปริมาณ PVA ที่เพิ่มขึ้น

ภาพที่ 4.10

แสดงค่าการดูดซึมน้ำ (ก) และการดูดซึมเมทานอล (ข) ของเมมเบรน CS-g-PVA+SDCB+H₂SO₄ ที่ปริมาณ SDCB และความเข้มข้นของ H₂SO₄ ต่างๆ กัน



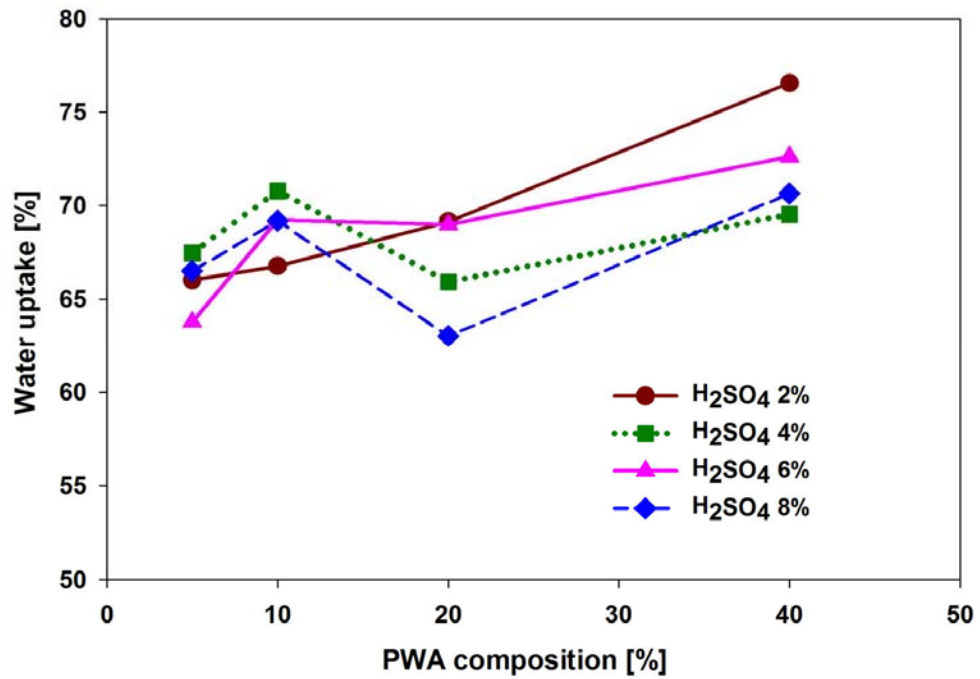
(ก)



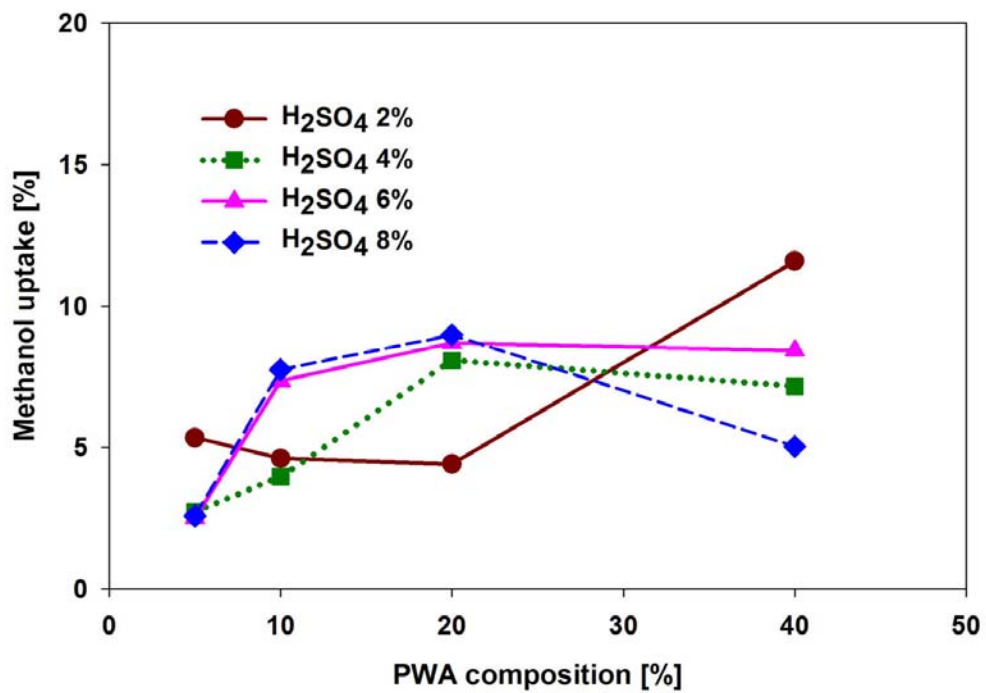
(ข)

ภาพที่ 4.11

แสดงค่าการดูดซึมน้ำ (ก) และการดูดซึมเมทานอล (ข) ของเมมเบรน CS-g-PVA+PWA+H₂SO₄ ที่ปริมาณ PWA และความเข้มข้นของ H₂SO₄ ต่างๆ กัน



(ก)



(ข)

เมื่อทำการเชื่อมขวางเมมเบรน และพิจารณาตามความเข้มข้นของ H_2SO_4 เป็นหลัก พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ H_2SO_4 มากขึ้น CS-g-PVA+SDCB+ H_2SO_4 ค่าการดูดซึมน้ำและเมทานอลมีแนวโน้มลดลง แต่การดูดซึมน้ำและเมทานอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ SDCB เพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้นของ H_2SO_4 เดียวกัน ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับ เมมเบรน CS-g-PVA+PWA + H_2SO_4 คือ การดูดซึมน้ำและเมทานอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PWA เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเชื่อมขวางด้วยกรดที่ความเข้มข้นเดียวกัน ซึ่งอาจพิจารณาได้ดังนี้ คือ เมื่อเติม filler เข้าไปในโครงสร้างของเมมเบรน จะทำให้เมมเบรนมีโครงสร้างแข็งขึ้น ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไป ดังจะเห็นได้จากการที่เมื่อเติม SDCB อย่างเดียว ทำให้สมบัติการดูดซึมน้ำและเมทานอลลดลง แต่สำหรับ PWA มีสมบัติในการอุ้มน้ำจึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณ PWA จึงอุ้มน้ำได้มากขึ้น แต่ก็มีผลต่อการดูดซึมเมทานอล ดังที่ได้อธิบายไปแล้ว แต่เมื่อทำการเชื่อมขวางไปด้วยทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเพิ่มขึ้น ผลคือเมมเบรนสามารถนำโปรตอนได้มากขึ้น แต่ค่าการนำโปรตอนนี้อาจจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดที่ใช้เชื่อมขวางอย่างเดียว ถ้าโครงสร้างของเมมเบรนมีความแข็งแรงและความหนาแน่นมาก ทำให้เกิดการเชื่อมขวางในเมมเบรนได้น้อย เมมเบรนจึงดูดซึมเมทานอลได้มากขึ้นด้วย

4.4 ผลการทดสอบการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน

4.4.1 การทดสอบการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรนโดยใช้ชุดเครื่องมือทดสอบ

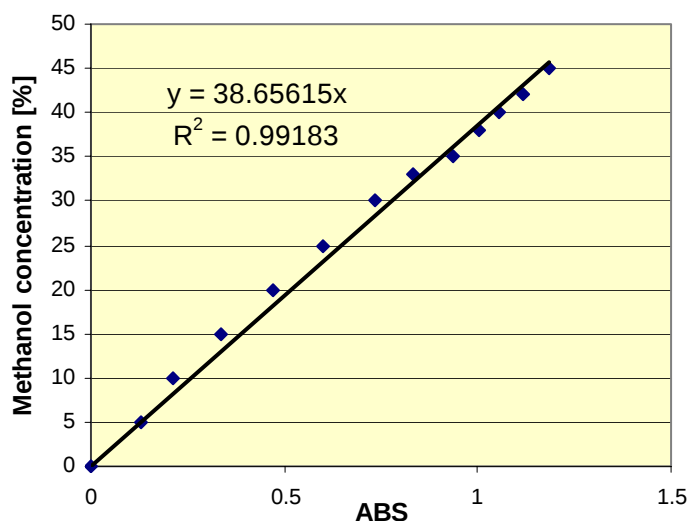
การทดสอบคุณสมบัติของเมมเบรนที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ การทดสอบการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน โดยใช้ชุดเครื่องมือที่ได้อธิบายในหัวข้อ 3.5.2 ทำการสุ่มตัวอย่างของสารละลายทุก 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนรังสียูวี ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 200 nm โดยจะนำค่าการดูดกลืนที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับใน Calibration curve ซึ่งเป็นตัวแปลงค่าการดูดกลืนไปเป็นค่าความเข้มข้นของเมทานอล มีหน่วยเป็น Absorbance หรือ ABS ความเข้มข้นของสารละลายเมทานอลที่จะนำมาใช้เป็น Calibration curve อยู่ระหว่าง 0 – 45% โดยปริมาตร

ค่าความเข้มข้นในเซลล์ของน้ำกลั่นและเซลล์ของสารละลายเมทานอลดูตัวอย่างได้จากภาพ 4.13 และ 4.14 โดยเป็นค่าการทดลองที่วัดได้จากเมมเบรน CS-g-PVA+PWA 5%+ H_2SO_4 2% ซึ่งความชันของกราฟในเวลาต่าง ๆ กันนั้น จะนำไปคำนวณหาค่าการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน โดยที่เมมเบรนแต่ละตัวจะมีค่าการแพร่ผ่านไม่เท่ากัน และค่าการนำโปรตอนก็ไม่เท่ากันด้วย จากหัวข้อ 4.2 ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนที่ถูกเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้เซมาดำ

และ PWA ให้ค่าที่สูงกว่าเมมเบรน CS-g-PVA ดังนั้นจึงสนใจนำค่าการนำโปรตอนมาเปรียบเทียบกับค่าการแพร่ผ่านของเมทานอล สัดส่วนของค่าทั้งสองนี้เรียกว่า Selectivity

ภาพที่ 4.12

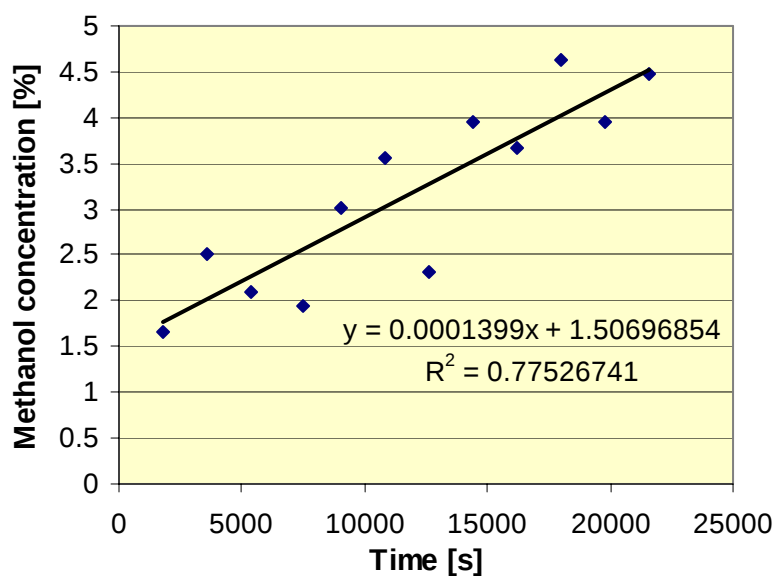
Calibration curve ของความเข้มข้นของสารละลายเมทานอลกับค่าการดูดกลืนรังสียูวี



ภาพที่ 4.13

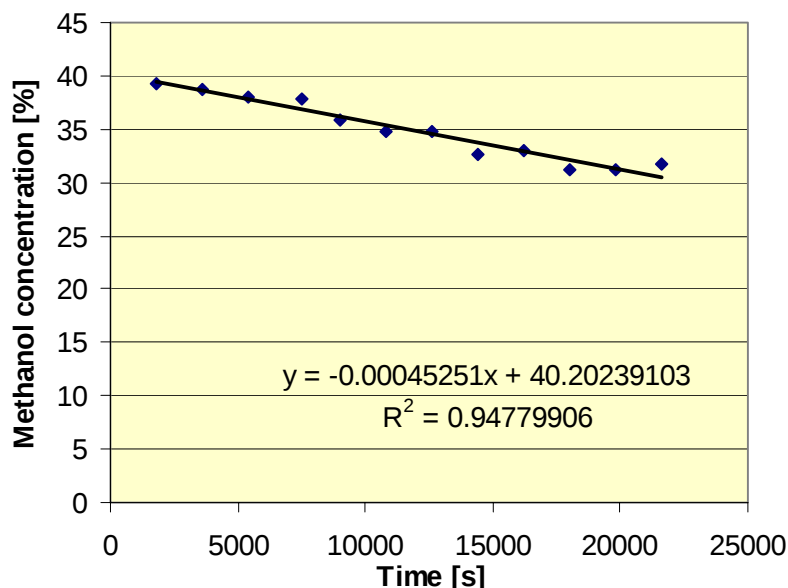
ตัวอย่างกราฟความเข้มข้นของสารละลายเมทานอลในเซลล์น้ำกลั่นที่เพิ่มขึ้น

ณ เวลาต่างๆ เมื่อใช้เมมเบรน CS-g-PVA+PWA 5%+H₂SO₄ 2%



ภาพที่ 4.14

ตัวอย่างกราฟความเข้มข้นของสารละลายเมทานอลในเซลล์ที่ลดลง
ณ เวลาต่างๆ เมื่อใช้เมมเบรน CS-g-PVA+PWA 5%+H₂SO₄ 2%



จากภาพความเข้มข้นของน้ำกลั่นที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจากการแพร่ของสารละลายเมทานอลผ่านเมมเบรนที่คั่นกลางระหว่างสารทั้งสองชนิดที่เวลาต่างๆ จะได้ค่าความชันของกราฟในเซลล์น้ำกลั่นเป็น k_B และในเซลล์ของสารละลายเมทานอลเป็น k_A จากนั้นนำค่าความชันทั้งสองมาคำนวณหาค่าการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรนได้ดังสมการ

ที่เซลล์น้ำกลั่น

$$P = \frac{k_B \times V_B \times L}{A \times (C_A - C_B)} \quad \text{.....(4.1)}$$

ที่เซลล์สารละลายเมทานอล

$$P = -\frac{k_A \times V_A \times L}{A \times (C_A - C_B)} \quad \text{.....(4.2)}$$

ค่าของตัวแปรต่างๆ ของเมมเบรน CS-g-PVA+PWA 5%+H₂SO₄ 2% มีค่าดังนี้

$$K_A = 4.525 \times 10^{-4}$$

$$K_B = 1.399 \times 10^{-4}$$

$$V_A = 400 \text{ cm}^3$$

$$V_B = 400 \text{ cm}^3$$

$$L = 0.0361 \text{ cm}$$

$$A = 4 \text{ cm}^2$$

$$C_A - C_B = 40 - 0 = 40\% \text{ โดยปริมาตร}$$

เมื่อคำนวณค่าการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน ที่เซลล์น้ำกลั่นจะได้ $1.263 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ และที่เซลล์ของสารละลายเมทานอลจะได้ $4.084 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ซึ่งเป็นค่าการแพร่ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการทดลองอื่นๆ โดยงานวิจัยของ Cui และคณะ (2007) ที่ทดลองการแพร่ผ่านของเมทานอลความเข้มข้น 2 M ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เมมเบรนผสมระหว่างไคโตซานและ PWA พบว่ามีค่าการแพร่ผ่านประมาณ $3.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่าที่ทำการทดลองได้ และไม่สอดคล้องกับค่าการดูดซึมเมทานอลของเมมเบรน CS-g-PVA+PWA 5%+H₂SO₄ 2% ตามผลการทดลองหัวข้อ 4.3 ที่มีค่าต่ำเพียง 5.3% และเมื่อพิจารณาที่เซลล์ของน้ำกลั่นจะเห็นว่าค่า R² มีค่าต่ำ นั่นคือข้อมูลที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถือต่ำ และมีความแปรปรวนของข้อมูลมาก สาเหตุอาจเนื่องมาจากการวัดด้วยวิธีการดูดกลืนรังสียูวีของเครื่อง UV Vis Spectroscopy มีประสิทธิภาพต่ำในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารละลายเมทานอลมีค่าต่ำมากๆ เพราะการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรนมีค่าต่ำมากนั่นเอง ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมเมื่อสารละลายเมทานอลมีความเข้มข้นต่ำมากๆ และหากพิจารณาที่เซลล์สารละลายเมทานอลพบว่าความเข้มข้นของเมทานอลลดลงมาก อาจเป็นเพราะในการทดลองไม่ใช้ระบบปิดโดยสมบูรณ์ทำให้เมทานอลระเหยไปได้ ซึ่งอัตราการระเหยอาจมากกว่าอัตราการแพร่ผ่านเมมเบรน โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองเมมเบรน CS-g-PVA ประเภทต่างๆ มีค่าการแพร่ผ่านของเมทานอลต่ำกว่าเมมเบรน Nafion®117 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลองการดูดซึมเมทานอลของเมมเบรน ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการวัดการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรนโดยวิธีใหม่ และค่าที่วัดได้ควรจะสัมพันธ์กับค่าการดูดซึมเมทานอลของเมมเบรนตามหัวข้อ 4.3 ด้วย

4.4.2 การวัดการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรนด้วยวิธีการดูดซึม

จากผลการทดสอบจลนพลศาสตร์ของการแพร่ของน้ำและเมทานอล ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณน้ำหรือเมทานอลที่เพิ่มขึ้นในเมมเบรน ณ เวลาใดๆ เมื่อพิจารณาอัตราการแพร่ของสารในช่วงเริ่มต้น (ช่วงที่มีค่าความชัน) จะสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการแพร่ของน้ำและเมทานอลผ่านเมมเบรนได้จากสมการ

$$\frac{Q_t}{Q_\infty} = 4 \left[\frac{D_{ab} t}{\pi h^2} \right]^{1/2} \quad \text{.....(4.3)}$$

หรือ

$$D_{ab} = \pi \left[\frac{h\Theta}{4Q_\infty} \right]^2 \quad \text{.....(4.4)}$$

เมื่อ D_{ab} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลวในเมมเบรน [cm^2/s]

Q_∞ คือน้ำหนักของของเหลวในเมมเบรนอิ่มตัว [g]

Q_t คือน้ำหนักของของเหลวในเมมเบรนที่เวลาต่างๆ [g]

h คือความหนาของเมมเบรน [cm]

Θ คือความชันของกราฟระหว่าง Q_t กับ $t^{1/2}$ [$\text{g/s}^{1/2}$]

โดยที่ค่าการดูดซึมน้ำและเมทานอล (S) และค่าการแพร่ผ่านของน้ำและเมทานอลหาได้จาก

$$S = \frac{M_\infty}{M_0} \quad \text{.....(4.5)}$$

เมื่อ M_∞ คือน้ำหนักของสารในเมมเบรนที่อิ่มตัว [g]

M_0 คือน้ำหนักของเมมเบรนเริ่มต้น [g]

และ

$$P = D_{ab} \times S \quad \text{.....(4.6)}$$

โดยเมมเบรนที่เลือกมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{ab}) ค่าการดูดซึม (S) และค่าการแพร่ผ่าน (P) ของน้ำและเมทานอลของเมมเบรน ประกอบด้วย เมมเบรน CS-g-PVA, เมมเบรน CS-g-PVA+SDCB ที่มีค่าการนำโปรตอนสูงที่สุด 5 อันดับแรก (SDCB 6%+ H_2SO_4 6%, SDCB 4%+ H_2SO_4 4%, SDCB 4%+ H_2SO_4 6%, SDCB 8%+ H_2SO_4 4%, SDCB 2%+ H_2SO_4 8%), เมมเบรน CS-g-PVA+PWA ที่มีค่าการนำโปรตอนสูงที่สุด 5 อันดับแรก (PWA 5%+ H_2SO_4 2%, PWA 5%+ H_2SO_4 8%, PWA 5%+ H_2SO_4 6%, PWA 5%+ H_2SO_4 4%, PWA 10%+ H_2SO_4 2%), และเมมเบรน Nafion®117 เพื่อทำการเปรียบเทียบหาค่า Selectivity หรืออัตราส่วนระหว่างค่าการนำโปรตอนกับค่าการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน ว่าเมมเบรนชนิดใดมีประสิทธิภาพมากที่สุด จากการคำนวณ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{ab}) ค่าการดูดซึม (S) และค่าการซึมผ่าน (P) ของน้ำและเมทานอลของเมมเบรน จะแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4

แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{ab}) ค่าการดูดซึม (S) และค่าการแพร่ผ่าน (P)
ของน้ำและเมทานอลของเมมเบรน

เมมเบรน	เมทานอล			น้ำ		
	$D_{ab} \times 10^6$ [cm ² /s]	S [-]	$P \times 10^7$ [cm ² /s]	$D_{ab} \times 10^6$ [cm ² /s]	S [-]	$P \times 10^6$ [cm ² /s]
CS-g-PVA	3.40	0.056	1.905	11.24	0.778	8.742
SDCB 6% +H ₂ SO ₄ 6%	6.167	0.157	9.668	25.28	0.694	17.56
SDCB 4% +H ₂ SO ₄ 4%	3.770	0.111	4.189	8.836	0.683	6.037
SDCB 4% +H ₂ SO ₄ 6%	1.470	0.107	1.578	6.048	0.688	4.160
SDCB 8% +H ₂ SO ₄ 4%	9.070	0.079	7.128	16.78	0.700	11.75
SDCB 2% +H ₂ SO ₄ 8%	5.112	0.046	2.376	11.35	0.627	7.114
PWA 5% +H ₂ SO ₄ 2%	6.222	0.053	3.322	15.90	0.660	10.49
PWA 5% +H ₂ SO ₄ 8%	16.85	0.027	4.540	12.24	0.665	8.142
PWA 5% +H ₂ SO ₄ 6%	4.351	0.025	1.094	3.632	0.638	2.316
PWA 5% +H ₂ SO ₄ 4%	7.277	0.027	1.976	6.795	0.649	4.407
PWA 10% +H ₂ SO ₄ 2%	6.594	0.046	3.038	9.701	0.668	6.477
Nafion®117	5.259	0.851	44.73	7.084	0.176	1.245

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่า D_{ab} ค่า S และค่า P ของน้ำและเมทานอลของเมมเบรน เมื่อพิจารณาค่าการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน พบว่า PWA 5%+H₂SO₄ 6% มีค่าการแพร่ผ่านต่ำที่สุดคือ $1.094 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ และเมมเบรน Nafion®117 มีค่าการแพร่ผ่านสูงที่สุด คือ $4.473 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ซึ่งค่านี้จะคำนวณค่า D_{ab} ซึ่งหาได้จากกราฟการดูดซึมเมทานอลที่เวลาต่างๆ ที่แสดงในภาคผนวก ค เมื่อคำนวณหาค่าการแพร่ของเมทานอลได้แล้วจะนำมาคำนวณหาค่า selectivity หรือหรืออัตราส่วนระหว่างการนำโปรตอนและการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรน (C/P ratio) ซึ่งจะแสดงถึงประสิทธิภาพของเมมเบรนว่ามีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้เมทานอลโดยตรงมากน้อยเพียงใด การคำนวณหา selectivity เป็นไปดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5

แสดงการเปรียบเทียบค่า Proton Conductivity, Methanol Permeability และ Selectivity ของเมมเบรนแต่ละชนิด

เมมเบรน	Proton Conductivity [mS/cm]	Methanol Permeability $\times 10^7 \text{ [cm}^2/\text{s]}$	Selectivity $\times 10^{-6} \text{ [mS/cm}^3 \cdot \text{s]}$
CS-g-PVA	0.258	1.905	1.356
SDCB 6%+H ₂ SO ₄ 6%	9.640	9.668	9.971
SDCB 4%+H ₂ SO ₄ 4%	9.405	4.189	22.46
SDCB 4%+H ₂ SO ₄ 6%	9.352	1.578	59.27
SDCB 8%+H ₂ SO ₄ 4%	9.137	7.128	12.82
SDCB 2%+H ₂ SO ₄ 8%	8.866	2.376	37.32
PWA 5%+H ₂ SO ₄ 2%	15.02	3.322	45.22
PWA 5%+H ₂ SO ₄ 8%	12.94	4.540	28.50
PWA 5%+H ₂ SO ₄ 6%	10.60	1.094	96.87
PWA 5%+H ₂ SO ₄ 4%	9.525	1.976	48.20
PWA 10%+H ₂ SO ₄ 2%	9.353	3.038	30.78
Nafion®117	14.92	44.73	3.335

จากตารางจะเห็นว่า ค่า selectivity ของเมมเบรน PWA 5%+H₂SO₄ 6% มีค่าสูงที่สุดคือ $9.687 \times 10^7 \text{ mS/cm}^3 \cdot \text{s}$ แม้ว่าจะไม่ใช่เมมเบรนชนิดที่มีค่าการนำโปรตอนสูงที่สุดก็ตาม แต่เมื่อคิดเป็นสัดส่วนเทียบกับค่าการแพร่ของเมทานอลผ่านเมมเบรนที่มีค่าน้อยที่สุด จึงทำให้มีสัดส่วนระหว่างค่าสองค่าดีที่สุดนั่นเอง ซึ่งการพิจารณาค่า selectivity จะแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิดใดมีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุด ส่วนเมมเบรน Nafion®117 แม้ว่าจะมีค่าการนำโปรตอนที่สูงมาก แต่ก็มีค่าการแพร่ของเมทานอลสูงที่สุดด้วย คือ $1.406 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ทำให้ค่า selectivity ที่ได้คือ $3.335 \times 10^6 \text{ mS/cm}^3 \cdot \text{s}$ ดีกว่าเมมเบรน CS-g-PVA เพียง 2.5 เท่า แม้ว่าจะมีค่าการนำโปรตอนสูงกว่าถึง 57 เท่าก็ตาม