

การเตรียมและลักษณะสมบัติของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจากพอลิสไตรีนคอมโพสิต



นางสาวกัณตสุดา เวชรัักษ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2914-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF POLYSTYRENE COMPOSITE
BASED PROTON EXCHANGE MEMBRANE



KANTASUDA VEJRAK

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005


ISBN 974-53-2914-2

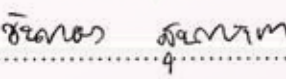
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและลักษณะสมบัติของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจากพอลิสไตรีนคอมโพสิต
โดย	นางสาวกัญตสุตา เวชรักษ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เพียรพรค ทศคร)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล คงคาอุยฉาย)

กัณฑ์สุดา เวชร์ภักษ์: การเตรียมและลักษณะสมบัติของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจาก พอลิสไตรีนคอมโพสิต. (PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF POLYSTYRENE COMPOSITE BASED PROTON EXCHANGE MEMBRANE) อ. ที่ปรึกษา รศ. ดร. ชันทอง สุนทรภาา, อ. ที่ปรึกษาร่วม รศ. ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ 123 หน้า. ISBN 974-53-2914-2.

งานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนที่มีการปรับปรุงสมบัติในด้านต่างๆ ได้แก่ การเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน การทำซัลโฟเนชัน การเติมเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์และ ลิเทียมแอสซีเทต จากการศึกษาสมบัติของเยื่อแผ่น ได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง ค่าความสามารถ การซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และค่าการนำโปรตอน ของเยื่อแผ่น พบว่า เยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนที่มีการเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% ที่ ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายพอลิเมอร์ 3% เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าความ ต้านแรงดึง ค่าความสามารถการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยน ไอออน และค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่น เท่ากับ 10.3 ± 1.3 เมกะปาสกาล, 565 ± 67 แบริเวอร์, 5.7 ± 0.2 มิลลิลิตร/กรัม และ $2.4 \times 10^{-2} \pm 1.1 \times 10^{-3}$ ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ แต่เยื่อแผ่นนี้ ยังคงมีสมบัติด้อยกว่าของเยื่อแผ่นเชิงพาณิชย์ Nafion[®] 117 อยู่มาก

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อผู้พิมพ์.....กัณฑ์สุดา เวชร์ภักษ์.....
สาขาวิชา เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ชันทอง สุนทรภาา.....
ปีการศึกษา 2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์.....

4572212123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: POLYSTYRENE / PROTON EXCHANGE MEMBRANE / COMPOSITE MEMBRANE / PROTON CONDUCTIVITY

KANTASUDA VEJRAK: PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF POLYSTYRENE COMPOSITE BASED PROTON EXCHANGE MEMBRANE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. KHANTONG SOONTARAPA, THESIS COADVISOR: ASSOC. PROF. VIMOLVAN PIMPAN, 123 pp. ISBN 974-53-2914-2.

Various modification of polystyrene membranes were studied, i.e; crosslinking with divinyl benzene, sulfonation, complexation with lithium hydroxide and lithium acetate. The membranes were characterized for tensile strength, hydrogen permeability, ion exchange capacity and proton conductivity. The optimum membrane was 7% crosslinked of 3% PSSA membrane prepared by sulfonation to 3% polymer crosslinking with 7% divinyl benzene. Its properties were 10.3 ± 1.3 MPa, 565 ± 67 Barrer, 5.7 ± 0.2 meq/g and $2.4 \times 10^{-2} \pm 1.1 \times 10^{-3}$ S/cm respectively. However, they were still much worse than those of the commercial Nafion[®]117 membrane.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology.....Student's signature... *Kantasuda Vejra*
Field of study Chemical Technology... Advisor's signature... *Khantong Soontarapa*
Academic year 2005.....Co-advisor's signature... *Vimolvan Pimpan*

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำ แนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	3
2.2 เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน.....	10
2.3 พอลิโพรไพลีน.....	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
3. วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	15
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	16
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	18
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	
4.1 โครงสร้างทางเคมี.....	32
4.2 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม.....	33
4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	34
4.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา.....	37
4.5 ความทนแรงดึง.....	43
4.6 อุณหภูมิการสลายตัว.....	48
4.7 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	51
4.8 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน.....	58
4.9 ค่าการนำโปรตอน.....	63
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลจากผลการทดลอง.....	76
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงระบบไฮโดรเจน-ออกซิเจน.....	9
ตารางที่ 2.2 ลักษณะและสมบัติต่างๆ ของพอลิสไตรีน.....	12
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติการสลายตัวของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง.....	50
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติการสลายตัวของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง ด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%.....	50



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง.....	4
รูปที่ 3.1 ปฏิริยาซัลฟอนเนชัน.....	20
รูปที่ 3.2 ปฏิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม.....	21
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนชนิดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน.....	22
รูปที่ 3.4 ปฏิริยาการเชื่อมขวางพอลิสไตรีนด้วยไดไวนิลเบนซีน.....	23
รูปที่ 3.5 ปฏิริยาซัลฟอนเนชันของพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง.....	24
รูปที่ 3.6 ปฏิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียมของพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง.....	25
รูปที่ 3.7 เครื่อง Universal testing LLOYD Instruments LR 5K.....	27
รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส.....	28
รูปที่ 3.9 การวัดค่าการนำโปรตอนด้วยวิธี Four probe.....	31
รูปที่ 4.1 FTIR spectra ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง.....	32
รูปที่ 4.2 FTIR spectra ของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีน a) แบบไม่เชื่อมขวาง b) แบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7%.....	33
รูปที่ 4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางที่เติมลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	34
รูปที่ 4.4 ภาควัดความชื้นของเยื่อแผ่น (a) เยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง (b) เยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% (c) เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง (d) เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% (e) เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวางและคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์ (f) เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	36

รูปที่ 4.5	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิस्टไทรินไม่มีการเชื่อมขวางความหนา 20 ไมครอน และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	39
รูปที่ 4.6	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิस्टไทรินไม่มีการเชื่อมขวางความหนา 30 ไมครอน และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	40
รูปที่ 4.7	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิस्टไทรินเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	41
รูปที่ 4.8	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิस्टไทรินเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	42
รูปที่ 4.9	ความสามารถทนต่อแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิस्टไทรินไม่เชื่อมขวางและคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	45
รูปที่ 4.10	ความสามารถทนต่อแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิस्टไทรินเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	46
รูปที่ 4.11	ความสามารถทนต่อแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิस्टไทรินเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	47
รูปที่ 4.12	ตัวอย่างกราฟอุณหภูมิการสลายตัวของเยื่อแผ่น (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	49
รูปที่ 4.13	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิस्टไทรินไม่เชื่อมขวางความหนา 20 ไมโครเมตร และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	54
รูปที่ 4.14	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิस्टไทรินไม่เชื่อมขวางความหนา 30 ไมโครเมตร และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์.....	55

รูปที่ 4.15	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	56
รูปที่ 4.16	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	57
รูปที่ 4.17	ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางและคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	60
รูปที่ 4.18	ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	61
รูปที่ 4.19	ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	62
รูปที่ 4.20	ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางและคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	65
รูปที่ 4.21	ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	66
รูปที่ 4.22	ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์.....	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและการประหยัดพลังงานในปัจจุบัน ทำให้มีการคิดค้นหาวิธีในการใช้พลังงานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และรักษาสีสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป หรือหาแหล่งพลังงานใหม่ทดแทน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ทำให้เกิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงกับงานต่างๆ มากขึ้น นอกจากนี้สำหรับเมืองที่มีการจราจรติดขัดได้มีการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ขับเคลื่อนรถยนต์ ซึ่งนับได้ว่าเป็นทางออกที่ดีในการช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศได้ พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สะอาดและสะดวกต่อการนำมาใช้งาน โดยผลิตได้จากพลังงานความร้อนและพลังงานนิวเคลียร์ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบธรรมดาจะเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไปเป็นกระแสไฟฟ้า ทำให้มีการสูญเสียพลังงาน แต่ในกรณีเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรง ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูง และสูญเสียพลังงานน้อยกว่า เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายประเภท โดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงประเภทเดียวที่นำมาใช้ในรถยนต์

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำพอลิสไตรีนซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถผลิตได้ในประเทศมาทำเป็นเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง แต่โครงสร้างของพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชัน จึงทำให้มีสภาพนาโปรตอน และค่าการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ แนวความคิดการปรับปรุงสมบัติการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนในงานวิจัยนี้ คือ การเติมหมู่ซัลโฟนิก ($-SO_3H$) และสารประกอบลิเทียม เมื่อพอลิสไตรีนทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชันจะได้ไอออนเมอร์ (ionomer) ที่มีประจุเป็นลบ ซึ่งสามารถสร้างพันธะกับโปรตอนที่มีประจุบวกได้ดี ทั้งนี้คาดว่าค่าการแลกเปลี่ยนตำแหน่งการสร้างพันธะกับสายโซ่พอลิเมอร์ของโปรตอนกับลิเทียมไอออนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เตรียมเยื่อแผ่นพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเพื่อนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
2. ศึกษาลักษณะสมบัติของเยื่อแผ่นพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเตรียมเยื่อแผ่น ดังต่อไปนี้
 - ก) ผลของความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์ใช้ขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นที่ร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก
 - ข) ผลของการทำซัลฟอนเนชันจากอนุภาคพอลิโพรพิลีนขนาด 150 หรือ 250 ไมครอน
 - ค) ผลของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารละลายเกลือลิเทียมแอสเทต หรือ ลิเทียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10, 25 หรือ 50 โดยน้ำหนัก
 - ง) ผลของการเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 4 หรือ 7 โดยน้ำหนัก
2. วิเคราะห์สมบัติของเยื่อแผ่น ดังนี้
 - ก) สมบัติกายภาพ ได้แก่ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา ลักษณะพื้นฐานของเยื่อแผ่น และความสามารถทนต่อแรงดึง
 - ข) สมบัติเคมี ได้แก่ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Microscopy
 - ค) สมบัติทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิการสลายตัวด้วย Thermogravimetric analyzer
 - ง) สมบัติการนำไอออน ได้แก่ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ค่าการนำโปรตอน
 - จ) ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนชนิดใหม่เพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัสดุภายในประเทศ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

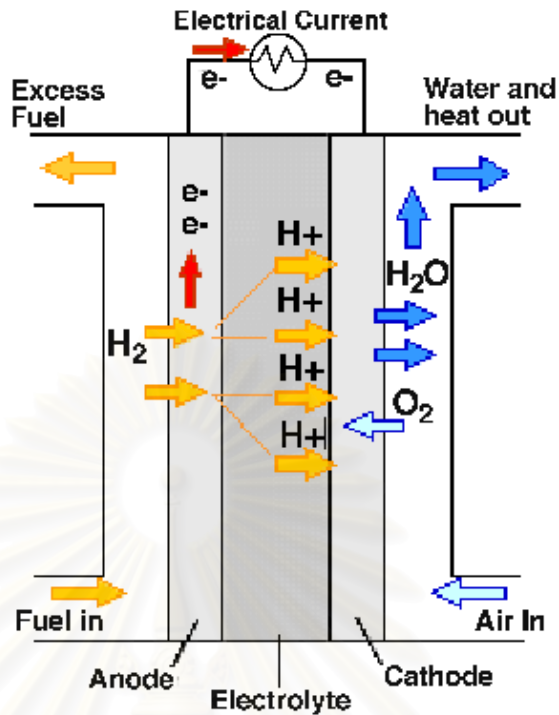
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง [1]

เซลล์เชื้อเพลิง คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ (Battery) ในลักษณะที่ว่า เซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่อีกอย่างหนึ่งคือ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตเป็นหน่วยเล็กๆ แล้วสามารถนำมาต่อเข้าด้วยกัน ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะที่แตกต่างกับแบตเตอรี่ตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือแก๊สเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ในเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ถูกใช้หมดไป เซลล์เชื้อเพลิงนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่ล้ำหน้าทันสมัย ด้วยเหตุผลง่าย ๆ 3 ประการ คือ “ประสิทธิภาพสูง สะอาด เงียบ”

เซลล์เชื้อเพลิงไม่ก่อให้เกิดสารพิษต่างๆ ผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ น้ำ (H_2O) แก๊สที่ปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีปริมาณของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ต่ำกว่าระดับมาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษ

2.1.1 ทฤษฎีเซลล์เชื้อเพลิง [2, 3]

ในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่มีความพรุน 2 ขั้ว (แอโนดและแคโทด) กลุ่มหรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเหลวและ/หรือของแข็ง โดยที่แก๊สเชื้อเพลิงซึ่งได้แก่ แก๊สธรรมชาติหรือไฮโดรเจนถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแอโนด (Anode) ในขณะที่ตัวออกซิไดซ์ (Oxidant) ถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแคโทด (Cathode) แก๊สไฮโดรเจนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยจะมีการให้หรือปล่อยอิเล็กตรอน (Electron) ที่ขั้วแอโนด ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของแก๊สออกซิไดซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง [3]

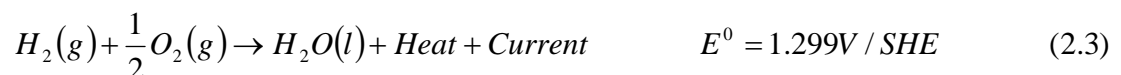
โดยมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นหลักๆ สองปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด และขั้วแอโนดที่แอโนด



และที่แคโทด



เมื่อรวมสมการทั้งสอง จะได้



โดยที่ E^0 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน

และ SHE คือ ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน (Standard hydrogen electrode)

การเคลื่อนที่ของไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด ทำให้เกิดพลังงานขึ้น ไฮโดรเจนไอออนเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ในลักษณะติดไปกับโมเลกุลน้ำหรือโดยการถ่ายโอนจากโมเลกุลน้ำหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง แต่ไม่ว่าการถ่ายโอนของไฮโดรเจนไอออนจะโดยวิธีใดก็ตามต่างขึ้นกับความหนาของเยื่อแผ่น ปริมาณน้ำในเยื่อแผ่น และจำนวนของไอออนที่เคลื่อนที่

สำหรับอิเล็กตรอน ขอบที่จะวิ่งผ่านวัสดุซึ่งอิเล็กตรอนถูกจับไว้อย่างหลวมๆ (วัสดุนำไฟฟ้า) อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาบนขั้วแอโนดผ่าน ส่วนการกระจายแก๊ส (Gas diffusion section) ของอิเล็กโทรดออกสู่วงจรรายนอกทาง Anode current collector ไปยัง Cathode current collector ผ่านส่วนกระจายแก๊สของขั้วแคโทดไปยังตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาของขั้วแคโทด อิเล็กตรอนจะไม่เคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์เพราะว่าสายโซ่กรดในอิเล็กโทรไลต์จะยึดติดกับอิเล็กตรอนอย่างแข็งแรง กลายเป็นฉนวนไฟฟ้า หลักการอื่นๆ ในการเลือกอิเล็กโทรไลต์ คือ ความมีเสถียรทางโครงสร้าง (Structural stability) การมีความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของไอออนน้อย และมีรูปทรงต่ำ

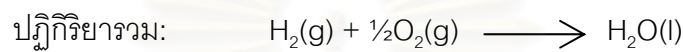
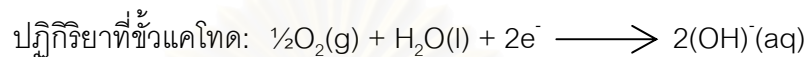
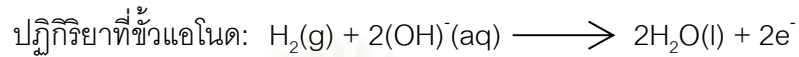
2.1.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง [4]

มีการรายงานปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงครั้งแรกโดยศาสตราจารย์คริสเตียนเฟรเดอริก เซอนบาย (Christian Friedrich Schoenbein) ในปี ค.ศ. 1839 ว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยใช้กรดซัลฟิวริก และลวดแพลทินัม เซอร์วิลเลียม โกรว์ฟ (Sir William Grove) ได้รายงานในอีก 1 เดือนถัดมาถึงแบตเตอรี่ที่ใช้แพลทินัมและสังกะสี เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งถือว่าเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเครื่องแรกของโลก หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาขึ้นมาอย่างรวดเร็วอีกครั้งในกลางศตวรรษที่ 20 เซลล์เชื้อเพลิงจำแนกออกได้หลายระบบ ขึ้นอยู่กับอิเล็กโทรไลต์ โดยวิธีจำแนกประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงที่ง่ายที่สุด คือ การจัดแบ่งตามประเภทของสารอิเล็กโทรไลต์ การจัดแบ่งแบบนี้สามารถแบ่งเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ คือ

I. เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cells, AFC)

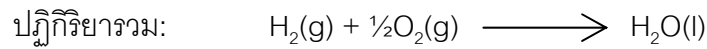
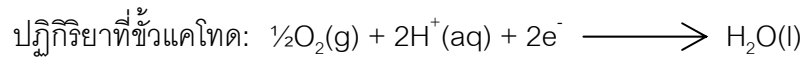
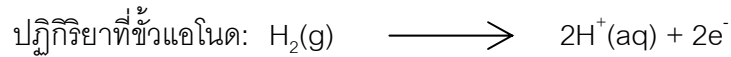
เซลล์เชื้อเพลิงนี้ได้ถูกใช้มาเป็นเวลานานแล้วในอดีต โดยองค์การนาซ่า เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้มีประสิทธิภาพการผลิตพลังงานได้สูงถึง 70% อุณหภูมิการทำงาน

คือ 150-200 องศาเซลเซียส เชื้อเพลิงประเภทนี้ใช้สารละลายของแอลคาไลน์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (alkaline potassium hydroxide) เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีข้อดี เพราะปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดจะเกิดเร็วขึ้นในสารอิเล็กโทรไลต์แอลคาไลน์ นั้นหมายถึง สมรรถนะที่สูงขึ้น โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้จะให้กำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 300 วัตต์จนถึง 5 กิโลวัตต์



II. เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งหรือแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Solid polymer fuel cells, SPFC or Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)

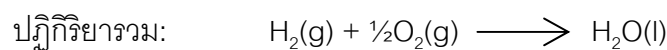
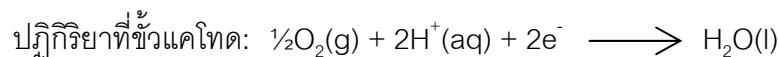
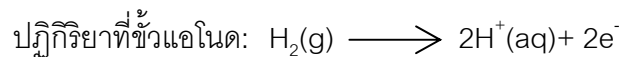
เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 80 องศาเซลเซียส) ให้ ความหนาแน่นของกำลังงาน (power density) สูง มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานใน ระบบที่ต้องการการเดินเครื่องอย่างรวดเร็ว เช่น การใช้ในรถยนต์ และมีศักยภาพนำไปใช้ แทนแบตเตอรี่ เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นแผ่นพลาสติกบางๆ ที่ให้ไอออนไฮโดรเจน ผ่านได้ เยื่อแผ่นจะถูกฉาบทั้งสองด้านด้วยอนุภาคของโลหะผสมที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (โดยมากเป็นแพลทินัม) เยื่อแผ่นอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ คือ พอลิเพอร์ฟลูออโรซัลฟอนิกแอซิด (poly-perfluorosulfonic acid) การใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งมีข้อดี คือ มีปัญหาในการ จัดการและการกัดกร่อนน้อยลง โดยแก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วแอโนดของเซลล์ เชื้อเพลิง ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ไฮโดรเจนอะตอมปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และ กลายเป็นไฮโดรเจนไอออน (โปรตอน) อิเล็กตรอนจะถูกดึงไปใช้ในรูปของกระแสไฟฟ้าก่อน ถึงขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นบริเวณที่ออกซิเจนถูกเติมเข้ามา ในขณะเดียวกัน โปรตอนก็จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่น (อิเล็กโทรไลต์) ไปสู่ขั้วแคโทด ซึ่งมีการรวมตัวของอะตอม ไฮโดรเจน และทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้น้ำ อย่างไรก็ตาม เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีความไว ต่อความไม่บริสุทธิ์ของเชื้อเพลิง กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้โดยทั่วไปอยู่ ในช่วงตั้งแต่ 50-250 กิโลวัตต์



III. เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดฟอสฟอริก

(Phosphoric acid fuel cell, PAFC)

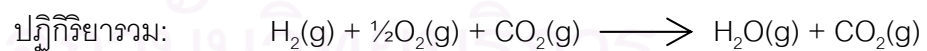
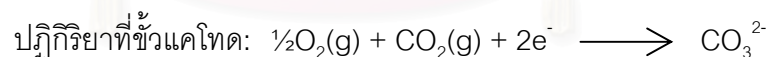
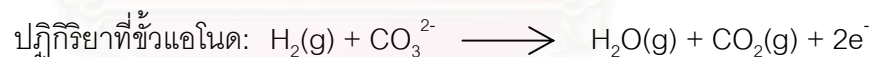
ปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีการผลิตจำหน่ายในท้องตลาด มีการติดตั้งใช้งานทั่วโลกมากกว่า 200 ระบบ ไม่ว่าจะเป็นในโรงพยาบาล สถานพยาบาล โรงแรม อาคาร สำนักงาน โรงเรียน โรงผลิตกระแสไฟฟ้า สนามบิน หลุมฝังกลบ และโรงบำบัดน้ำเสีย มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากกว่า 40% และไอน้ำที่เกิดขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ประมาณ 85% ถูกนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของระบบ Cogeneration ด้วยคุณสมบัติในการทำงานของ PAFCs อยู่ในช่วงระหว่าง 150-200 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิต่ำกว่ากรดฟอสฟอริกจะเป็นตัวนำไอออนที่ไม่ดี และแสดงความเป็นพิษของการมีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ปนเปื้อนต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (Pt) ที่ขั้วแอโนด ข้อดีที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้นอกจากมีประสิทธิภาพสูงแล้ว คือสามารถใช้ไฮโดรเจนที่ไม่บริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงได้ เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้สามารถทนต่อความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประมาณ 1.5% ซึ่งหมายถึง สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิดมากขึ้น ถ้าใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง ต้องกำจัดซัลเฟอร์ออกไปก่อน ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ คือ การใช้แพลทินัมที่มีราคาแพงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ และมักจะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก อย่างไรก็ตาม PAFCs เป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนามากที่สุด ในปัจจุบันสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 200 กิโลวัตต์ และกำลังมีการทดสอบขนาด 1 เมกะวัตต์



IV. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว

(Molten carbonate fuel cells, MCFC)

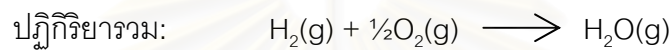
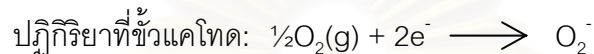
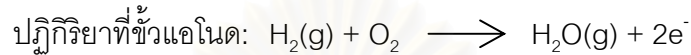
เซลล์เชื้อเพลิงนี้ใช้สารละลายคาร์บอเนตของลิเทียม โซเดียม และ/หรือโปแทสเซียมเป็นอิเล็กโทรไลต์ MCFC ให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงเป็นกระแสไฟฟ้าสูงประมาณ 60% หรือประมาณ 85% ในระบบ Cogeneration เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส เพื่อสารอิเล็กโทรไลต์มีประสิทธิภาพในการนำไอออนที่ดี เนื่องจากอุณหภูมิที่สูง ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะมีสกุลสำหรับกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันทางไฟฟ้าเคมีของเซลล์ เชื้อเพลิงที่ป้อนให้แก่ MCFCs มีได้หลายชนิดได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สธรรมชาติ โพรเพน แก๊สที่เกิดจากหลุมฝังกลบ ดีเซล และผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ Coal gasification ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้อยู่ในช่วง 10 กิโลวัตต์จนถึง 2 เมกะวัตต์ เพื่อใช้เป็นสถานีผลิตกระแสไฟฟ้า การดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงของ MCFCs มีข้อดีอย่างมาก เพราะหมายถึงการมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และมีความยืดหยุ่นของการเลือกชนิดเชื้อเพลิงและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ไม่แพงได้ เพราะการแตกพันธะคาร์บอนของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่เกิดอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม มีข้อเสียคือ อุณหภูมิที่สูงทำให้มีการกัดกร่อนและการทำลายส่วนประกอบของเซลล์สูงขึ้น



V. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cells, SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่งที่ให้กำลังงานสูง สามารถใช้ในงานที่ต้องการกำลังสูง รวมถึงเป็นสถานีผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม และหน่วยสาธารณูปโภคผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนกลาง (Large-scale central electricity generating stations) โดยปกติออกไซด์ของแข็งที่ใช้ใน SOFCs ทำจากวัสดุเซอร์รามิกแข็งของเซอร์โคเนียออกไซด์ (Zirconium oxide) และยูเทรีย (Ytria) ปริมาณเล็กน้อย แทนที่

จะใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส ได้ประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานสูงถึง 60% และประมาณ 85% ในระบบ Cogeneration โดยสามารถให้กำลังงานได้ถึง 100 กิโลวัตต์ รูปแบบหนึ่งของ SOFC คือเป็นแถวของท่อทรงกระบอกยาว และอีกรูปแบบหนึ่ง คือ เป็นแผ่นดิสก์ (compressed disc) โดยรูปแบบที่เป็นท่อทรงกระบอกเป็นรูปแบบของ SOFC ที่หลายบริษัทผลิตออกจำหน่ายในตลาด



ตารางที่ 2.1 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงระบบไฮโดรเจน-ออกซิเจน [5]

ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	อิเล็กโทรไลต์	อุณหภูมิ	ประสิทธิภาพ	การใช้งาน	
I. เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง (Solid polymer fuel cells) (SOFC/PEM)	เยื่อแผ่นพอลิเมอร์	75°C (180°F)	35-60%	- อุปกรณ์พกพา - ยานพาหนะ	
II. เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cells) (AFC)	35-50% โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	< 80°C	50-70%	- เทคโนโลยีที่ใช้ในอวกาศ	
III. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cells) (PAFC)	กรดฟอสฟอริกเข้มข้น	210°C (400°F)	35-50%	- เทอร์ไบน์ขนาด 50-500 kW, 1-11 MW	
IV. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten carbonate fuel cells) (MCFC)	เกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Li ₂ CO ₃ /Na ₂ CO ₃)	650°C (1200°F)	40-55%	- โรงไฟฟ้า	
V. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cells) (SOFC)	เซรามิกออกไซด์ (ZrO ₂ /Y ₂ O ₃)	800-1000°C (1500-1800°F)	45-60%	- โรงไฟฟ้า	

โดยสรุปแล้ว การจำแนกประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 5 ชนิดนี้ จะแบ่งได้อย่างคร่าวๆ เป็นประเภทที่ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ คือ AFC PAFC และ PMFC ซึ่งต้องใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงคือ MCFC และ SOFC สามารถใช้สารไฮโดรคาร์บอนเป็นเชื้อเพลิงได้ และไม่ต้องใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 5 ชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่างๆ กัน และมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.2 เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีกลุ่มของประจุอยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ กลุ่มประจุที่อยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะทำให้เยื่อแผ่นเกิดการบวมตัว (swelling) ได้ดี เนื่องจากมีโมเลกุลของน้ำเข้าอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ภายในโครงสร้างของเยื่อแผ่น แต่ปรากฏการณ์นี้จะถูกจำกัดโดยการเชื่อมขวาง (crosslink) ของเยื่อแผ่น ซึ่งไม่ควรจะสูงเกินไป เพราะจะทำให้เยื่อแผ่นเปราะ [6]

เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแบ่งเป็น 2 ชนิดตามสมบัติการเลือกผ่านไอออน ได้แก่ เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation-Exchange Membrane) และเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion-Exchange Membrane)

สำหรับเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่จะนำมาเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
2. มีการแพร่ของแก๊สต่ำ
3. มีขนาดที่แน่นอน
4. มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
5. ดูดซับน้ำได้ดี
6. มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันและไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

7. มีค่าการถ่ายเทไอออนบวก (Cation) สูง
8. พื้นผิวของเยื่อแผ่นต้องสามารถเชื่อมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกาะบนพื้นผิวได้ดี
9. มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity)

แต่เนื่องจากไม่มีเยื่อแผ่นใดที่จะมีสมบัติเบื้องต้นครบทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องพยายามเลือกให้มีความเหมาะสมมากที่สุด

งานพัฒนาเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ได้เริ่มโดยบริษัท General Electric ซึ่งผลิตโดยการควบแน่นกรดฟีนอลซัลฟอนิก (Phenolsulfonic acid) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เยื่อแผ่นนี้จะมีความเปราะและแตกได้ง่าย เมื่อเยื่อแผ่นแห้ง และถูกไฮโดรไลซิสได้อย่างรวดเร็วกลายเป็นกรดซัลฟิวริก เยื่อแผ่นแบบพอลิเมอร์ของแข็งชุดถัดมาผลิตได้จากการทำซัลฟอนชันบางส่วน (Partial sulfonation) ของพอลิสไตรีน (Polystyrene) แต่สมบัติของเยื่อแผ่นนี้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เพราะมีอายุการใช้งานสั้น คือ ประมาณ 200 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เยื่อแผ่นชุดต่อมาที่ได้รับการพัฒนา คือ เยื่อแผ่นที่ได้จากการใช้สไตรีนไดไวนิลเบนซีน (Styrene divinylbenzene) ที่เกาะอยู่บนเมทริกซ์ที่ทำมาจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon matrix) ที่เฉื่อยแล้วตามด้วยการทำซัลฟอนชัน เยื่อแผ่นนี้จัดเป็นเยื่อแผ่นชุดแรกที่มีความแข็งแรงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ทั้งในสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งเยื่อแผ่นนี้ได้ถูกนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในยานอวกาศ Gemini 7 ในปี ค.ศ. 1964 แต่อย่างไรก็ตาม เยื่อแผ่นนี้สามารถใช้งานได้ยาวนานแค่ 500 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพราะเกิดการเสื่อมสภาพของพันธะ C-H ตรงตำแหน่งแอลฟา (Alpha) ในโครงสร้างของเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ ภายหลังจากการปรับปรุงเยื่อแผ่นให้มีโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) พบว่าเยื่อแผ่นที่ผลิตได้นี้มีอายุการใช้งานนานขึ้นเป็น 1000 ชั่วโมง [7]

2.3 พอลิสไตรีน [8]

พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูก พอลิสไตรีนที่นำมาใช้มีหลายประเภท เช่น พอลิสไตรีนชนิดธรรมดา (general purpose) ซึ่งมีความแข็งแต่เปราะ และพอลิสไตรีนชนิดพิเศษ ได้แก่ ชนิดทนความร้อน โดยสามารถทนต่อความร้อน คงรูป และทนต่อความชื้น มีแนวโน้มที่จะร้าวได้ง่าย ไม่มีสีและกลิ่น

และชนิดทนแรงกระแทก (high impact) มีความแข็ง คงรูปดี แข็งและเหนียว ไม่มีรสและกลิ่น โดยในตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะและสมบัติต่างๆ ของพอลิสไตรีน

ตารางที่ 2.2 ลักษณะและสมบัติต่างๆ ของพอลิสไตรีน [9]

ความถ่วงจำเพาะ	1.04 – 1.10
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	10.34 – 82.73
ความทนต่อแรงอัด (MPa)	27.58 – 110.31
อุณหภูมิคล้ายแก้ว (°C)	100
ความสามารถในการทนกรด	ทนกรดอ่อนและกรดแก่ได้ ถูกทำลายโดย กรดออกซิไดซ์
ความสามารถในการทนด่าง	ทนด่างอ่อนและด่างแก่ได้
ความสามารถในการละลาย	ละลายได้ในตัวทำละลายแอโรแมติก และคลอริเนตไฮโดรคาร์บอน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lam-Leung และ Li (1995) [10] เตรียมเยื่อแผ่นวิวิธพันธุ์แลกเปลี่ยนไอออนบวก (Heterogeneous cation-exchange membrane) จากเรซินซัลโฟเนตเตดพอลิสไตรีนที่เชื่อมขวางกับไดไวนิลเบนซีน (Sulfonated Polystyrene/Divinyl Benzene, SPDVB) ในสัดส่วน 1, 4 และ 7% ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ให้มีปริมาณของเรซิน SPDVB สัดส่วน 50, 60, 70, 80 และ 90% โดยน้ำหนัก พบว่า ซัลโฟเนตเตดพอลิสไตรีนที่เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% ในปริมาณมากกว่า 70% โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่ดี โดยให้ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นต่ำ และสามารถเลือกผ่านไอออนบวกสูงกว่าไอออนลบ

Chen และคณะ (2004) [11] เตรียมเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนคอมโพสิตจากสารแขวนลอยพอลิสไตรีนซัลโฟเนต (Polystyrene sulfonate, PSS) กับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพอลิสไตรีนซัลโฟเนตที่เชื่อมขวาง (crosslinked polystyrene sulfonate ion exchange resin) พบว่าสามารถเตรียมเยื่อแผ่นคอมโพสิตที่มีปริมาณเรซินสูงถึง 50% โดยน้ำหนัก ได้โดยไม่ทำให้มีการสูญเสียความแข็งแรงเชิงกล นอกจากนั้นเยื่อแผ่นคอมโพสิตมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่า การบวมน้ำต่ำกว่าเยื่อแผ่น PSS อีกทั้งยังมีความแข็งแรง และมีความเสถียรทาง

เคมี (Chemical stability) ในเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่าเยื่อแผ่น PSS เมื่อทดสอบการใช้งานในระยะยาวของเยื่อแผ่น พบว่า เซลล์ที่ใช้เยื่อแผ่น PSS ประสิทธิภาพจะลดลง 60% ในเวลา 55 ชั่วโมง แต่เยื่อแผ่นคอมโพสิตใช้ได้ยาวนานถึง 340 ชั่วโมง

Kwak และคณะ (2004) [12] ได้เตรียมเยื่อแผ่นพอลิเมอร์คอมโพสิตกับสารดูดความชื้น (hygroscopic material) เพื่อใช้เป็นเยื่อแผ่นอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับการทำงานที่อุณหภูมิสูง โดยวิธีการอัดด้วยความร้อน (Hot pressing) เรซินแนฟิออน (Nafion resin) หลอมเหลวเข้ากับผงมอร์ดไนต์ (Mordenite) ที่สัดส่วนต่างๆ ร้อยละ 3, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเปียกในช่วงอุณหภูมิต่ำของเยื่อแผ่นที่ไม่มีมอร์ดไนต์ มีค่าสูงกว่าเยื่อแผ่น คอมโพสิต แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส ค่าการนำโปรตอน (proton conductivity) ของ เยื่อแผ่นคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของมอร์ดไนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำที่ถูกดูดซับอยู่ใน มอร์ดไนต์ นอกจากนั้น จากผลกราฟโพลาริเซชันของเซลล์เดี่ยวที่อุณหภูมิต่างๆ กัน แสดงว่า เยื่อแผ่นคอมโพสิตที่มีมอร์ดไนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดีกว่าสูตรอื่นๆ และเสนอความเห็นว่าการเสื่อมของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีขึ้น ไม่ได้ขึ้นกับปริมาณน้ำที่อยู่ในเยื่อแผ่นเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างการเคลื่อนที่ของโปรตอนกับโครงสร้างของเยื่อแผ่นด้วย

Yu และคณะ (2002) [13] ได้ทำการศึกษาอายุใช้งาน (Lifetime) ของเซลล์เชื้อเพลิงใช้ H_2/O_2 ประเภทเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเตรียมจากพอลิสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด (Polystyrene sulfonic acid, PSSA) เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการสลายตัวของเยื่อแผ่น PSSA ได้ เสนอว่าการรีดักชันของออกซิเจนที่ขั้วแคโทดจะก่อให้เกิดสารมัธยันตร์เพอร์ออกไซด์ (Peroxide intermediate) ซึ่งมีฤทธิ์ออกซิเดชันที่แรงและสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนตติยภูมิที่คาร์บอนตำแหน่งแอลฟา (α -carbon) ของ PSSA ได้ การสลายตัวของเยื่อแผ่น PSSA จึงมักเกิดขึ้นที่ด้านแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง การสูญเสียของวงแหวนแอมโรแมติกและหมู่ซัลโฟนิคจากเยื่อแผ่น PSSA เกิดขึ้นพร้อมกัน เพื่อยืนยันกลไกการสลายตัวดังกล่าวข้างต้นและเป็นการป้องกันการสลายตัวเนื่องจากออกซิเดชันของเยื่อแผ่น PSSA ที่ขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง ได้เตรียมเยื่อแผ่นคอมโพสิตของ PSSA กับแนฟิออนรุ่นใหม่ โดยให้เยื่อแผ่นแนฟิออนเชื่อมติดกับเยื่อแผ่น PSSA และอยู่ทางด้านขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ PSSA-Nafion101 composite membrane และ PSSA-recast Nafion composite membrane มีอายุการใช้งานนาน 835 และ 240 ชั่วโมง ตามลำดับ

Kang และคณะ (2002) [14] เตรียมเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวกรวมน้ำจาก พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol), PVA) ผสมกับพอลิสไตรีนซัลฟอนิกแอซิดโคมาลิกแอซิด (poly(styrene sulfonic acid-co-maleic acid), PSSA-MA) หรือ (PVA/PSSA-MA) พบว่าเยื่อแผ่น PVA/PSSA-MA ที่เตรียมได้มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำเพียง 1.0-1.5 $\Omega \text{ cm}^2$ และมีสมบัติการบวมน้ำสูง ให้ค่า Cation transport number มากกว่า 0.93 จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของ เยื่อแผ่นและระดับการเชื่อมขวาง พบว่าระดับการเชื่อมขวาง เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งต่อการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวกรวมน้ำ

Smitha และคณะ (2003) [15] เตรียมเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจากการทำซัลฟอนชันพอลิเมอร์หลายชนิด ได้แก่ พอลิสไตรีน (PS) พอลิคาร์บอนเนต (PC) พอลิซัลฟอน (PSf) และพอลิฟีนิลีนออกไซด์ (PPO) เพื่อเป็นทางเลือกใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ในส่วนของการเตรียมซัลฟอนเตตพอลิสไตรีน (SPS) ใช้ Acetyl sulfate เป็น Sulfonating agent และผลการศึกษาสมบัติของเยื่อแผ่น SPS พบว่ามีค่าความสามารถทนต่อแรงดึง (tensile strength) เท่ากับ 120 N/mm^2 ร้อยละการยืดเท่ากับ 2.65 ร้อยละการดูดซับน้ำเท่ากับ 10.78 ร้อยละการดูดซับเมทานอลเท่ากับ 1.08 และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (IEC) เท่ากับ 0.28 meq./g

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเชื่อมขวางพอลิสไตรีน

1. สารละลายโทลูอีน ($C_6H_5CH_3$) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก (AR grade): Fisher
2. ผงเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก (AR grade): Fluka
3. สารละลายไดไวนิลเบนซีน (DVB) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก (AR grade): Sigma
4. เม็ดพอลิสไตรีน (PS) Styron656D: บริษัท สยามโพลีสไตรีน จำกัด

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปเยื่อแผ่น

1. สารละลายโทลูอีน ($C_6H_5CH_3$) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก (AR grade): Fisher
2. สารละลายบิวทานอล ($CH_3(CH_2)_2CH_2OH$) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก (AR grade): Carlo Erba
3. สารละลายไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (C_3H_7NO , DMF) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก (AR grade): LAB-SCAN
4. สารละลายเมทานอล (CH_4O) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการทำซัลโฟเนชัน

1. สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 96-98 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)

- ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) ความบริสุทธิ์ร้อยละ >99 โดยน้ำหนัก (AR grade):
Fluka
- สารละลายเมทานอล (CH_4O) ความบริสุทธิ์ร้อยละ >99 โดยน้ำหนัก
(Commercial grade)

3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการเติมลิเทียมไอออน

- ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก (AR grade):
Merck
- ลิเทียมแอสีเตต (LiOAc) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก (AR grade):
Sigma
- สารละลายเมทานอล (CH_3OH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 96-98 โดยน้ำหนัก
(Commercial grade)

3.1.5 สารเคมีที่ใช้ในการวัดค่าการซึมผ่านแก๊ส

- แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99: PRAXAIR

3.1.6 สารเคมีที่ใช้ในการวัดค่าการนำโปรตอน

- แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99: PRAXAIR

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมขวางพอลิस्टาเร็น

- ชุดเครื่องกวนชนิดปรับความเร็วรอบ และใบกวนเทพลอน: IKLAVOR
TECHNIK รุ่น RW 20n
- เตาให้ความร้อน (Heating mantle): FALC รุ่น MF1000
- เตาอบสุญญากาศ (Vacuum oven): Heraeus รุ่น VT 6000M
- เครื่องสูบลสุญญากาศ (Vacuum pump): Welch รุ่น 889
- เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance): METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S

6. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) สเกล 0-100°C
7. ขวด 5 คอขนาด 1000 มิลลิลิตร (Round-bottom flask 5 necks)

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำซัลฟอนเนชัน

1. ชุดเครื่องกวนชนิดปรับความเร็วรอบ และใบกวนเทฟลอน: IKLABOR TECHNIK รุ่น RW 20n
2. เครื่องให้ความร้อน (Heating mantle): FALC รุ่น MF1000
3. เตาอบสุญญากาศ (Vacuum oven): Heraeus รุ่น VT 6000M
4. เครื่องสูบลสุญญากาศ (Vacuum pump): Welch รุ่น 889
5. เครื่องชั่ง (Analytical balance): METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S
6. ชุดกรวยกรอง (Filter holder)
7. กระดาษกรองใยแก้ว (Glass microfiber filter paper, GF/C) ขนาดรู 1.2 ไมโครเมตร
8. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) สเกล 0-100°C
9. ขวด 5 คอขนาด 1000 มิลลิลิตร (Round-bottom flask 5 necks)

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเติมลิเทียมไอออน

1. ชุดเครื่องกวนชนิดปรับความเร็วรอบ และใบกวนเทฟลอน: IKLABOR TECHNIK รุ่น RW 20n
2. เตาอบสุญญากาศ (Vacuum oven): Heraeus รุ่น VT 6000M
3. เครื่องสูบลสุญญากาศ (Vacuum pump): Welch รุ่น 889
4. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance): METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S

3.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเยื่อแผ่น

1. เตาอบสุญญากาศ (Vacuum oven): Heraeus รุ่น VT 6000M
2. เครื่องสูบลสุญญากาศ (Vacuum pump): Welch รุ่น 889
3. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance): METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S
4. แผ่นกระจก

3.2.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของเยื่อแผ่น

1. ไมโครมิเตอร์
2. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance): METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S
3. โถดูดความชื้น (Desiccator)
4. ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส
5. ชุดทดสอบค่าการนำโปรตอน

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 เครื่องวิเคราะห์ที่มีในภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. เครื่อง Universal testing: LLOYD Instruments LR 5K
2. เครื่อง TGA: Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond TG/DTA
3. เครื่อง Potentiostat Galvanostat: AUTOLAB PGSTATO
4. เครื่อง Milliohm meter: Hewlett-Packard รุ่น HP 4338
5. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy: Thermo รุ่น DF3C206A

3.3.2 เครื่องวิเคราะห์ที่ขอความอนุเคราะห์

เครื่อง Scanning Electron Microscopy: Jeol JSM 6400 จากศูนย์เครื่องมือวิจัย
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ประเภทและสูตรของเยื่อแผ่นในงานวิจัย

ประเภทของเยื่อแผ่นที่เตรียมในงานวิจัยนี้ มี 6 ประเภท ดังนี้

1. เยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง (PS) 4 สูตร จากเม็ดพอลิสไตรีน (Polystyrene pellet) โดยมีขั้นตอน ดังนี้

- ก. เตรียมเป็นสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้นร้อยละ 3 (3%PS) หรือ 5 (5%PS) โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ต่อปริมาตรตัวทำละลาย
- ข. ขึ้นรูปเป็นแผ่นหนา 20 หรือ 30 ไมโครเมตร
2. เยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง (PSSA) 8 สูตร โดยมีขั้นตอนดังนี้
- ก. ทำซัลโฟเนชันจากผงพอลิสไตรีน 2 ขนาด คือ 150 และ 250 ไมโครเมตร
- ข. เตรียมเป็นสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้นร้อยละ 3 หรือ 5 โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ต่อปริมาตรตัวทำละลาย
- ค. ขึ้นรูปเป็นแผ่นหนา 20 หรือ 30 ไมโครเมตร
3. เยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางและเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม (PSSALiOAc หรือ PSSALiOH) 48 สูตร โดยมีขั้นตอน ดังนี้
- ก. ทำซัลโฟเนชันจากผงพอลิสไตรีน 2 ขนาด คือ 150 และ 250 ไมโครเมตร
- ข. เตรียมเป็นสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้นร้อยละ 3 หรือ 5 โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ต่อปริมาตรตัวทำละลาย
- ค. แช่ในสารละลายเกลือลิเทียมแอสซีเทต หรือลิเทียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 หรือ 25 หรือ 50 โดยน้ำหนักของสารประกอบลิเทียมต่อน้ำหนักของพอลิเมอร์
- ง. ขึ้นรูปเป็นแผ่นหนา 20 หรือ 30 ไมโครเมตร
4. เยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง 4 สูตร จากเม็ดพอลิสไตรีน (Polystyrene pellet) โดยมีขั้นตอน ดังนี้
- ก. เตรียมเป็นสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้นร้อยละ 3 หรือ 5 โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ต่อปริมาตรตัวทำละลาย
- ข. เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนปริมาณร้อยละ 4 หรือ 7 โดยปริมาตร และขึ้นรูปเป็นแผ่นหนา 20 - 30 ไมโครเมตร

5. เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง 4 สูตร โดยทำซัลฟอนชันแก่เยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางในข้อ 4

6. เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง และเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม 24 สูตร โดยแช่เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางของข้อ 5 ในสารละลายเกลือลิเทียมแอสซีเทต หรือลิเทียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 หรือ 25 หรือ 50 โดยน้ำหนักของสารประกอบลิเทียมต่อน้ำหนักของพอลิเมอร์

3.4.2 การเตรียมเยื่อแผ่นชนิดต่างๆ

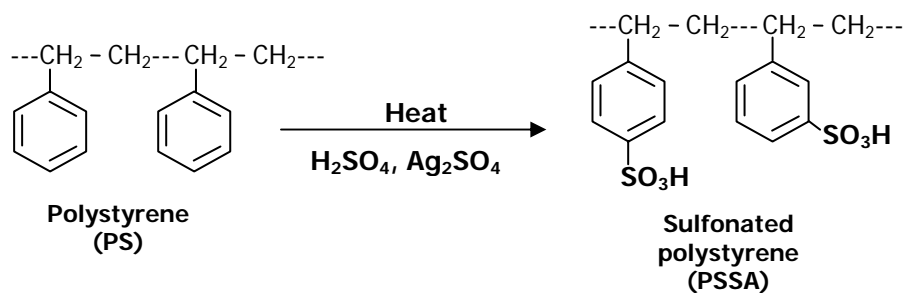
3.4.2.1 การสังเคราะห์เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนชนิดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ก. วิธีการเตรียมพอลิสไตรีนก่อนการทำซัลฟอนชัน

บดและคัดขนาดเม็ดพอลิสไตรีนให้ได้ขนาด 150 หรือ 250 ไมโครเมตร

ข. วิธีการทำซัลฟอนชัน ตามวิธีการในเอกสารอ้างอิง [16]

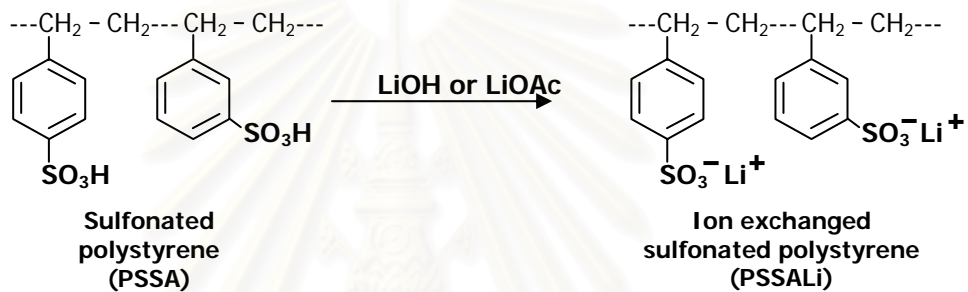
ให้ความร้อนแก่กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ 90 องศาเซลเซียส ละลายซิลเวอร์ซัลเฟตในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นในอัตราส่วนร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนกระทั่งซิลเวอร์ซัลเฟตละลายหมด ใส่ผงพอลิสไตรีนที่บดและคัดขนาดจากข้อ ก. ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวลงแล้วกรองกรวดส่วนเกินออกด้วยกระดาษกรองชนิด GF/C ที่ประกอบเข้ากับชุดกรอง และล้างด้วยเมทานอล จนกระทั่งเป็นกลาง ผลที่ได้คาดว่าเป็นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน มีปฏิริยาการทำซัลฟอนชันดังแสดงในรูปที่ 3.1 อบแห้งในเตาอบสูญญากาศที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 ปฏิริยาซัลฟอนชัน

ค. วิธีการทำสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม

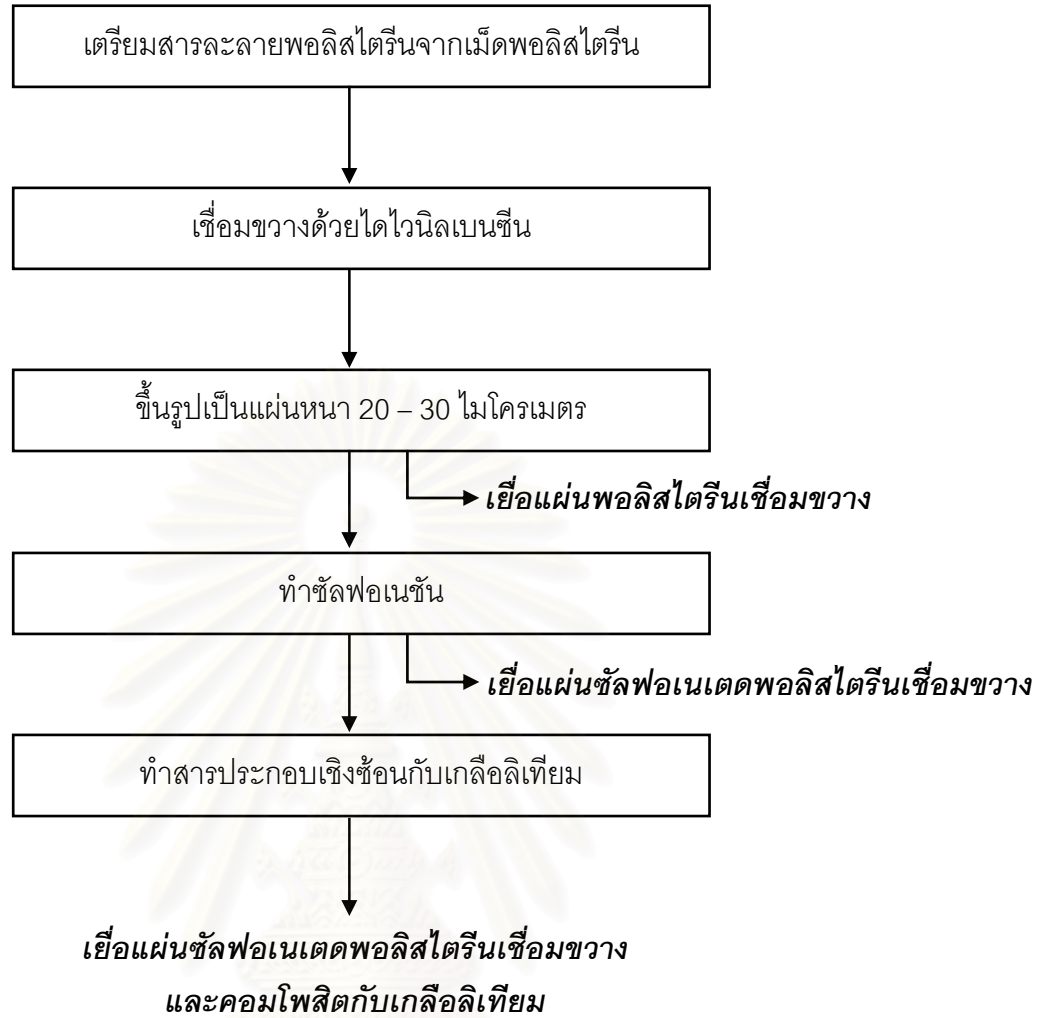
นำซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนที่ได้ในข้อ ข. มาแช่ในสารละลายของลิเทียม แอซีเตต หรือลิเทียมไฮดรอกไซด์ (ได้จากการละลายเกลือลิเทียมในเมทานอลอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 25 หรือ 50 โดยน้ำหนักของสารประกอบลิเทียมต่อน้ำหนักของพอลิเมอร์ ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง กรองสารละลายเกลือลิเทียมส่วนเกินออกด้วยกระดาษกรองชนิด GF/C ที่ประกอบเข้ากับชุดกรอง แล้วอบแห้งในเตาอบสูญญากาศที่ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปฏิริยาดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ปฏิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม

ง. วิธีการขึ้นรูปเยื่อแผ่น ตามวิธีการในเอกสารอ้างอิง [17]

สำหรับเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง และเยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง ได้จากการละลายพอลิเมอร์ในข้อ ก. และข้อ ข. ตามลำดับ ในตัวทำละลายผสมของโทลูอีนกับบิวทานอลในสัดส่วน 9:1 โดยปริมาตร และสำหรับเยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแบบไม่เชื่อมขวาง ได้จากการละลายพอลิเมอร์ในข้อ ค. ในตัวทำละลายผสมของโทลูอีนกับไดเมทิลฟอร์มาไมด์ ในอัตราส่วน 9:1 โดยปริมาตร เช่นกัน โดยเลือกละลายที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 หรือ 5 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ต่อปริมาตรตัวทำละลาย รอจนกระทั่งพอลิเมอร์ละลายหมด ขึ้นรูปเป็นแผ่นบนแผ่นกระจก ให้ความหนาของเยื่อแผ่นแห้งเป็น 20 หรือ 30 ไมโครเมตร ระเหยตัวทำละลายในเตาอบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องจนหมด แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการลอกเยื่อแผ่นออกจากกระจกในเมทานอลแล้วตากแห้งก่อนเก็บไว้ในโถดูดความชื้น



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนชนิดพอลิไทรินแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน

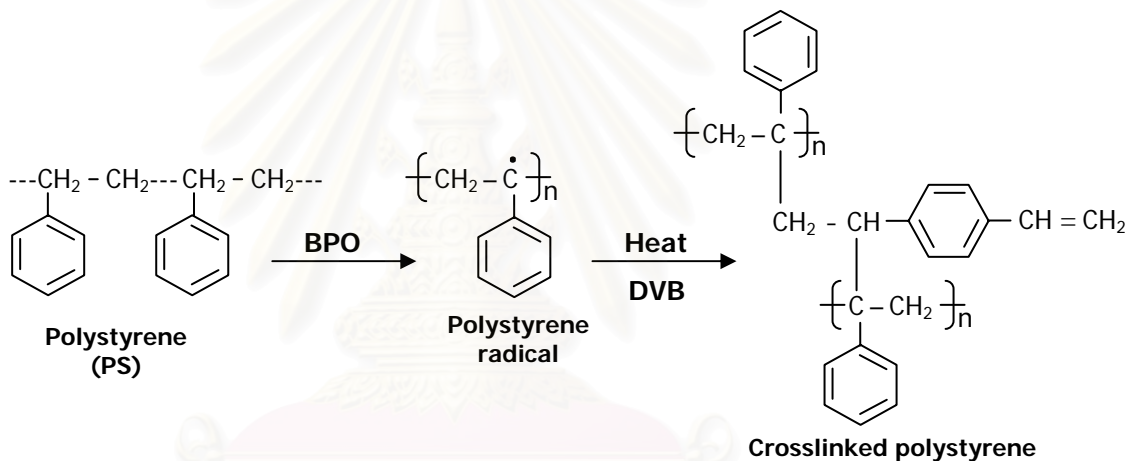
3.4.2.2 การสังเคราะห์เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนชนิดพอลิไทรินแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน

เยื่อแผ่นกลุ่มนี้มีลำดับขั้นตอนดังแผนภาพในรูปที่ 3.3 คือ ต้องเตรียมสารละลายพอลิไทรินก่อนแล้วเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน ถ้านำสารละลายที่ได้ขึ้นมาขึ้นรูปเป็นแผ่นจะได้สูตรของเยื่อแผ่นพอลิไทรินเชื่อมขวาง ซึ่งนำไปทำซัลฟอนเนชันได้สูตรของเยื่อแผ่นซัลฟอนเนตพอลิไทรินเชื่อมขวาง และนำไปทำคอมโพสิตกับเกลีโอลิเทียมได้

สูตรของเยื่อแผ่นซัลฟอนेटดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางและคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมตามลำดับ โดยมีรายละเอียดการสังเคราะห์ดังนี้

ก. วิธีการเชื่อมขวางพอลิสไตรีน ตามวิธีการในเอกสารอ้างอิง [18]

ละลายเบนโซิลเพอร์ออกไซด์ในโทลูอีนโดยมีอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร รวจนกระทั่งเบนโซิลเพอร์ออกไซด์ละลายหมด ค่อยๆ ใส่เม็ดพอลิสไตรีนให้มีปริมาณร้อยละ 3 หรือ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนละลายหมด ให้ความร้อนขึ้นไปที 60 องศาเซลเซียส ค่อยๆ หยดไดไวนิลเบนซีนลงไปให้มีปริมาณร้อยละ 4 หรือ 7 โดยปริมาตร รักษาอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีปฏิกิริยาการเชื่อมขวางดังแสดงในรูปที่ 3.4



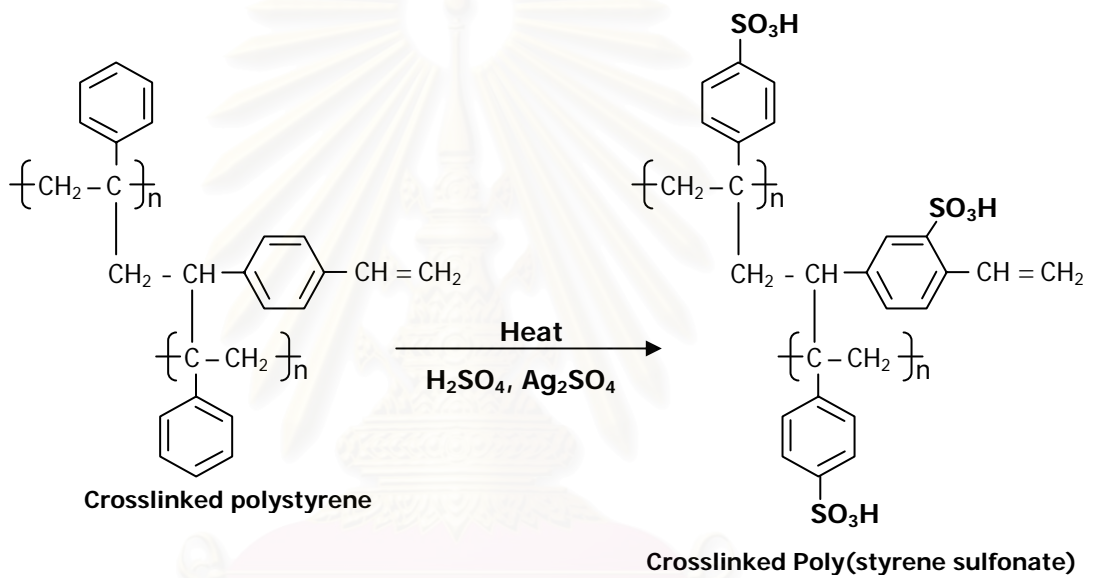
รูปที่ 3.4 ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางพอลิสไตรีนด้วยไดไวนิลเบนซีน

ข. วิธีการขึ้นรูปเยื่อแผ่นก่อนการทำซัลฟอนชัน

นำสารละลายที่เย็นลงจากข้อ ก. เทลงบนแผ่นกระจก ให้ความหนาของเยื่อแผ่นอยู่ในช่วง 20–30 ไมโครเมตร ระเหยตัวทำละลายในเตาอบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องจนหมด แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการลอกเยื่อแผ่นออกจากกระจกในเมทานอลแล้วตากแห้งก่อนเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

ค. วิธีการทำซัลฟอนเนชัน

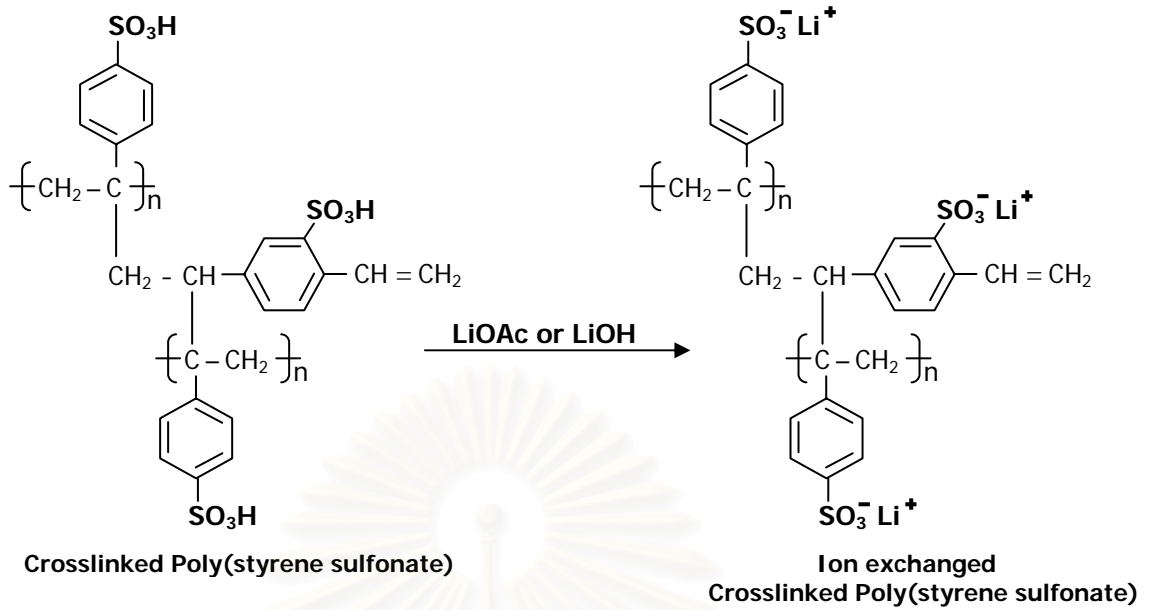
ให้ความร้อนแก่กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ 90 องศาเซลเซียส ละลายซิลเวอร์ซัลเฟตในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นในอัตราส่วนร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนกระทั่งซิลเวอร์ซัลเฟตละลายหมด ใส่เยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางในข้อ ข. ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวลงแล้วเทกรดส่วนเกินออก และล้างด้วยเมทานอลจนกระทั่งเป็นกลาง เยื่อแผ่นที่ได้คาดว่าจะเป็ยื่อแผ่นซัลฟอนเนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง มีปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 3.5 อบในเตาอบสูญญากาศที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 ปฏิกิริยาซัลฟอนเนชันของพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง

ง. วิธีการทำสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม

นำเยื่อแผ่นซัลฟอนเนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางในข้อ ค. มาแช่ในสารละลายของลิเทียมแอสซีเตต หรือลิเทียมไฮดรอกไซด์ (ได้จากการละลายเกลือลิเทียมในเมทานอลปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 25 หรือ 50 โดยน้ำหนักของสารประกอบลิเทียมต่อน้ำหนักของพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เเทสารละลายเกลือลิเทียมส่วนเกินออก อบแห้งในเตาอบสูญญากาศที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ปฏิกริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียมของพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง

3.4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติของเยื่อแผ่น

3.4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี (Chemical structure)

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเยื่อแผ่นสามารถหาได้ โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer ณ ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.3.2 การทดสอบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม (Formation of complex with lithium salt)

ทดสอบด้วยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ดังนี้

1. ชั่งเยื่อแผ่นแห้งให้มีน้ำหนักประมาณ 50 มิลลิกรัม
2. แช่ในน้ำกลั่น ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ดูดน้ำกลั่นในข้อ 2 มาในปริมาณที่สามารถให้กระเปาะแก้วของเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) จุ่มได้พอดี

3.4.3.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

ทำการตรวจสอบภาพพื้นผิวด้านหน้า และภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ดำเนินการโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.3.4 การหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนา (Thickness change)

1. วัดความหนาของเยื่อแผ่นแห้งด้วยไมโครมิเตอร์
2. แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำเยื่อแผ่นมาซับน้ำที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นออกให้แห้งด้วยกระดาษซับแล้ววัดความหนาอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในเยื่อแผ่น
4. นำค่าความหนาที่ได้มาคำนวณค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงความหนาตามสมการที่ (3.1)

$$\% \text{Thickness change} = \frac{(\text{Thickness}_{\text{wet}} - \text{Thickness}_{\text{dry}})}{\text{Thickness}_{\text{dry}}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.4.3.5 การทดสอบความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

1. ตัดเยื่อแผ่นขนาด 5x100 มิลลิเมตรและหนีบเข้ากับเครื่องให้มีลักษณะตามรูป 3.7 a)
2. วัดความหนาของเยื่อแผ่นด้วยไมโครมิเตอร์
3. ทดสอบตาม ASTM D882 ด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามรูป 3.7 b)



a)



b)

รูปที่ 3.7 เครื่อง Universal testing LLOYD Instruments LR 5K

3.4.3.6 การหาอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature)

อุณหภูมิการสลายตัวสามารถหาโดยใช้เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer (TGA) ณ ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.3.7 การทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange capacity)

1. ชั่งเยื่อแผ่นแห้งให้มีน้ำหนักประมาณ 20 มิลลิกรัม
2. แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.005 นอร์มอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จนสมดุล (เป็นเวลา 1 อาทิตย์)
3. ดูดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในข้อ 2 มาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.005 นอร์มอล โดยจุดยุติจะมีค่าพีเอชเท่ากับ 7
4. คำนวณค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ตามสมการที่ (3.2)

$$\text{Ion exchange capacity} = \frac{\left(N_1 V_1 - \left(\frac{V_1}{V_3} \right) N_2 V_2 \right)}{m} \quad (3.2)$$

N_1 = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 0.005 นอร์มอล

N_2 = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก = 0.005 นอร์มอล

V_1 = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 25 มิลลิลิตร

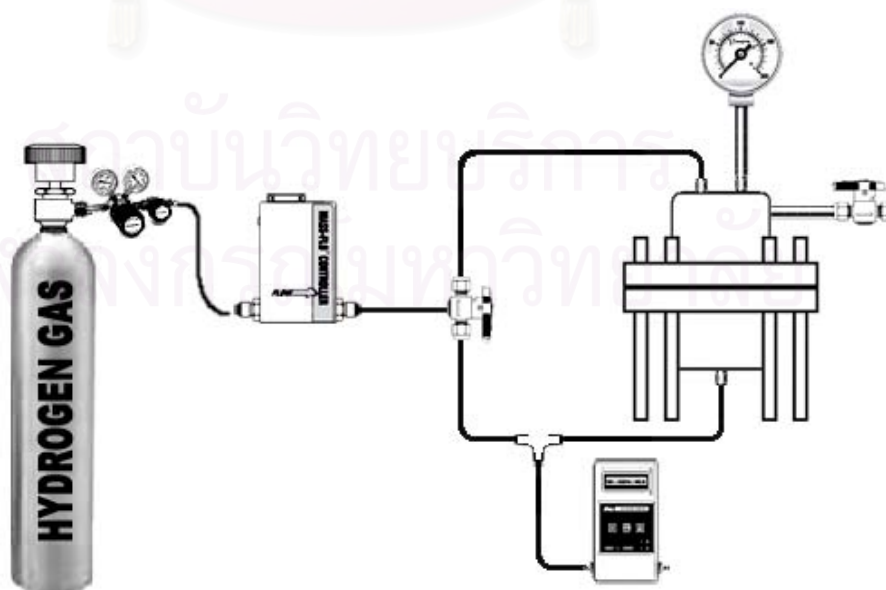
V_2 = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

V_3 = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นำมาไทเทรต (มิลลิลิตร)

m = น้ำหนักของเยื่อแผ่น = 20 กรัม

3.4.3.8 การทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส (Gas permeability)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊สของเยื่อแผ่น โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ การวัดโดยใช้ความดันคงที่ และการวัดโดยปริมาตรคงที่ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือในการวัดเป็นแบบความดันคงที่ โดยผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปทางด้านบนของเยื่อแผ่น ควบคุมความดันขาเข้าของแก๊สให้คงที่ ส่วนด้านขาออกเปิดสู่บรรยากาศ และทำการวัดอัตราการไหลของแก๊สขาออก เพื่อนำไปหาค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน



รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส

การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในงานวิจัยนี้ดำเนินการแบบความดันคงที่เท่ากับ 20 psi และอุณหภูมิห้อง ด้วยชุดทดสอบ ตามรูปที่ 3.8 มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดเยื่อแผ่นเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพอดีกับบริเวณทดสอบและวัดความหนาของเยื่อแผ่น
2. ประกอบเยื่อแผ่นเข้ากับชุดทดสอบ โดยวางบนหน้าแปลนที่มีรูพูน
3. วางแหวนยาง (O-ring) บนเยื่อแผ่น และแหวนยางระหว่างหน้าแปลนทั้งสองเพื่อกันแก๊สรั่ว
4. ไขสลักเกลียว (screw bolt) กับแป้นเกลียว (nut) เข้าด้วยกันให้แน่น
5. เปิดแก๊สไฮโดรเจนที่อัตราการไหลประมาณ 10 Sccm (Standard cubic centimeter per minute) ผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สเพื่อทำ auto-zero
6. หมุนวาล์วสามทางเพื่อเปิดแก๊สไฮโดรเจน ที่อัตราการไหลประมาณ 10 Sccm เข้าสู่ชุดทดสอบด้วยความดัน และอุณหภูมิคงที่
7. วัดอัตราการไหลของแก๊สขาออก และนำไปหาค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนตามสมการที่ (3.3)

$$P = \frac{Q \times l}{\Delta P \times A} \quad (3.3)$$

P = สภาพให้แก๊สซึมผ่าน ($\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$)

Q = อัตราการไหลผ่านเยื่อแผ่น (Sccs)

l = ความหนาของเยื่อแผ่น (cm)

ΔP = ความดันต่าง (cmHg)

A = พื้นที่ของเยื่อแผ่น (cm^2)

3.4.3.9 การวัดค่าการนำโปรตอน (Proton conductivity)

การวัดค่าการนำโปรตอนโดยวิธี Four-probe มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดเยื่อแผ่นให้มีขนาด 1x4 เซนติเมตร
2. วางเยื่อแผ่นบนเซลล์วัดค่าการนำโปรตอน โดยวางเยื่อแผ่นตามขวางให้อยู่บนลวดแพลทินัมที่ทำหน้าทีเป็นขั้ว 2 ขั้ว สำหรับวัดความต่างศักย์ ตามรูปที่ 3.9
3. วางแผ่นแพลทินัมขนาด 1x2.5 เซนติเมตร บนปลายทั้งสองข้างของเยื่อแผ่นเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้ว 2 ขั้ว สำหรับจ่ายกระแส
4. ประกอบเซลล์วัดค่าการนำโปรตอนเข้าด้วยกัน และบรรจุเซลล์ในภาชนะปิดที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้
5. บ้อนแก๊สไฮโดรเจนที่ผ่านระบบควบคุมความชื้นแล้วเข้าสู่ชุดวัดการนำโปรตอน
6. ต่อชุดวัดค่าการนำโปรตอนเข้ากับเครื่อง Milliohm meter
7. รอจนความชื้นในชุดวัดค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 100 จึงเริ่มทำการทดลอง
8. บันทึกค่าความต้านทานจากเครื่อง Milliohm meter นำค่าความต้านทานที่ได้มาคำนวณ เพื่อนำมาหาค่าการนำโปรตอน ตามสมการ (3.4)

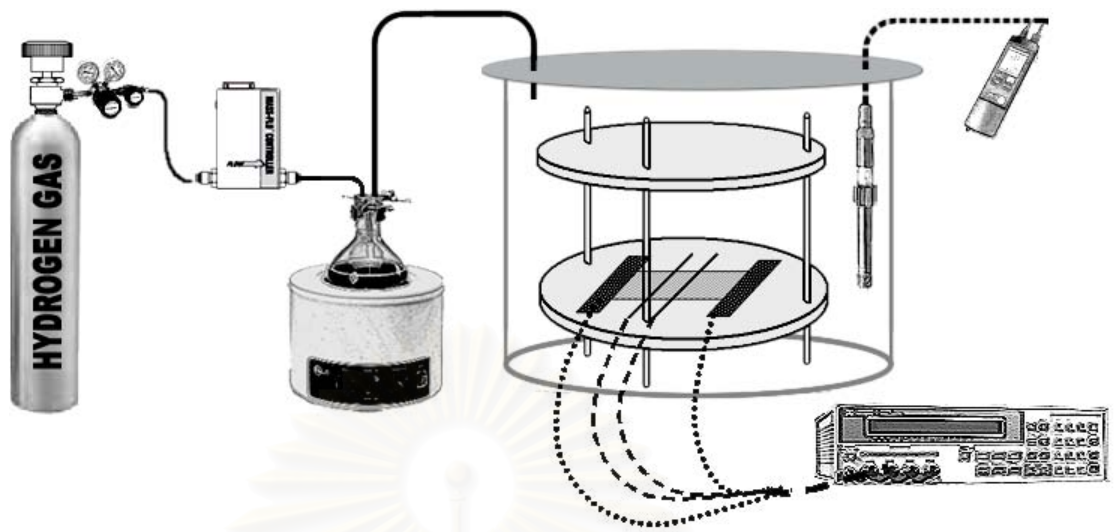
$$\sigma = \frac{1}{R} \left(\frac{l}{A} \right) \quad (3.4)$$

σ = ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)

R = ความต้านทาน (โอห์ม)

l = ระยะห่างระหว่างลวดแพลทินัม (เซนติเมตร)

A = พื้นที่หน้าตัดของเยื่อแผ่น (ตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 3.9 การวัดค่าการนำโปรตอนด้วยวิธี Four probe

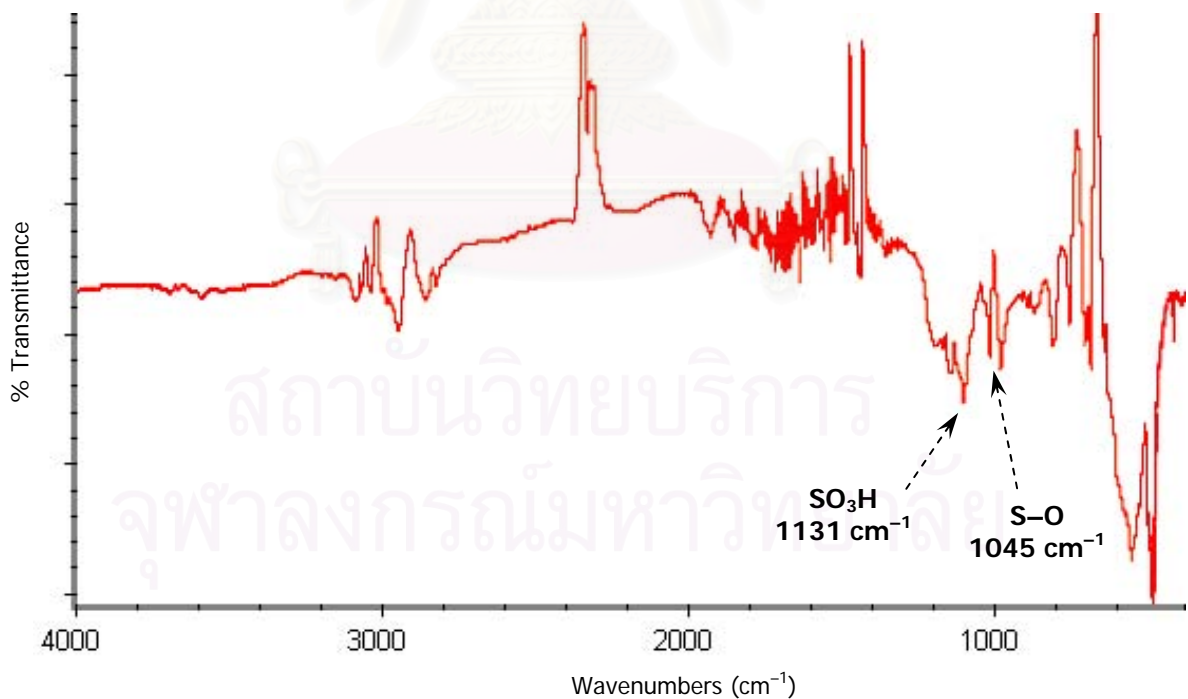
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

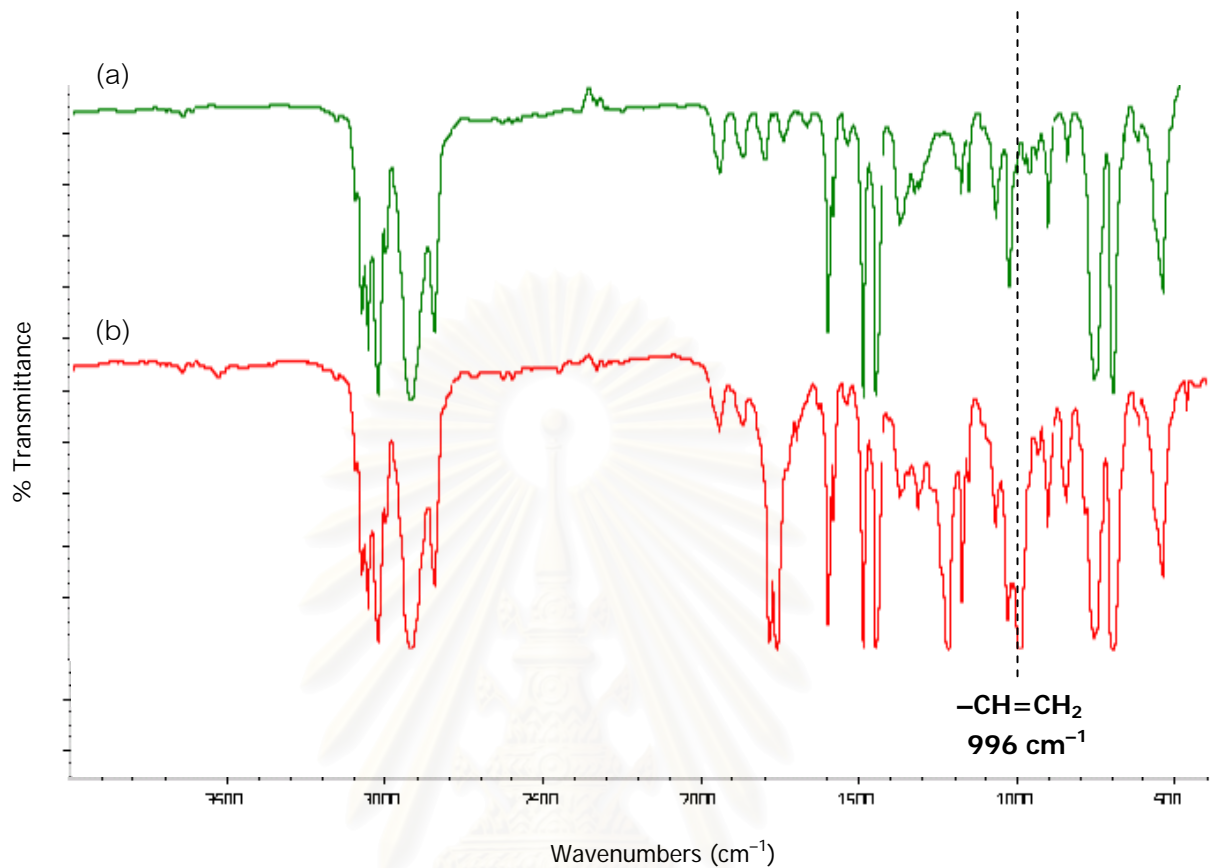
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 โครงสร้างทางเคมี

รูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงสเปกตรัม FTIR ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง โดยใช้เยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางเป็นพื้นหลัง (background) เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นที่เป็นผลจากการเกิดซัลฟอนชันได้อย่างชัดเจน โดยพบพีกของ SO_3H และ S-O ที่เลขคลื่นประมาณ 1131 และ 1045 cm^{-1} ตามลำดับ ในส่วนของพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางในรูป 4.2(b) พบพีก $-\text{CH}=\text{CH}_2$ ของไดไวนิลเบนซีนที่เลขคลื่นประมาณ 996 cm^{-1} ซึ่งไม่พบพีกดังกล่าวในสเปกตรัมของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางที่แสดงในรูป 4.2(a) แสดงว่าวิธีการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้ เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน และเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางตามต้องการ



รูปที่ 4.1 FTIR spectrum ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

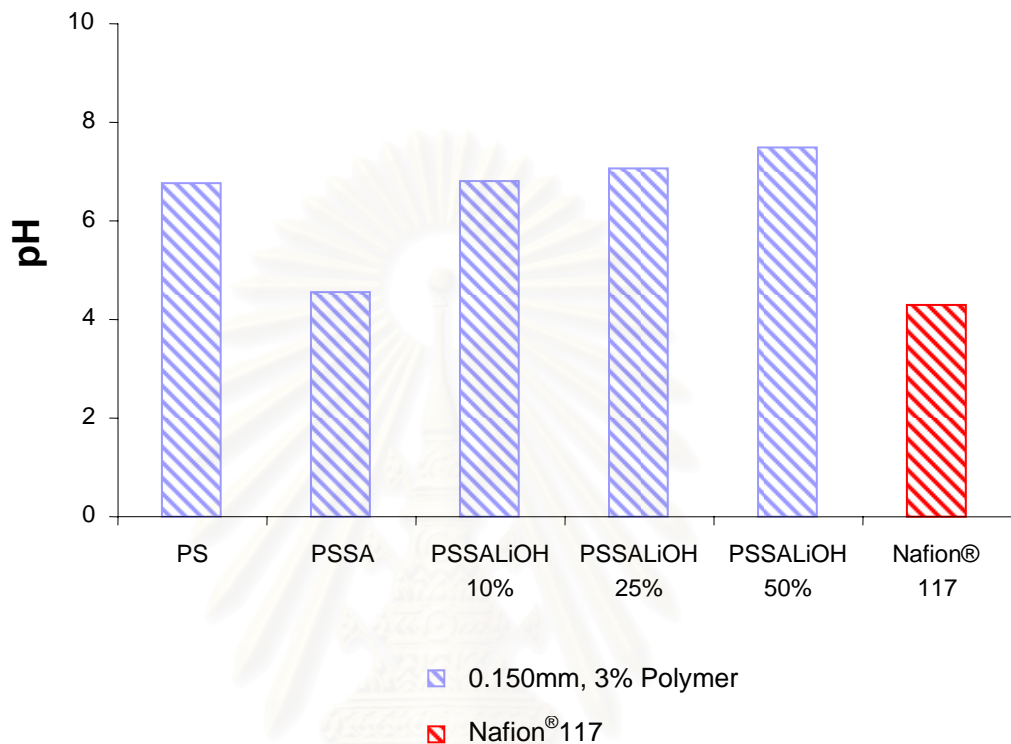


รูปที่ 4.2 FTIR spectra ของเยื่อแผ่นพอลิเอทิลีน (a) แบบไม่เชื่อมขวาง (b) แบบเชื่อมขวางด้วยไดไวไนลเบนซีน 7%

4.2 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม

รูปที่ 4.3 และตารางที่ ก.1 แสดงตัวอย่างค่าความเป็นกรด-ด่างของเยื่อแผ่นพอลิเอทิลีนไม่เชื่อมขวาง พบว่าเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.56 ต่ำกว่าของเยื่อแผ่นพอลิเอทิลีนซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.80 คาดว่าเนื่องจากผลของหมู่ซัลฟอนิกในเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิเอทิลีน และเมื่อทำการเติมลิเทียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 25 และ 50 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 6.80 7.05 และ 7.50 ตามลำดับ แสดงว่าประจุลบของหมู่ซัลฟอนิกในซัลโฟเนตพอลิเอทิลีนเกิดสมดุลด้วยประจุบวก

ของลิเทียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้น วิธีการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ สามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเกลือลิเทียมกับซัลโฟเนตพอลิสไตรีนได้จริง



รูปที่ 4.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางที่เติมลิเทียมไฮดรอกไซด์

4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.4 เป็นภาพ SEM ภาควัดตัดขวางของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนประเภทต่างๆ โดยมีรูปที่ 4.4 (a) เป็นของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง ซึ่งใช้เป็นภาพอ้างอิงเปรียบเทียบผลของการเชื่อมขวาง การทำซัลโฟเนชัน และการเติมเกลือ

ก) ผลของการเชื่อมขวาง

จากกลุ่มภาพทางขวาในรูปที่ 4.4 (b), (d) และ (f) เห็นว่าถึงแม้เยื่อแผ่นจะมีลักษณะ
สัณฐานวิทยาสม่ำเสมอเหมือนกันตลอดภาคตัดขวาง แต่แตกต่างจากเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ทำการเชื่อม
ขวาง (กลุ่มภาพทางซ้าย) อย่างชัดเจน โดยการเชื่อมขวางทำให้เนื้อพอลิเมอร์ไม่อยู่ชิดติดกัน แต่
เชื่อมกันเป็นร่างแหเหมือนฟองน้ำ จึงเกิดโพรงขึ้นทั่วไปในเยื่อแผ่น อนุภาคทรงกลมที่เห็นในรูปที่
4.4 (f) ของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนเชื่อมขวางและทำคอมโพสิตกับเกลีโอลิเทียมไฮดรอก-
ไซด์ คาดว่าเป็นอนุภาคของเกลีโอลิเทียมไฮดรอกไซด์ที่ตกค้างอยู่ในเยื่อแผ่นจากขั้นตอนการเตรียม
เยื่อแผ่น

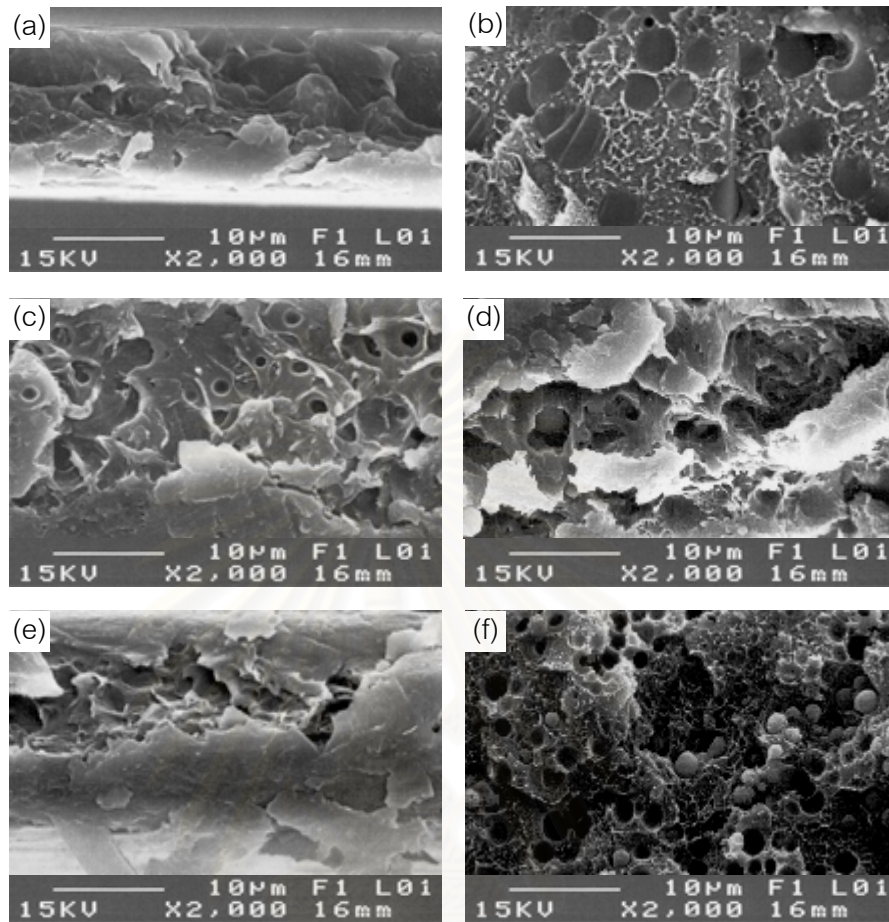
ข) ผลของการทำซัลโฟเนชัน

เยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางในรูปที่ 4.4 (c) ยังคงมีลักษณะเป็นเนื้อ
แน่นมีสมมาตรตลอดภาคตัดขวาง ไม่แตกต่างจากเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางในรูปที่ 4.4
(a)

ค) ผลของการเติมเกลีโอลิเทียม

เยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางและคอมโพสิตกับเกลีโอลิเทียม
ไฮดรอกไซด์ในรูปที่ 4.4 (e) ยังคงมีลักษณะเป็นแบบเนื้อแน่นมีสมมาตรตลอดภาคตัดขวางไม่
แตกต่างจากเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง ในรูปที่ 4.4 (a) เช่นเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 ภาพภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นพอลิเอทิลีน

- (a) เยื่อแผ่นพอลิเอทิลีนแบบไม่เชื่อมขวาง
- (b) เยื่อแผ่นพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7%
- (c) เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิเอทิลีนแบบไม่เชื่อมขวาง
- (d) เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7%
- (e) เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิเอทิลีนแบบไม่เชื่อมขวางและคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์
- (f) เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

4.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

โดยพื้นฐานของพอลิสไตรีนแล้วจะเป็นพอลิเมอร์ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Polymer) ซึ่งให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาต่ำมากหรือแทบจะไม่เกิดการบวมเกิดขึ้น จากรูปที่ 4.5 และ ตารางที่ ก.3 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนที่ไม่มีการเชื่อมขวางที่ความหนา 20 ไมโครเมตร เท่ากับ 1.5-3.3% และจากรูปที่ 4.6 และตารางที่ ก.3 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนที่ไม่มีการเชื่อมขวางที่ความหนา 30 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 0.6-1.7% พบว่ามีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเป็นไปในทำนองเดียวกับเยื่อแผ่นที่ความหนา 20 ไมโครเมตร แต่มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากโมเลกุลของน้ำไม่สามารถเข้าไปยังแก่นกลางของเยื่อแผ่นได้อย่างทั่วถึง ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายพอลิเมอร์ส่งผลเล็กน้อยต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา โดยความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายพอลิเมอร์ที่ร้อยละ 3 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาสูงกว่าร้อยละ 5 เนื่องจากโมเลกุลของพอลิสไตรีนอยู่ชิดกันน้อยกว่า ทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างง่ายขึ้น

ก) ผลของการเชื่อมขวาง

การเชื่อมขวางทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางไดไวนิลเบนซีนเพิ่มขึ้นในทุกๆ สูตร เนื่องจากการเชื่อมขวางทำให้เยื่อแผ่นบวมตัวได้ยากขึ้น ดังรูปที่ 4.7-4.8 และตารางที่ ก.7-ก.14 เช่น ที่ความเข้มข้นพอลิเมอร์ร้อยละ 3 การเปลี่ยนแปลงความหนาเมื่อปริมาณไดไวนิลเบนซีนเพิ่มขึ้นจาก 4% เป็น 7% ของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนลดลงจาก 1.7-3.3% เป็น $1.3 \pm 0.04\%$ และ $1.1 \pm 0.01\%$ ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนลดลงจาก 6.3-11.4% เป็น $7.4 \pm 0.1\%$ และ $4.7 \pm 0.1\%$ ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนและคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทตลดลงจาก 4.4-12.6% เป็น $4.1-6.0\%$ และ $3.5-4.6\%$ ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนและคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก 3.9-10.7% เป็น $5.1-7.4\%$ และ $3.0-5.2\%$ ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันที่ความเข้มข้นพอลิเมอร์ร้อยละ 5 การเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนลดลงจาก 0.6-1.5% เป็น $0.6 \pm 0.8\%$ และ $0.5 \pm 0.7\%$ ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนลดลงจาก 5.3-11.5% เป็น $4.7 \pm 0.2\%$ และ $4.0 \pm 0.7\%$ ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนและคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทตลดลงจาก 4.0-13.5% เป็น $4.1-5.5\%$ และ $3.8-4.8\%$ ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนและคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก 5.4-12.3% เป็น $4.4-5.6\%$ และ $2.7-4.9\%$ ตามลำดับ

ข) ผลของการทำซัลฟอนเนชัน

รูปที่ 4.5-4.6 และตารางที่ ก.4 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง ที่มีค่าอยู่ในช่วง 5.3-11.5% สูงกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผ่านการทำซัลฟอนเนชัน และใกล้เคียงกับของ Nafion® 117 ที่มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาอยู่ที่ 11.5±0.2% ขนาดของผงพอลิสไตรีน และความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ไม่มีนัยสำคัญต่อสมบัติการบวมตัวของเยื่อแผ่น แต่ความหนาของเยื่อแผ่นยังคงมีผล เนื่องจากโมเลกุลของน้ำไม่สามารถเข้าไปยังแก่นกลางของเยื่อแผ่นได้อย่างทั่วถึง โดยเยื่อแผ่นที่ความหนา 20 และ 30 ไมโครเมตร มีค่าอยู่ในช่วง 10.3-11.5% และ 5.3-6.5% ตามลำดับ

สำหรับเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาสูงกว่าของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง แต่น้อยกว่าของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.7-7.4% ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และตารางที่ ก.8 และ 4.0-4.7% ดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ ก.12 เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางไดไวนิลเบนซีนจากร้อยละ 4 เป็นร้อยละ 7 ตามลำดับ

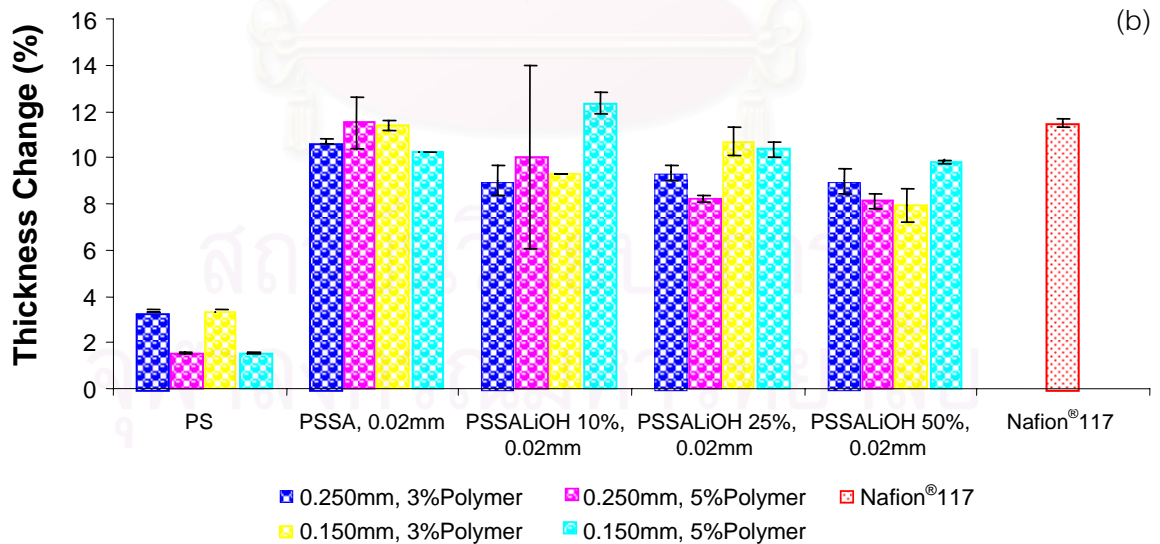
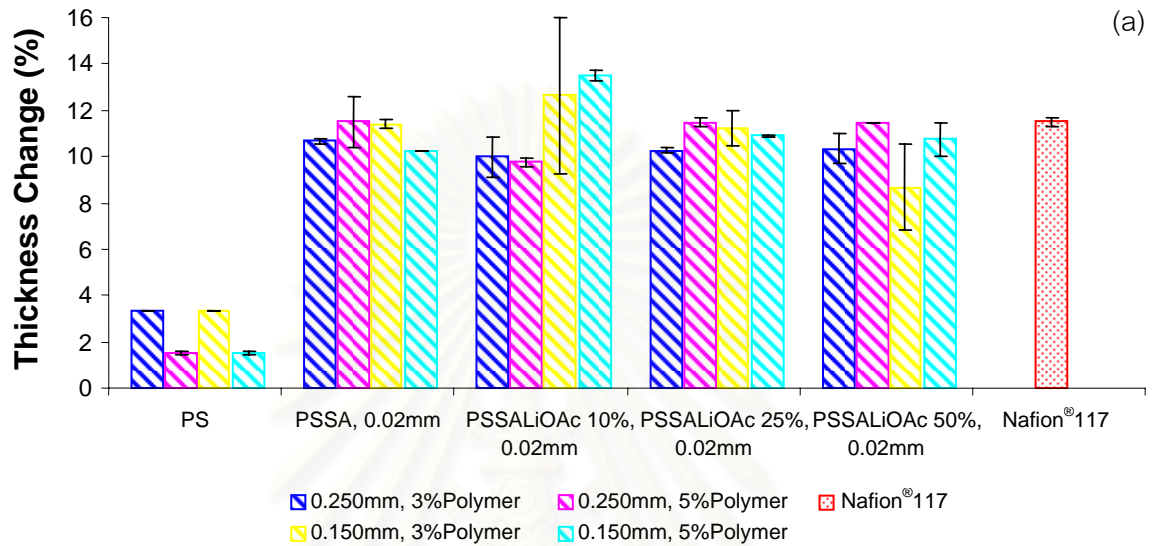
ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า วิธีการทำซัลฟอนเนชันในงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ เพราะการทำซัลฟอนเนชัน ทำให้พอลิเมอร์มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) มากขึ้น เยื่อแผ่นจึงดูดซับน้ำและบวมตัวได้มากขึ้น

ค) ผลของการเติมเกลือลิเทียม

รูปที่ 4.5-4.6 และตารางที่ ก.5-ก.6 แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวางที่เติมเกลือลิเทียม พบว่าไม่แตกต่างจากค่าของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง โดยไม่ขึ้นกับชนิดของเกลือลิเทียม และขนาดของผงพอลิสไตรีน แต่ขึ้นกับความหนาของเยื่อแผ่น โดยมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาอยู่ในช่วง 7.9-13.5% สำหรับเยื่อแผ่นที่หนา 20 ไมโครเมตร และ 3.9-10.4% สำหรับเยื่อแผ่นที่ความหนา 30 ไมโครเมตร เนื่องจากความหนาของเยื่อแผ่นที่บางกว่า โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าถึงแก่นกลางของเยื่อแผ่นได้อย่างทั่วถึง จึงมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาที่สูงกว่า

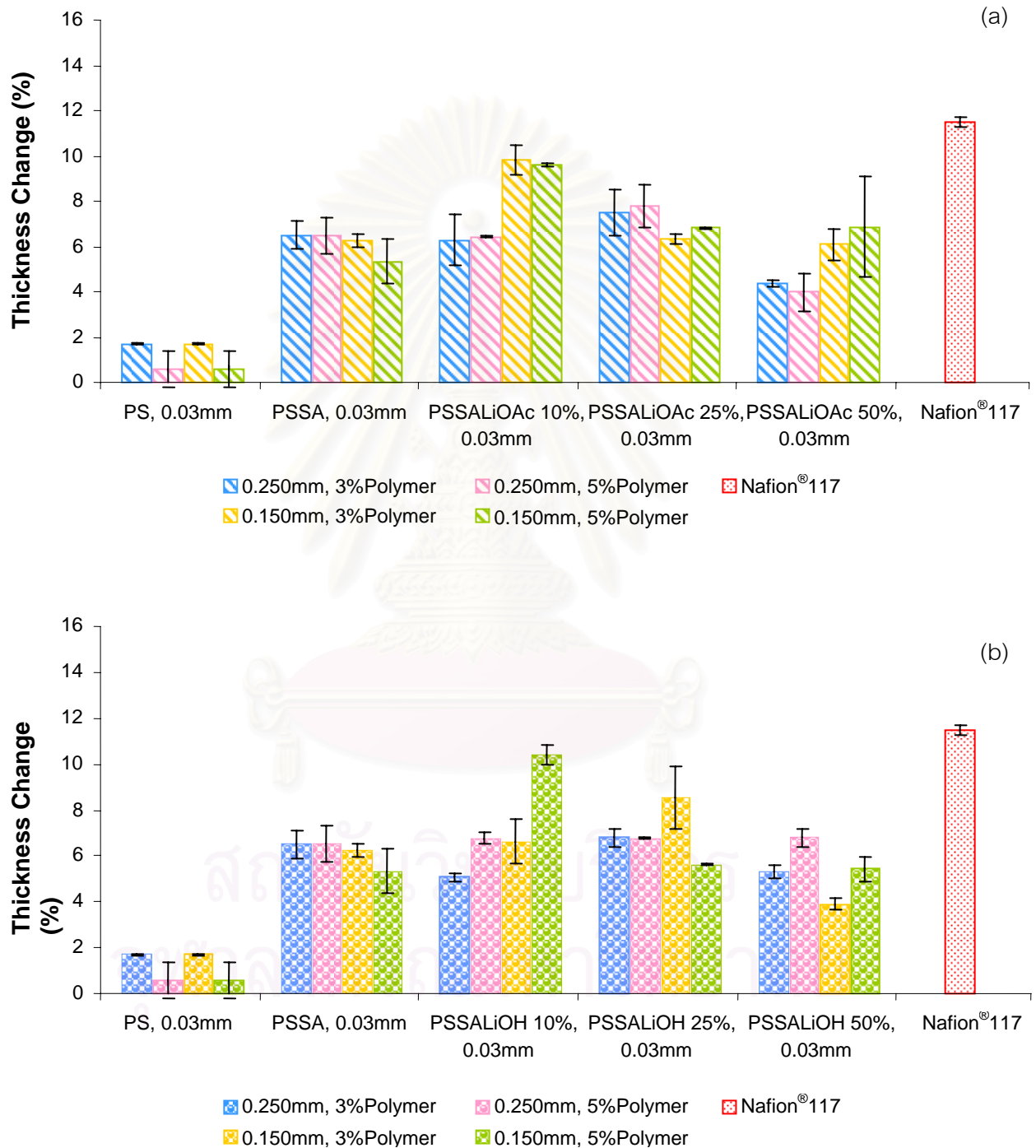
เช่นเดียวกัน การเติมเกลือไม่มีผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนทั้ง 4% และ 7% โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.1-7.4% ดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ ก.9-ก.10 (เทียบกับ 4.7-7.4% ในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 4) และมีค่าอยู่ในช่วง 2.7-5.2% ดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ ก.13-ก.14 (เทียบกับ 4.0-4.7% ในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วย

ไดไวเนลเบนซีนร้อยละ 7) ตามลำดับ โดยไม่ขึ้นกับปริมาณ หรือชนิดของเกลือลิเทียม และความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

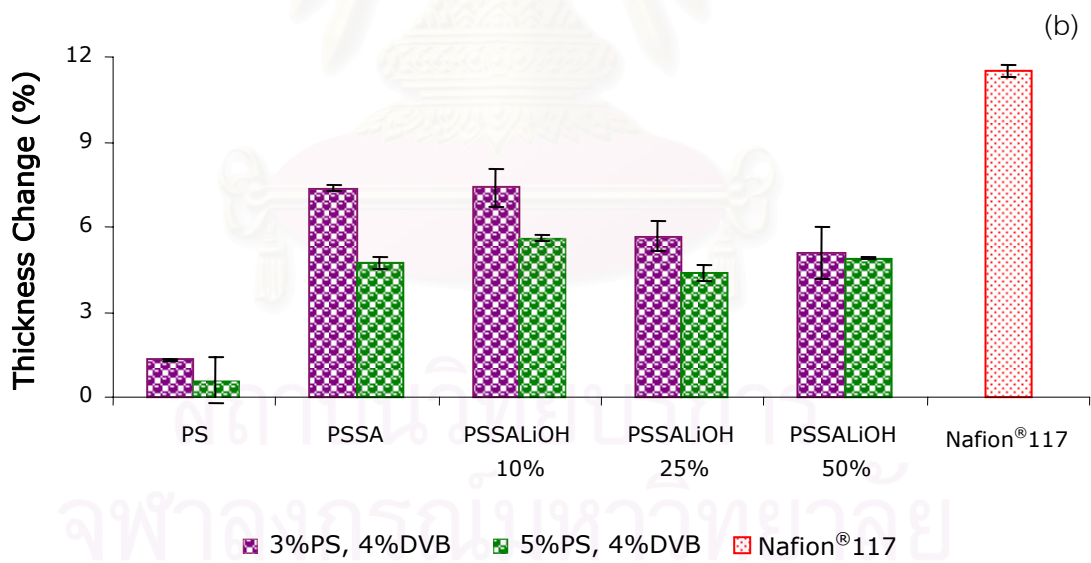
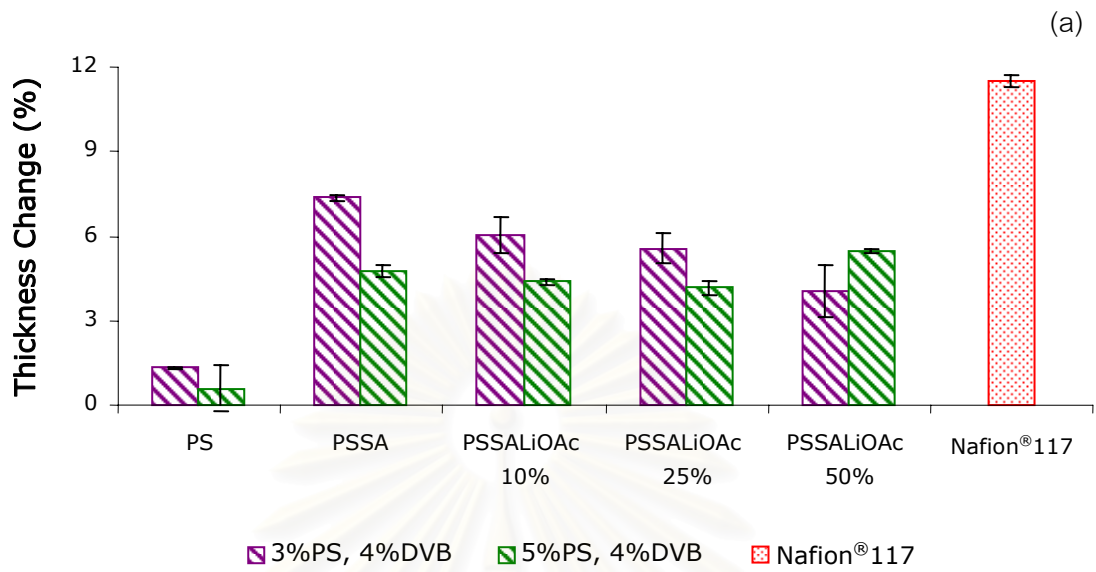


รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่มีการเชื่อมขวาง ความหนา 20 ไมโครเมตร และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

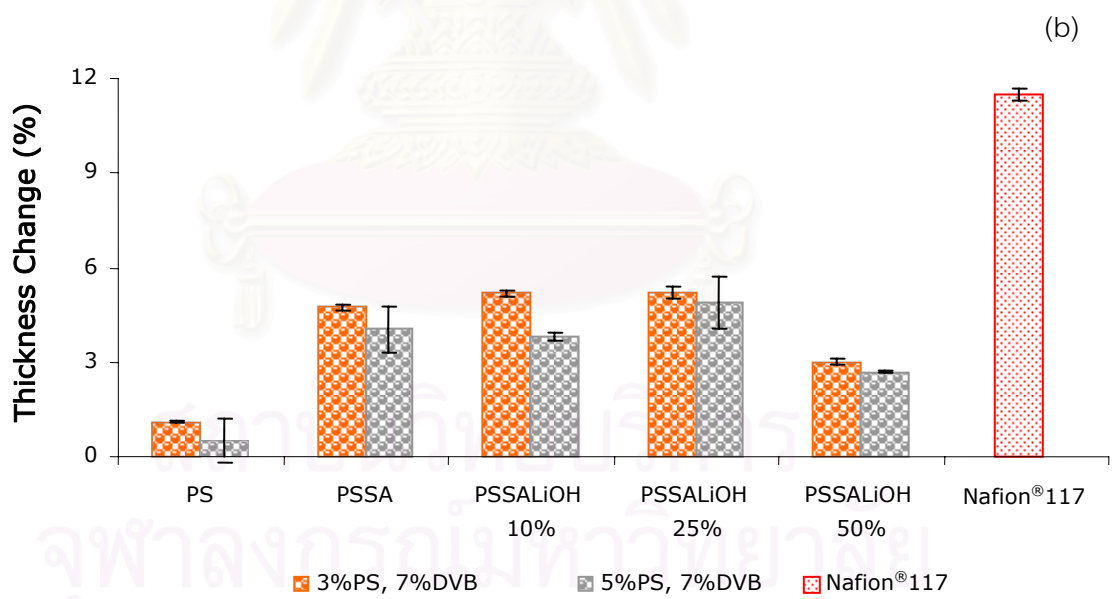
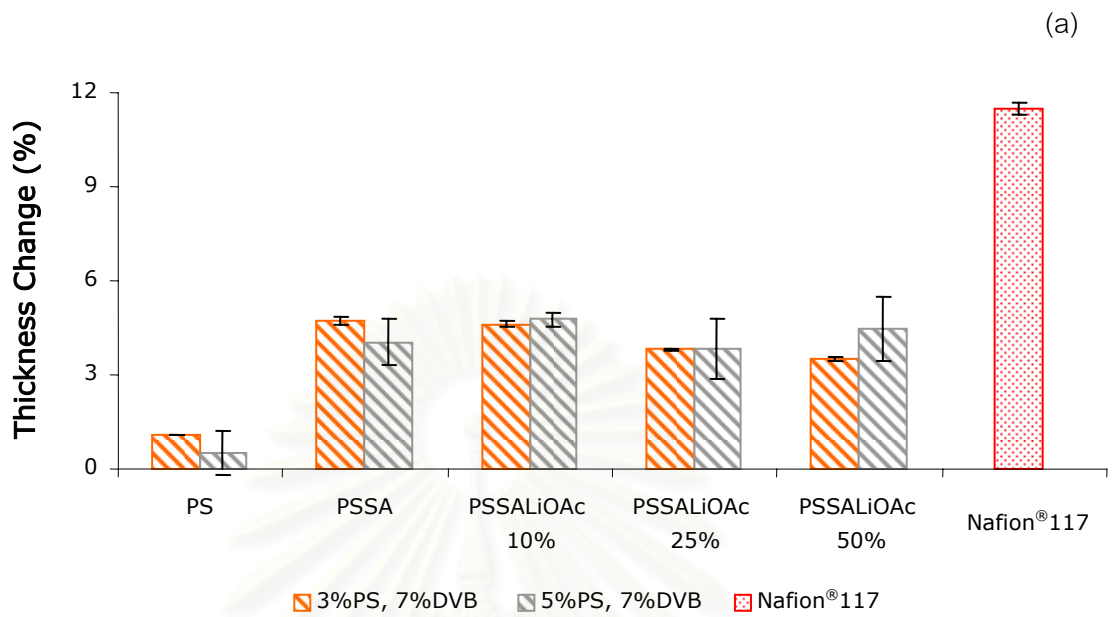
เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีค่าการบวมตัวน้อยกว่า Nafion® 117 ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นเซลล์เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ที่มีค่าการบวมตัว เท่ากับ $11.5 \pm 0.2\%$ แสดงว่าเยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นยังมีค่าการบวมตัวที่ค่อนข้างเหมาะสม



รูปที่ 4.6 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิไธรีนไม่มีการเชื่อมขวาง ความหนา 30 ไมโครเมตร และคอมโพสิตกับ (a) เกลีโอลิเทียมแอสซีเทต (b) เกลีโอลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.7 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิไธรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวโนลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.8 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิไอสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

4.5 ความทนแรงดึง

ความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิซไตรีนดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ ก.16 ที่ความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 3 และ 5 มีค่าเท่ากับ 19.1 ± 2.2 และ 23.8 ± 2.8 เมกะปาสกาล ตามลำดับ โดยไม่ขึ้นกับความหนาของเยื่อแผ่น พบว่า เยื่อแผ่นมีความทนแรงดึงมากขึ้น เมื่อมีเนื้อพอลิเมอร์มากขึ้น แต่ยังคงมีความทนแรงดึงน้อยกว่า Nafion[®] 117 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30.0 ± 2.8 เมกะปาสกาล

ก) ผลของการเชื่อมขวาง

การเชื่อมขวางทำให้ความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางไดไวนิลเบนซีนเพิ่มขึ้นในทุกๆ สูตร เนื่องจากการเชื่อมขวางทำให้เยื่อแผ่นแข็งแรงขึ้นแต่เปราะ ดังรูปที่ 4.10-4.11 และตารางที่ ก.20-ก.27 เช่น ที่ความเข้มข้นพอลิเมอร์ร้อยละ 3 ความทนแรงดึงเมื่อปริมาณไดไวนิลเบนซีนเพิ่มขึ้นจาก 4% เป็น 7% ของเยื่อแผ่นพอลิซไตรีนลดลงจาก 19.1 ± 2.2 เป็น 11.1 ± 0.4 และ 8.1 ± 0.4 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิซไตรีนลดลงจาก $19.9-23.3$ เป็น 7.1 ± 1.2 และ 10.3 ± 1.3 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิซไตรีนและเกิดคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทตลดลงจาก $16.9-22.2$ เป็น $7.6-9.6$ และ $5.4-11.1$ เมกะปาสกาล ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิซไตรีนและเกิดคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก $17.2-21.7$ เป็น $6.5-12.0$ และ $3.4-14.3$ เมกะปาสกาล ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันที่ความเข้มข้นพอลิเมอร์ร้อยละ 5 ความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิซไตรีนลดลงจาก 23.8 ± 2.8 เป็น 17.3 ± 1.7 และ 12.0 ± 1.1 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิซไตรีนลดลงจาก $19.3-21.4$ เป็น 9.6 ± 0.2 และ 13.5 ± 0.5 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิซไตรีนและเกิดคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทตลดลงจาก $15.9-24.5$ เป็น $9.0-10.0$ และ $9.2-10.0$ เมกะปาสกาล ตามลำดับ ของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิซไตรีนและเกิดคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก $17.3-23.4$ เป็น $9.2-11.7$ และ $5.2-8.5$ เมกะปาสกาล ตามลำดับ

ข) ผลของการทำซัลฟอนชัน

การทำซัลฟอนชันทำให้ความทนแรงดึงในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิซไตรีนแบบไม่เชื่อมขวางมีค่าอยู่ในช่วง $19.3-23.3$ เมกะปาสกาล โดยไม่ขึ้นกับขนาดของผงพอลิซไตรีน ความหนาของเยื่อแผ่น และความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่

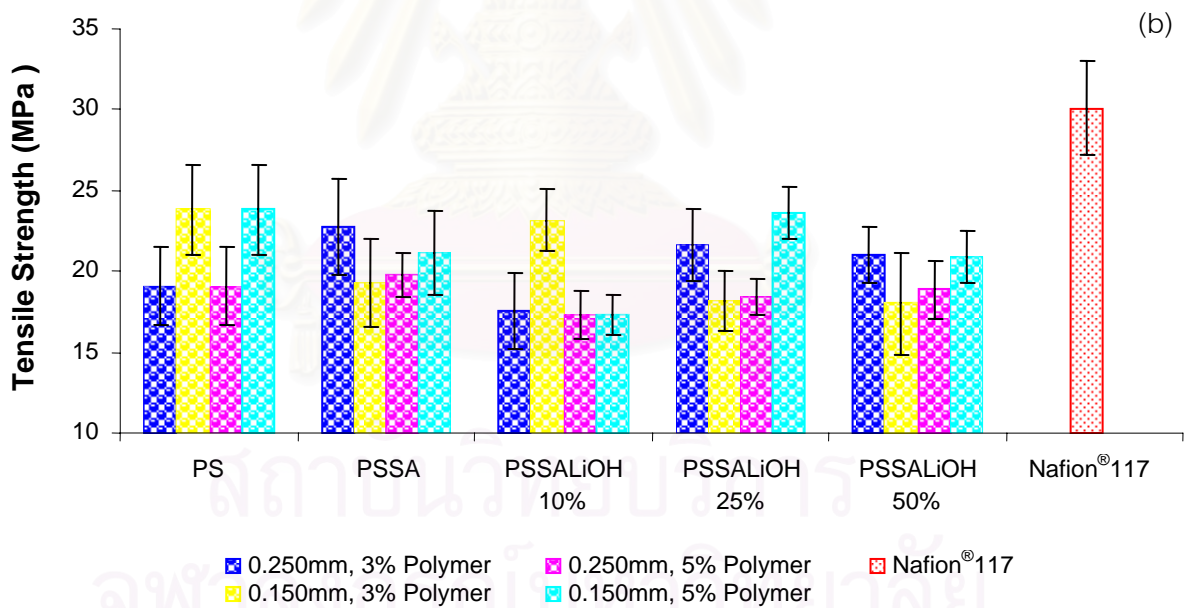
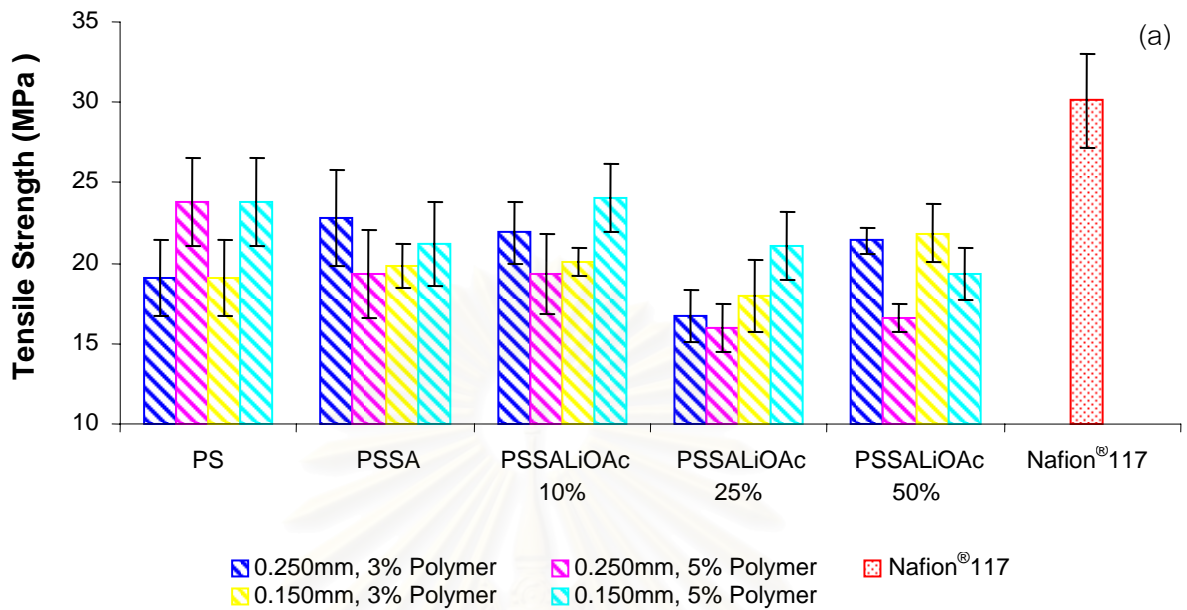
ก.17 อยู่ในช่วงเดียวกับของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง (19.1-23.8 เมกะปาสกาล) แสดงว่าการทำซัลฟอนชันไม่ได้ทำให้ความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นสูญเสียไป แต่มีผลต่อเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง โดยความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 4 มีค่าลดลงจากเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง 11.1 ± 0.4 และ 17.3 ± 1.7 เมกะปาสกาล เป็น 7.1 ± 1.2 และ 9.6 ± 0.3 เมกะปาสกาล ที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 3 และ 5 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ ก.20-ก.21 แต่ความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 7 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8.1 ± 0.4 และ 12.0 ± 1.1 เมกะปาสกาล เป็น 10.3 ± 1.3 และ 13.5 ± 0.5 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 3 และ 5 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และตารางที่ ก.24-ก.25

ค) ผลของการเติมเกลือลิเทียม

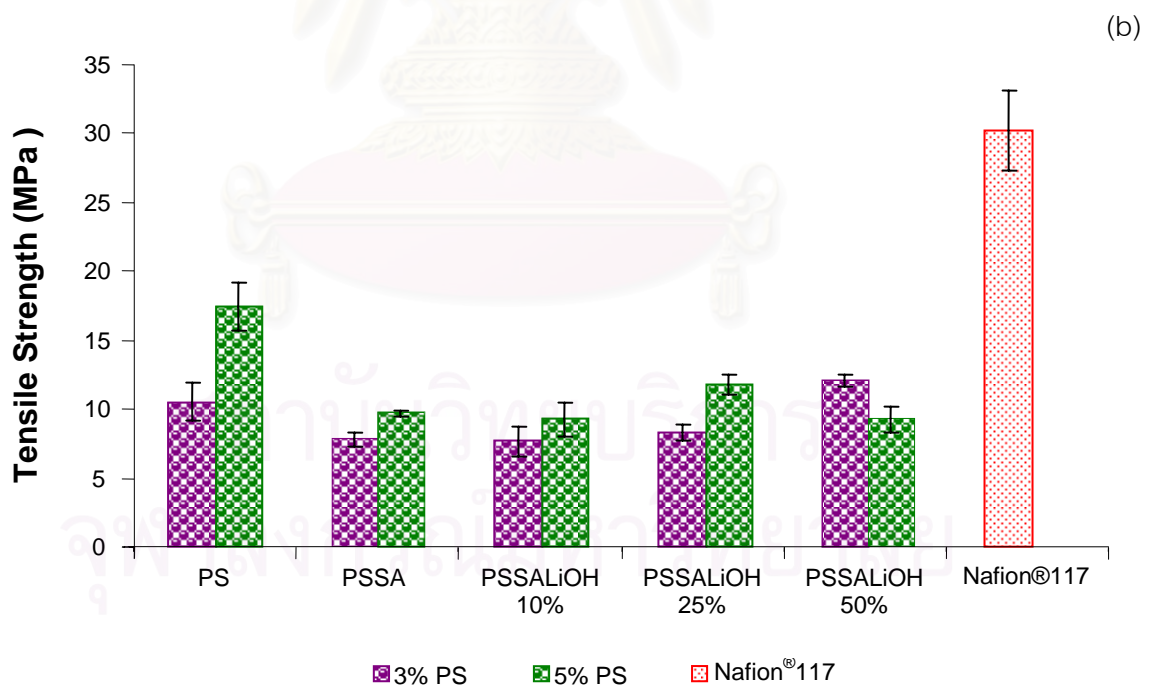
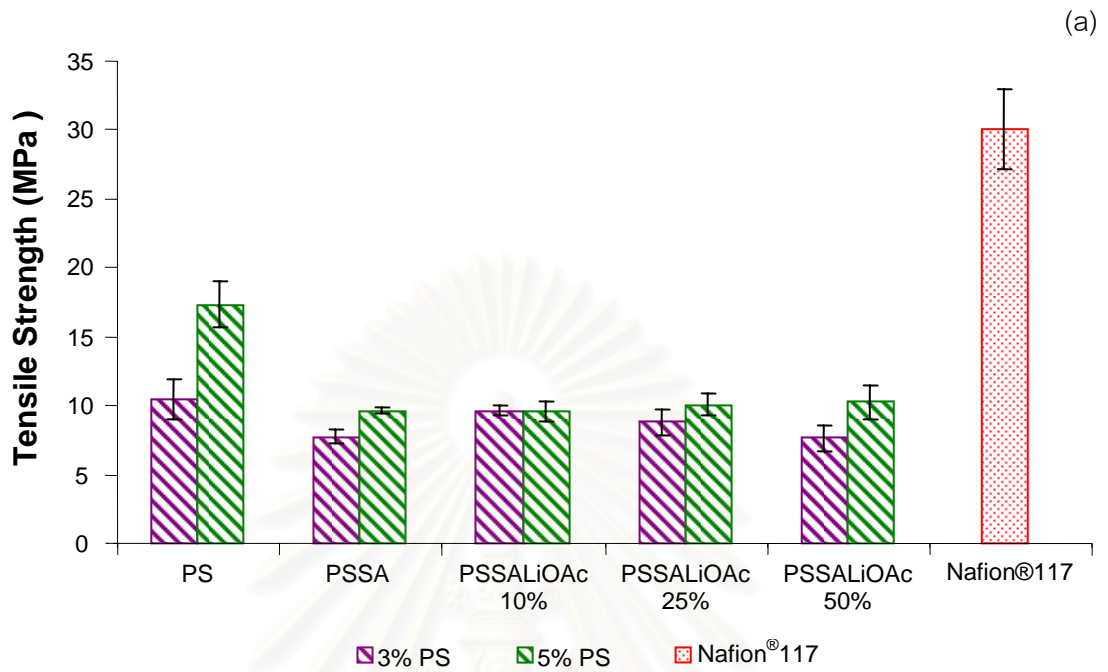
ความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวางและทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทต หรือกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์ มีค่าอยู่ในช่วง 15.9-24.5 และ 17.2-23.4 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ใกล้เคียงกับของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง (19.3-23.3 เมกะปาสกาล) แสดงว่าความทนแรงดึงไม่ขึ้นกับขนาดของผงพอลิสไตรีนหรือความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ หรือความหนาของเยื่อแผ่น หรือชนิดและปริมาณของเกลือลิเทียม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ ก.18-ก.19 ในทำนองเดียวกันสำหรับเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางและทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทต หรือกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์ พบว่าความทนแรงดึงมีค่าอยู่ในช่วง 7.6-10.0 และ 6.5-12.0 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ ก.22-ก.23 และมีค่าอยู่ในช่วง 5.4-11.1 และ 3.4-14.3 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 7 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และตารางที่ ก.26-ก.27

อย่างไรก็ตามอาจสรุปได้ว่า ชนิดและปริมาณของเกลือลิเทียมไม่มีผลต่อความทนแรงดึงในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนทั้งแบบไม่เชื่อมขวางและแบบเชื่อมขวาง

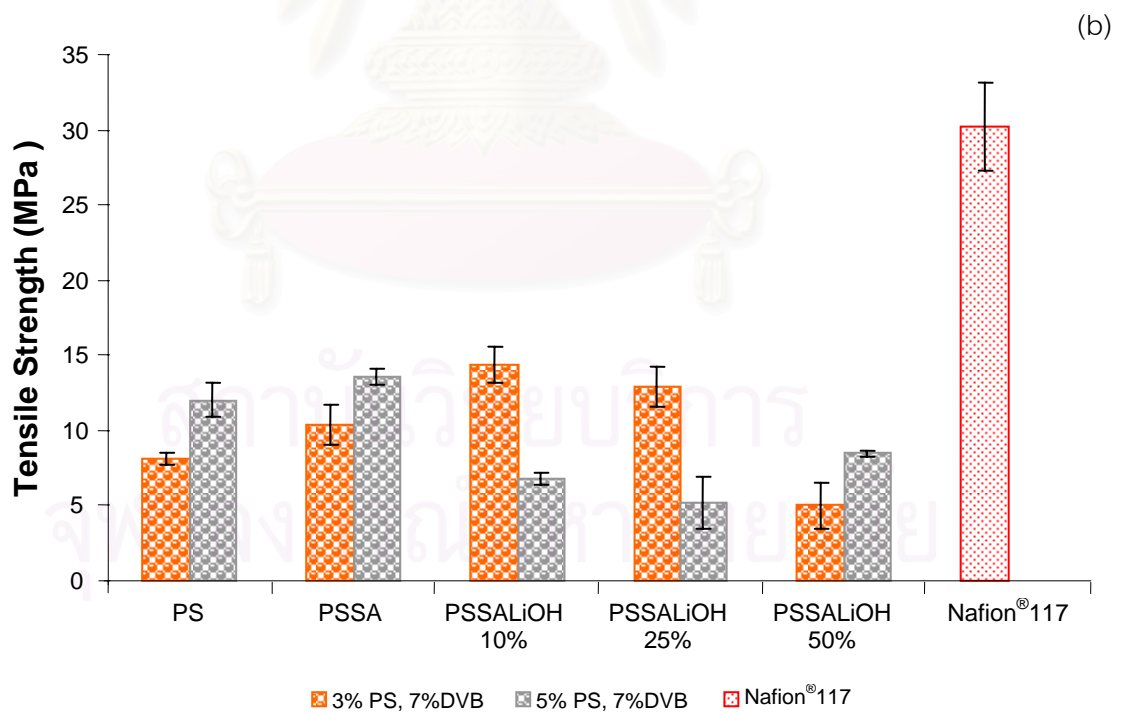
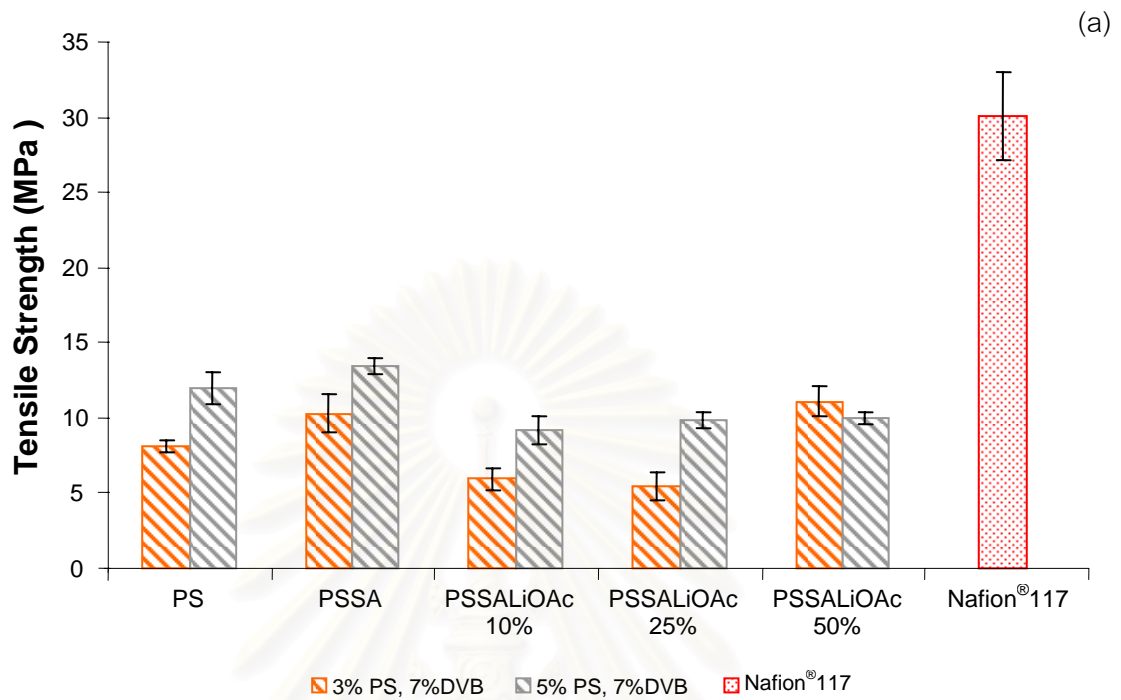
เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีค่าความทนแรงดึงน้อยกว่า Nafion[®] 117 ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นเซลล์เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ที่มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 30.1 ± 2.9 เมกะปาสกาล แสดงว่าเยื่อแผ่นทั้งหมดมีความแข็งแรงเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิไอสไตรีนไม่เชื่อมขวางและคอมโพสิตกับ
 (a) เกล็ดลิวเทียมแอสซีเทต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.10 ความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิไธรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอซีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.11 ความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิไอสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิวเทียมแอสีเตต (b) เกล็ดลิวเทียมไฮดรอกไซด์

4.6 อุณหภูมิการสลายตัว

ค่าอุณหภูมิการสลายตัวในงานวิจัยนี้ เป็นค่า Onset ของกราฟ TGA/DTA ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า เยื่อแผ่นทุกสูตรแสดงพีการสลายตัวเพียงพีกเดียว ดังแสดงในตารางที่ ก.28-ก.29 โดยเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง มีอุณหภูมิการสลายตัวเท่ากับ 408–409 องศาเซลเซียส โดยไม่ขึ้นกับขนาดของผงพอลิสไตรีน หรือความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

ก) ผลของการเชื่อมขวาง

การเชื่อมขวางทำให้เยื่อแผ่นมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากผลของหมู่ไดไวนิลเบนซีนที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการเหนียวทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์มีค่าลดลง โดยอุณหภูมิการสลายตัวของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนและเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน มีค่าลดลงจาก 408-409 เป็น 389 องศาเซลเซียส และจาก 419-428 เป็น 387 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 การเชื่อมขวางมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนและทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอซีเทต หรือกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์มีค่าลดลง เช่นเดียวกันจาก 423-427 เป็น 412-418 องศาเซลเซียส และจาก 411-429 เป็น 407-410 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ถึงแม้กราฟ TGA/DTA ของเยื่อแผ่นเชื่อมขวางยังคงแสดงพีการสลายตัวหลักเพียงพีกเดียวดังแสดงในตารางที่ ก.29 แต่สามารถเห็นการสูญเสียน้ำหนักเล็กน้อยก่อนเกิดการสลายตัวโดยสมบูรณ์ ซึ่งคาดว่าเนื่องจากเกิดการสลายของพันธะเชื่อมขวางก่อนการสลายตัวโดยสมบูรณ์

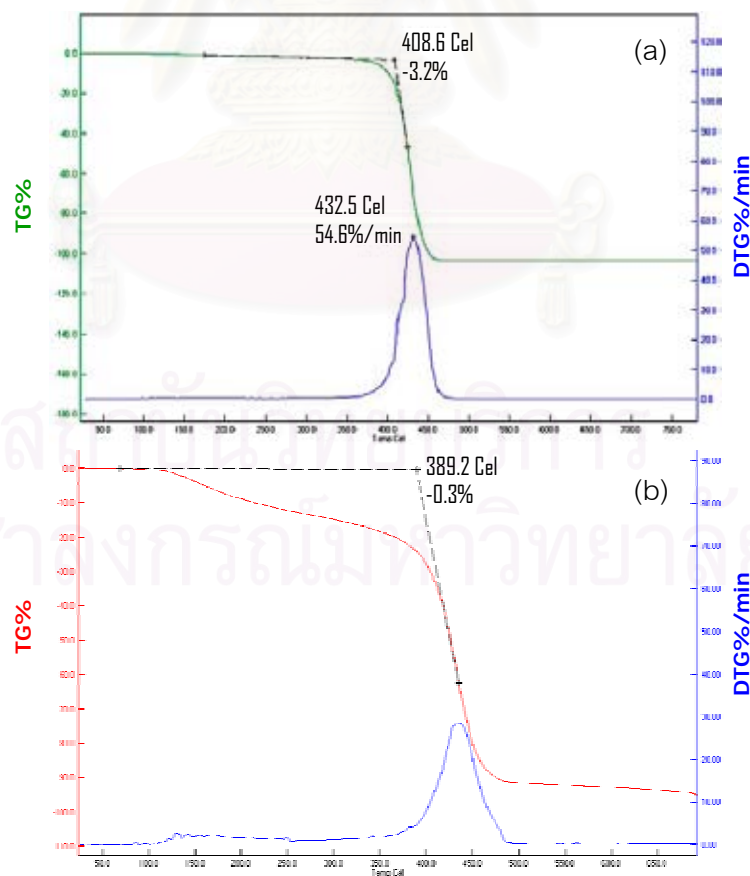
ข) ผลของการทำซัลฟอนชัน

การทำซัลฟอนชันแก่เยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง ทำให้เยื่อแผ่นมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น โดยค่าอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นจาก 408-409 เป็น 419-428 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เนื่องจากการทำซัลฟอนชันเป็นการเพิ่มหมู่ซัลฟอนิกเข้ากับวงเบนซีน และเกิดพันธะไฮโดรเจน จึงส่งผลให้เยื่อแผ่นมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น แต่เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง มีค่าอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกับของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเชื่อมขวางก่อนการทำซัลฟอนชัน ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ยึดเกี่ยวกันอย่างแข็งแรงจนการทำซัลฟอนชันไม่มีนัยสำคัญ

ค) ผลของการเติมเกลือลิเทียม

การเติมเกลือลิเทียมแอสซีเทต หรือเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์แก่เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวางไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของเยื่อแผ่น โดยมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วง 411-429 องศาเซลเซียส ไม่ขึ้นกับชนิดและปริมาณของเกลือ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

แต่การเติมเกลือลิเทียมแก่เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง กลับทำให้ค่าอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 387 เป็น 407-418 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แสดงว่า การเติมเกลือลิเทียมลงในซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง จะทำให้ลิเทียมไอออนเข้าไปรบกวนการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ แต่เนื่องจากผลของการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นลิเทียมไอออนจึงสามารถเกิดอันตรกิริยาที่แรงพอกับออกซิเจน ซึ่งมีสภาพเป็นขั้วลบในหมู่ซัลโฟนิลได้ ดังนั้นอุณหภูมิการสลายตัวจึงมีค่าสูงขึ้น โดยอุณหภูมิการสลายตัวไม่ว่าจะเป็นในกรณีของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางหรือที่เชื่อมขวาง จะไม่ขึ้นกับขนาดของผงพอลิสไตรีน และความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายพอลิเมอร์



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างกราฟอุณหภูมิการสลายตัวของเยื่อแผ่น
(a) แบบไม่เชื่อมขวาง (b) แบบเชื่อมขวาง

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติการสลายตัวของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	คุณสมบัติการสลายตัว (°C)			
	ความเข้มข้นพอลิเมอร์ 3%		ความเข้มข้นพอลิเมอร์ 5%	
	ขนาดเม็ด พอลิสไตรีน 150 ไมโครเมตร	ขนาดเม็ด พอลิสไตรีน 250 ไมโครเมตร	ขนาดเม็ด พอลิสไตรีน 150 ไมโครเมตร	ขนาดเม็ด พอลิสไตรีน 250 ไมโครเมตร
PS	408.6	408.6	407.6	407.6
PSSA	424.2	419.3	428.5	423.0
PSSA + 10%LiOAc	424.8	423.1	425.4	425.9
PSSA + 25%LiOAc	425.4	422.5	426.7	422.9
PSSA + 50%LiOAc	424.4	424.4	425.1	423.4
PSSA + 10%LiOH	429.0	413.5	427.5	421.3
PSSA + 25%LiOH	426.0	419.2	426.7	420.7
PSSA + 50%LiOH	422.5	415.2	414.8	410.9

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติการสลายตัวของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	คุณสมบัติการสลายตัว (°C)
3% PS	389.2
3% PSSA	387.5
3% PSSA + 10%LiOAc	418.5
3% PSSA + 25%LiOAc	417.9
3% PSSA + 50%LiOAc	412.0
3% PSSA + 10%LiOH	410.0
3% PSSA + 25%LiOH	406.9
3% PSSA + 50%LiOH	407.6

4.7 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวาง มีค่าเท่ากับ 0.39 ± 0.09 มิลลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น โดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์และความหนาของเยื่อแผ่น ขณะที่ของ Nafion® 117 มีค่าเท่ากับ 5.0 ± 0.7 มิลลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น ซึ่งการเชื่อมขวาง หรือการทำซัลฟอนชัน หรือการเติมเกลือลิเทียมมีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนี้

ก) ผลของการเชื่อมขวาง

การเชื่อมขวางเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และ 7% ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.54-0.55 มิลลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น (ดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ ก.35) และ 0.57-0.61 มิลลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น (ดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ ก.39) ตามลำดับ แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าเยื่อแผ่น Nafion® 117 เนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุ ดังนั้นการเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนซึ่งเป็นสารที่ไม่มีประจุจึงไม่ได้ช่วยทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงขึ้น

แต่การเชื่อมขวางเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงขึ้น จาก 2.41-3.66 เป็น 4.68-4.75 และ 4.74-5.69 มิลลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น ด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และ 7% ตามลำดับ สูงกว่าของเยื่อแผ่น Nafion® 117 แสดงว่าการเชื่อมขวางทำให้ปฏิกิริยาซัลฟอนชันมีประสิทธิผลยิ่งขึ้นตามที่คาดหวังไว้ในการวางแผนการทดลอง

ข) ผลของการทำซัลฟอนชัน

เมื่อทำซัลฟอนชันแก่พอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 2.7-3.1 มิลลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น (ดังรูป 4.13 และตารางที่ ก.32) และ 2.4-3.7 มิลลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น (ดังรูป 4.14 และตารางที่ ก.32) ในเยื่อแผ่นที่มีความหนา 20 และ 30 ไมโครเมตร ตามลำดับ เนื่องจากเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วทางไฟฟ้า ในทำนองเดียวกันสำหรับเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางในรูปที่ 4.15 (หรือตารางที่ ก.36) และ รูปที่ 4.16 (หรือตารางที่ ก.40) ด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และ 7% พบว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยน

ไอออนสูงขึ้นจากเยื่อแผ่นพอลิไธรีนเชื่อมขวาง 0.54-0.55 เป็น 4.7-4.8 มิลลิลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น และจาก 0.57-0.61 เป็น 4.7-5.7 มิลลิลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ

กล่าวได้ว่างานวิจัยนี้ ประสบความสำเร็จในการเตรียมเยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิไธรีนทั้งแบบไม่เชื่อมขวาง และแบบเชื่อมขวาง เพราะความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นทั้ง 2 ประเภท แตกต่างจากค่าของเยื่อแผ่นพอลิไธรีนที่ไม่ได้ทำซัลโฟเนชันอย่างมาก โดยขนาดของผงพอลิไธรีน หรือความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์ หรือความหนาของเยื่อแผ่น ไม่มีผลต่อการทำซัลโฟเนชันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังให้ผลสอดคล้องกับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำกว่าเยื่อแผ่นชนิดอื่นๆ ดังกล่าวในหัวข้อ 4.2

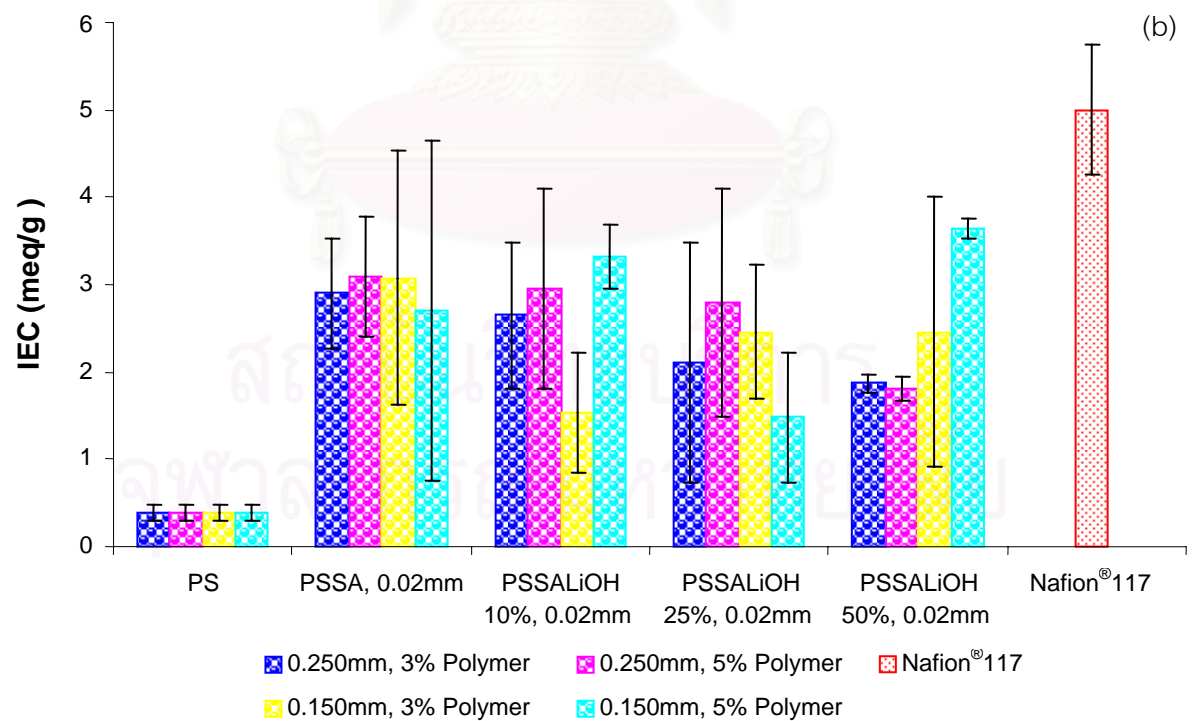
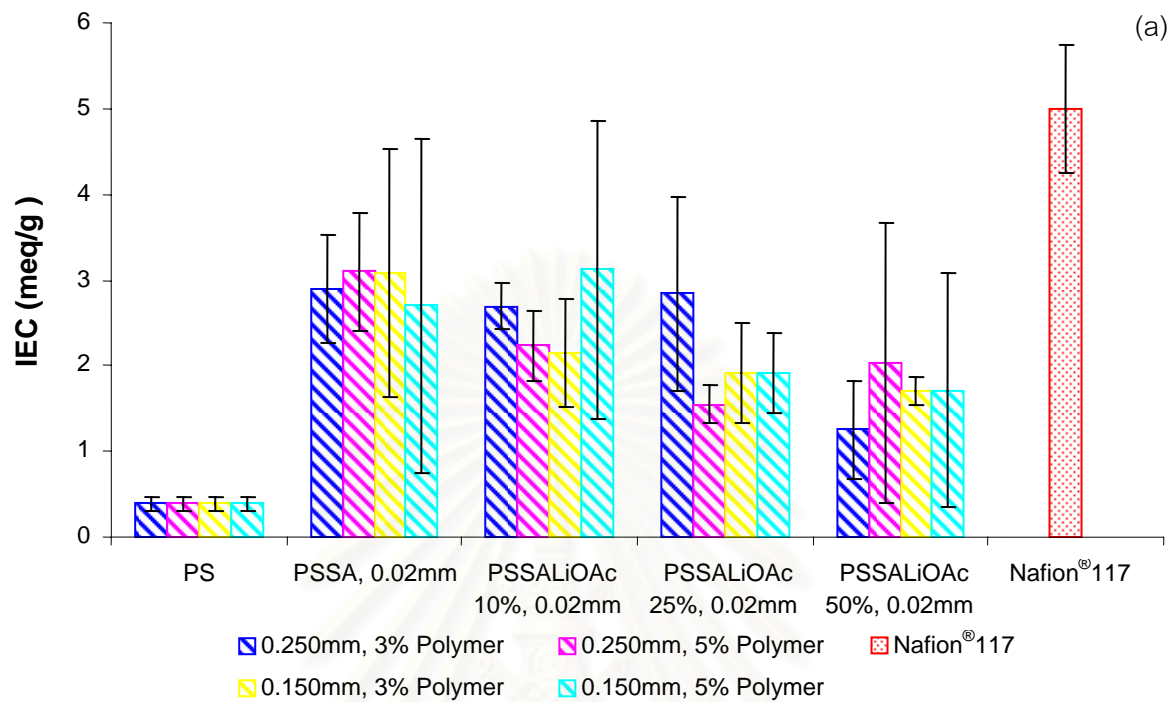
ค) ผลของการเติมเกลือ

เนื่องจากหมู่ซัลโฟนิคจากการทำซัลโฟเนชันเป็นกรดแก่ การทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทตซึ่งเป็นด่างอ่อน จึงส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแตกต่างจากการทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นด่างแก่ ในเยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิไธรีนแบบไม่เชื่อมขวางและทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียม พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือลิเทียมแอสซีเทตจากร้อยละ 10, 25 และ 50 ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงเล็กน้อยอธิบายได้ว่า เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นมีจำนวนจำกัด การใช้สารละลายเกลือลิเทียมที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น เยื่อแผ่นแสดงความเป็นด่างสูงขึ้นเล็กน้อยตามที่กล่าวในหัวข้อ 4.2 ดังนั้นสารละลายไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจึงถูกใช้ไปเล็กน้อย การแลกเปลี่ยนแอสซีเททไอออนกับไฮดรอกไซด์ไอออนบนสายโซ่พอลิเมอร์เท่านั้น เมื่อไทเทรตกลับด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในขั้นตอนการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน จึงทำให้ค่าที่ได้ลดลง โดยเยื่อแผ่นที่หนา 20 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 2.2-3.1, 1.6-2.8 และ 1.3-2.0 มิลลิลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.13 (a) และตารางที่ ก.33 ในขณะที่เยื่อแผ่นหนา 30 ไมโครเมตร จากรูปที่ 4.14 (a) และตารางที่ ก.33 จะมีค่าเท่ากับ 1.6-3.7, 1.9-3.8 และ 1.9-2.8 มิลลิลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ และการเพิ่มปริมาณลิเทียมไฮดรอกไซด์จากร้อยละ 10, 25 และ 50 ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลงโดยเยื่อแผ่นที่หนา 20 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูป 4.13 (b) และตารางที่ ก.34 มีค่าเท่ากับ 1.5-3.3, 1.5-2.8 และ 1.8-3.7 มิลลิลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ และที่เยื่อแผ่นหนา 30 ไมโครเมตร จากรูปที่ 4.14 (b) และตารางที่ ก.34 จะให้ค่าอยู่ที่ 1.8-3.2, 1.9-3.0 และ 1.3-2.7 มิลลิลิสมมูลย์/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ

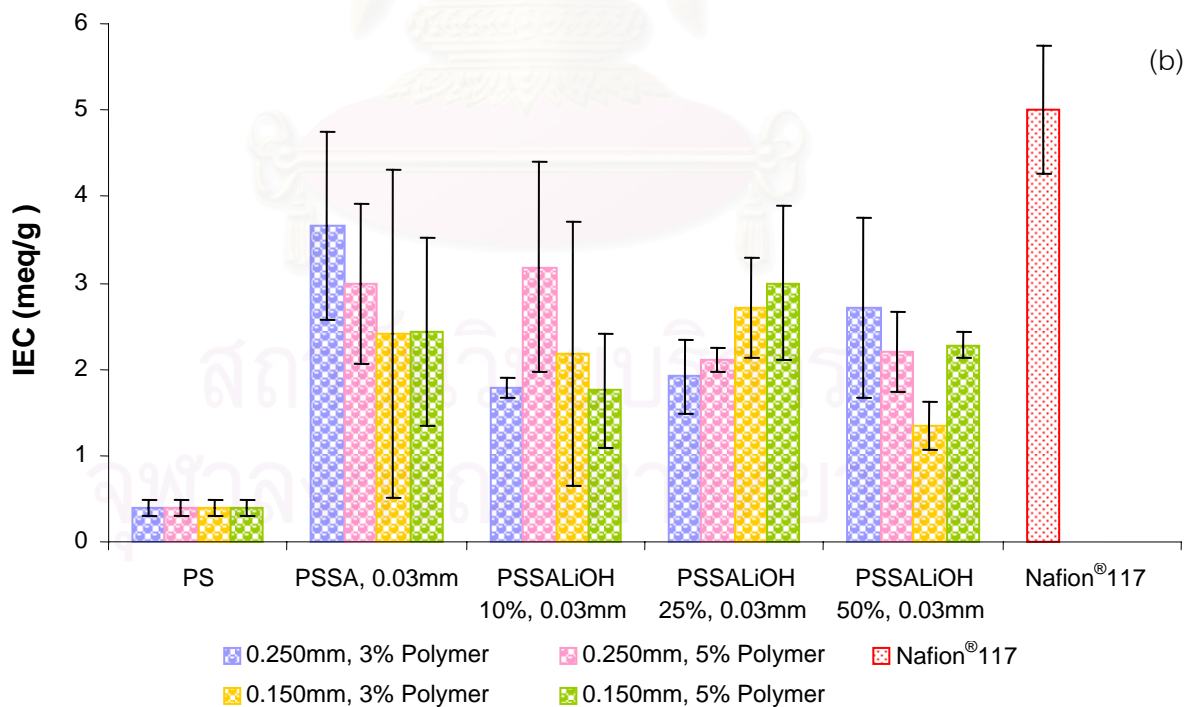
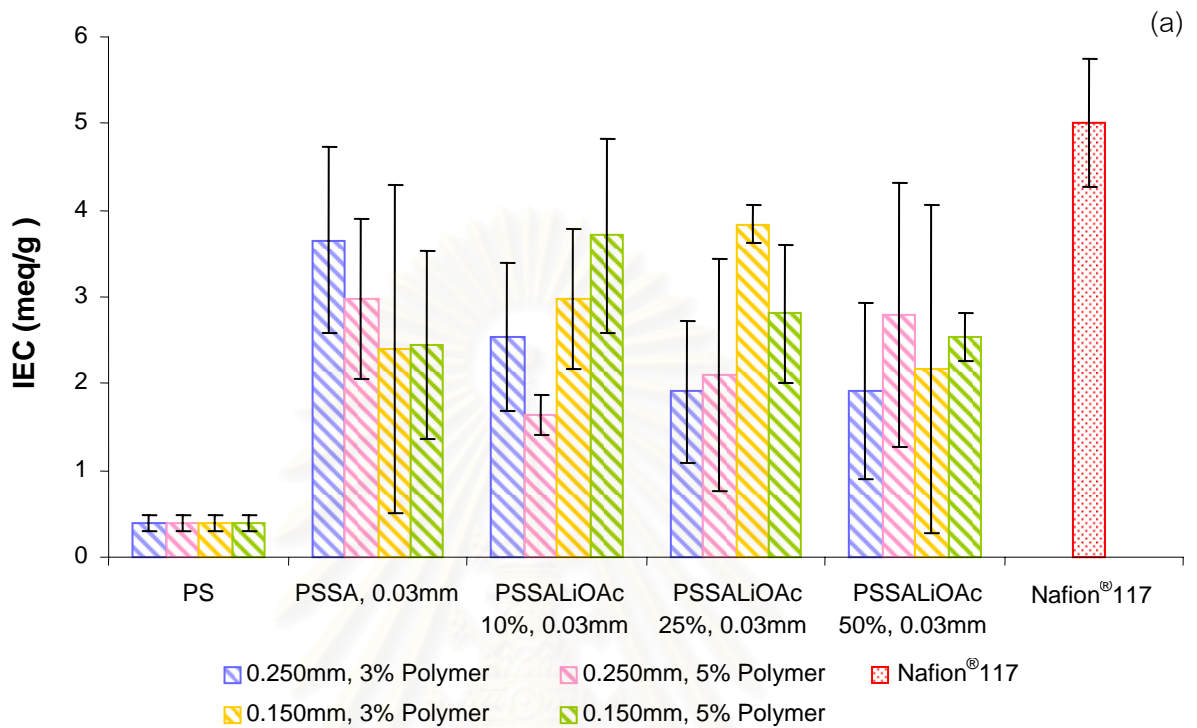
ผลของความเป็นต่างแก่ของลิเทียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนน้อยกว่าการทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสีเทต โดยมีค่าเท่ากับ 2.3 ± 0.1 และ 2.4 ± 0.3 มิลลิลิตรสมมูล/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ

ผลการทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมในเยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือลิเทียมแอสีเทตจากร้อยละ 10, 25 และ 50 ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 2.5–4.6, 2.4–3.8 และ 1.2–2.1 มิลลิลิตรสมมูล/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 (a) และตารางที่ ก.37 การเพิ่มปริมาณลิเทียมไฮดรอกไซด์ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 3.2–3.8, 1.6–1.7 และประมาณ 1.4 มิลลิลิตรสมมูล/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (b) และตารางที่ ก.38 ผลการทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมในเยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% จากรูปที่ 4.16 (a) และตารางที่ ก.41 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเกลือลิเทียมแอสีเทตจากร้อยละ 10, 25 และ 50 ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 5.2–5.4, 4.5–5.3 และ 2.5–2.7 มิลลิลิตรสมมูล/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ และการเพิ่มปริมาณลิเทียมไฮดรอกไซด์ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 2.4–3.1, ประมาณ 1.9 และ 1.5–1.8 มิลลิลิตรสมมูล/กรัมของเยื่อแผ่น ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (b) และตารางที่ ก.42

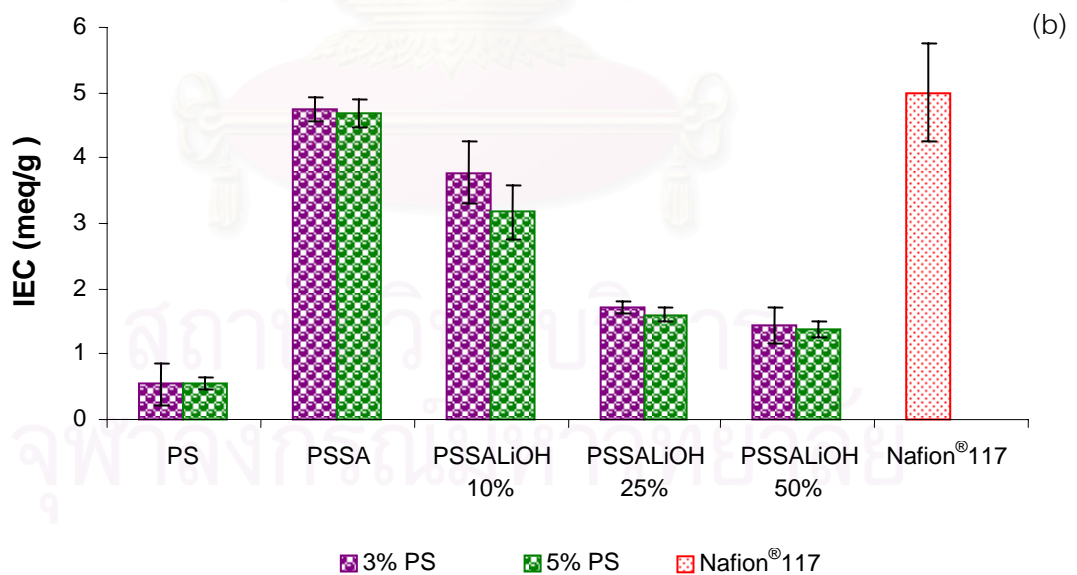
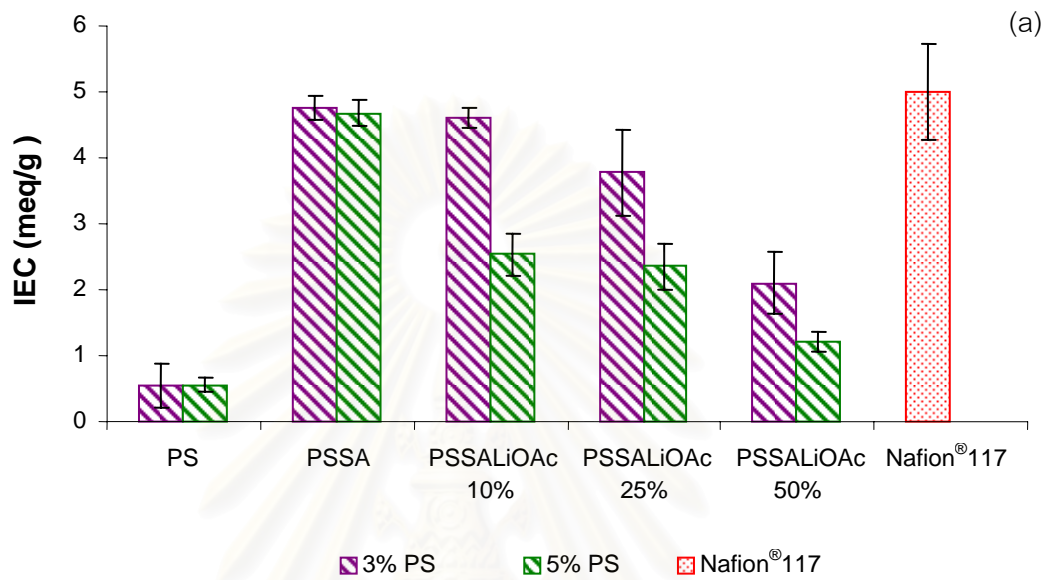
เมื่อพิจารณาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้น พบว่า สูตรของเยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% ที่ไม่มีการเติมเกลือกับสูตรที่เติมเกลือลิเทียมแอสีเทตร้อยละ 10 และ 25 เท่านั้นที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่า Nafion[®] 117 ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นเซลล์เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์



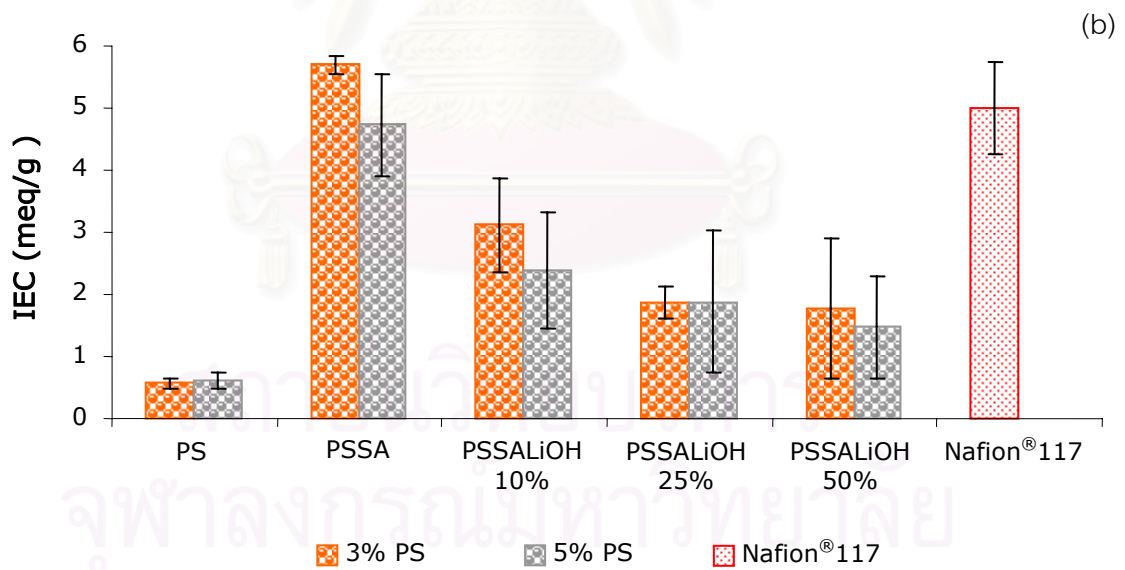
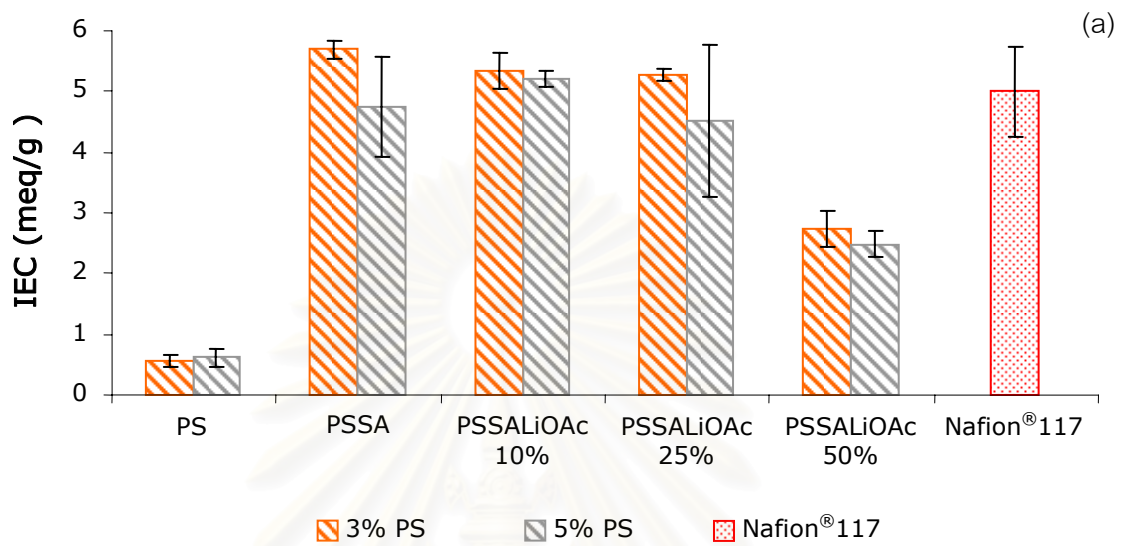
รูปที่ 4.13 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิไธรีนไม่เชื่อมขวาง ความหนา 20 ไมโครเมตร และคอมโพสิตกับ (a) เกล็ดลิเทียมแอสีเทต (b) เกล็ดลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.14 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิस्टาไทรีนไม่เชื่อมขวาง ความหนา 30 ไมโครเมตร และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเตต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิไสตรีนเชื่อมขวางด้วย ไดไวเนลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับ (a) ที่เติมเกลือลิเทียมแอสีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.16 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิซไตรีนเชื่อมขวางด้วย ไตไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิต (a) เกลือลิเทียมแอสซีเตต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

4.8 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

รูปที่ 4.17 และตารางที่ ก.43 แสดงค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิไธรีนแบบไม่เชื่อมขวาง พบว่าความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายพอลิเมอร์มีผลต่อค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายพอลิเมอร์จากร้อยละ 3 เป็น 5 ทำให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 373 ± 34 และ 233 ± 14 บาร์เรอร์ ตามลำดับ เนื่องจากที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายพอลิเมอร์สูงส่งผลให้ปริมาณโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น ดังนั้นการซึมผ่านของแก๊สจึงเป็นไปได้ยากขึ้น

ก) ผลของการเชื่อมขวาง

การเชื่อมขวางทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกี่ยวกันเป็นร่างแหที่แข็งแรง เกิดเป็นช่องว่างชัดเจน ทำให้โมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านได้ง่ายขึ้น ค่าการซึมผ่านของแก๊สของเยื่อแผ่นแบบเชื่อมขวางทุกสูตรจึงมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.18 และตารางที่ ก.44 ของการเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 4 และรูปที่ 4.19 และตารางที่ ก.45 ของการเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 7 คือ ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นพอลิไธรีนเพิ่มขึ้นจาก 233-373 เป็น 611-752 และ 691-786 บาร์เรอร์ ตามลำดับ ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไธรีนเพิ่มขึ้นจาก 339-552 เป็น 735-781 และ 505-655 บาร์เรอร์ ตามลำดับ แต่ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไธรีนและทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมมีการแกว่งจาก 202-829 เป็น 333-586 และ 315-531 บาร์เรอร์ ตามลำดับ

ข) ผลของการทำซัลฟอนชัน

รูปที่ 4.17 และตารางที่ ก.43 แสดงค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไธรีนแบบไม่เชื่อมขวาง พบว่า การทำซัลฟอนชันทำให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้นจาก 373 ± 34 เป็น $470-481$ บาร์เรอร์ ที่ความเข้มข้นสารละลายร้อยละ 3 และจาก 233 ± 14 เป็น $339-552$ บาร์เรอร์ ที่ความเข้มข้นสารละลายร้อยละ 5 เนื่องจากการที่หมู่ซัลฟอนิกเข้าไปเกาะที่วงเบนซีนในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้การปรับตัวของสายโซ่เป็นไปได้ยากขึ้นจากการเกาะของหมู่ซัลฟอนิก ค่าการซึมผ่านของแก๊สจึงมีค่าสูงขึ้น ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไธรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 4 ในรูปที่ 4.18 และตารางที่ ก.44 สูงขึ้นจาก 752 ± 14 เป็น 781 ± 68 บาร์เรอร์ ที่ความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 3 และจาก 611 ± 56 เป็น 735 ± 69 บาร์เรอร์ ที่ความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 5

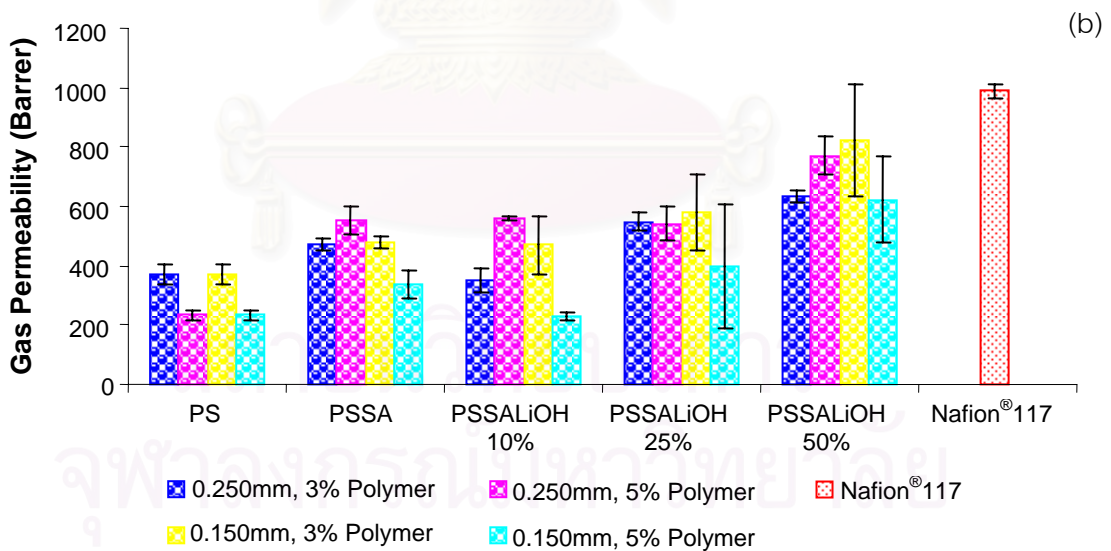
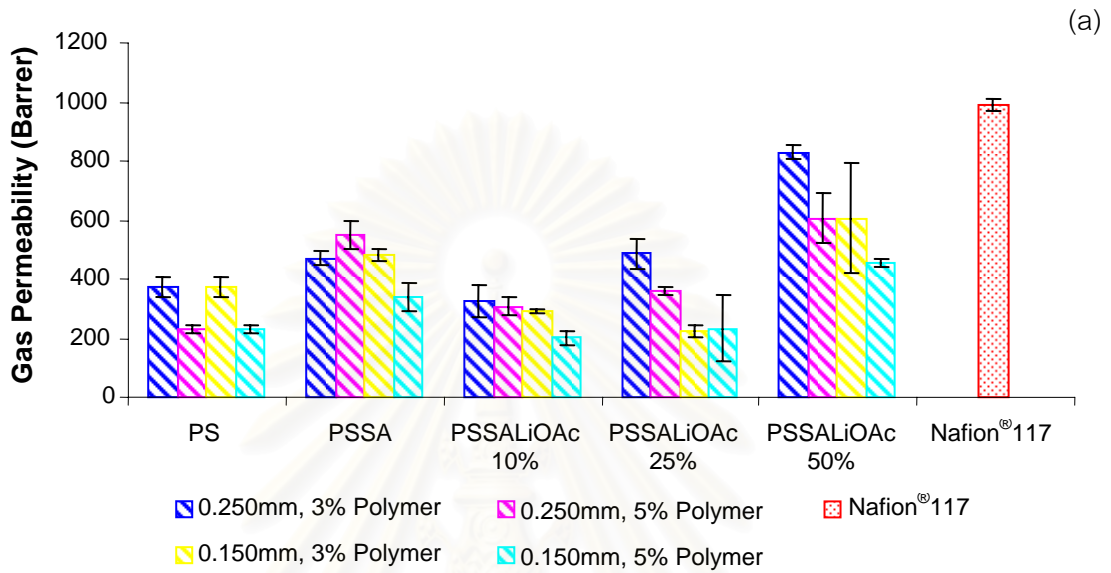
สำหรับเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 7 ในรูปที่ 4.19 และ ตารางที่ ก.45 มีค่าต่ำลงจาก 786 ± 22 เป็น 655 ± 67 บาร์เรอร์ และจาก 691 ± 12 เป็น 505 ± 7 บาร์เรอร์ ที่ความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอรร้อยละ 3 และ 5 ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากผลของ หมู่ซัลฟอนิลไม่ได้เกาะกันในสายโซ่พอลิเมอร์ แต่ช่วยปิดช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมขวาง

ค) ผลของการเติมเกลือ

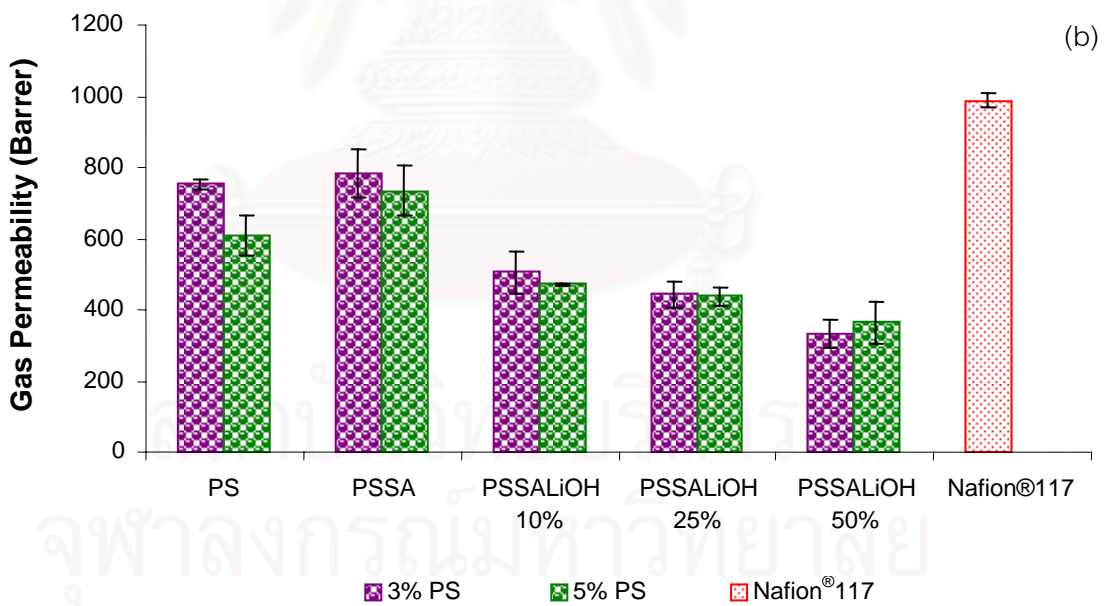
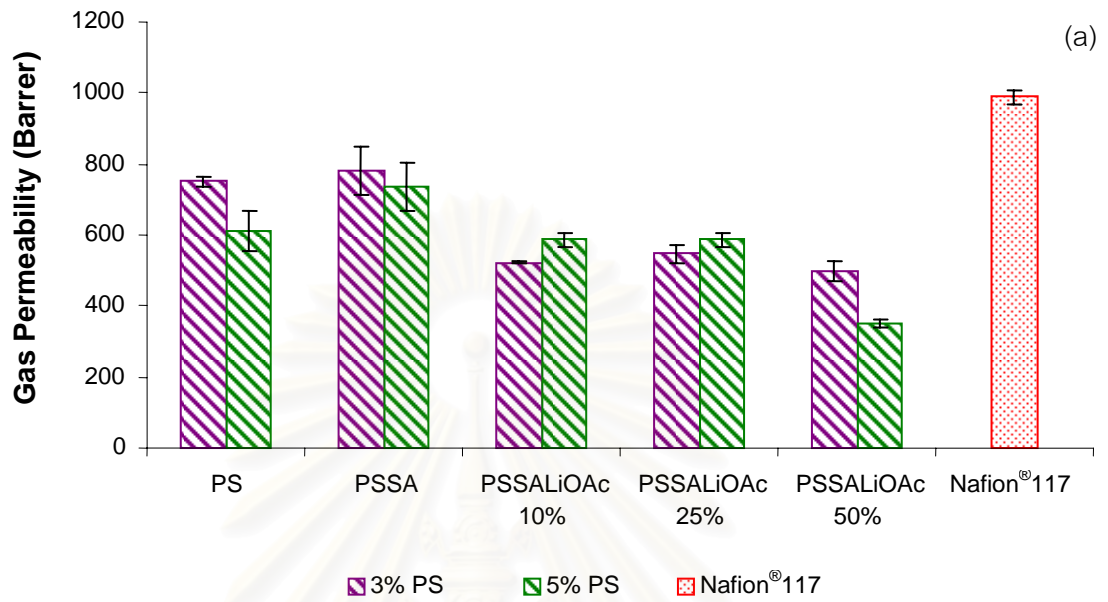
เมื่อเติมลิเทียมเข้าไปในซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง จะทำให้เกิดการ แลกเปลี่ยนระหว่างลิเทียมไอออนกับไฮโดรเจนของหมู่ซัลฟอนิก เนื่องจากลิเทียมไอออนที่เข้าไป แทนที่ไฮโดรเจนนั้นมีขนาดใหญ่กว่า จึงอาจส่งผลให้ไปปิดช่องว่างภายในสายโซ่พอลิเมอร์ได้มากขึ้น ทำให้แก๊สไฮโดรเจนซึมผ่านได้น้อยลง แต่เมื่อมีปริมาณของลิเทียมไอออนมากเกินไป อาจจะทำให้เกิดการผลักกันของลิเทียมไอออน ทำให้เกิดช่องว่างที่กว้างขึ้น จึงส่งผลให้มีความการซึมผ่าน ของแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาชนิดของเกลือลิเทียม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ เกลือลิเทียมแอสซีเทตจากร้อยละ 10, 25 และ 50 ทำให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 202 ± 25 – 324 ± 55 , 223 ± 22 – 486 ± 49 และ 455 ± 15 – 829 ± 24 บาร์เรอร์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.17 (a) และตารางที่ ก.43 และการเพิ่มปริมาณลิเทียมไฮดรอกไซด์ทำให้ค่าการซึมผ่าน ของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 229 ± 12 – 558 ± 8 , 397 ± 209 – 578 ± 128 และ 621 ± 145 – 822 ± 190 บาร์เรอร์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.17 (b) และตารางที่ ก.43 โดยไม่ขึ้นกับขนาด ของผงพอลิสไตรีน และความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายพอลิเมอร์

สำหรับเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 4 และทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียม จากรูปที่ 4.18 (a) และตารางที่ ก.44 เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือ ลิเทียมแอสซีเทตร้อยละ 10, 25 และ 50 ทำให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนลดลงโดยมีค่าอยู่ใน ช่วง 523 ± 1 – 587 ± 21 , 546 ± 27 – 586 ± 21 และ 353 ± 11 – 499 ± 27 บาร์เรอร์ ตามลำดับ ในทำนอง เดียวกันการเพิ่มปริมาณลิเทียมไฮดรอกไซด์ในรูปที่ 4.18 (b) และตารางที่ ก.44 ทำให้ค่าการ ซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 471 ± 2 – 505 ± 58 , 437 ± 24 – 443 ± 38 และ 333 ± 38 – 365 ± 59 บาร์เรอร์ ตามลำดับ สำหรับเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วย ไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 7 และทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียม พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือลิเทียม แอสซีเทตร้อยละ 10, 25 และ 50 ทำให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนลดลงโดยมีค่าอยู่ในช่วง 372 ± 1 – 531 ± 59 , 350 ± 4 – 488 ± 21 และ 323 ± 4 – 445 ± 57 บาร์เรอร์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (a) และตารางที่ ก.45 ในทำนองเดียวกันการเพิ่มปริมาณลิเทียมไฮดรอกไซด์ ในรูปที่ 4.19 (b) และตารางที่ ก.45 ทำให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 364 ± 43 – 401 ± 2 , 315 ± 48 – 321 ± 17 และ 306 ± 29 – 413 ± 65 บาร์เรอร์ ตามลำดับ

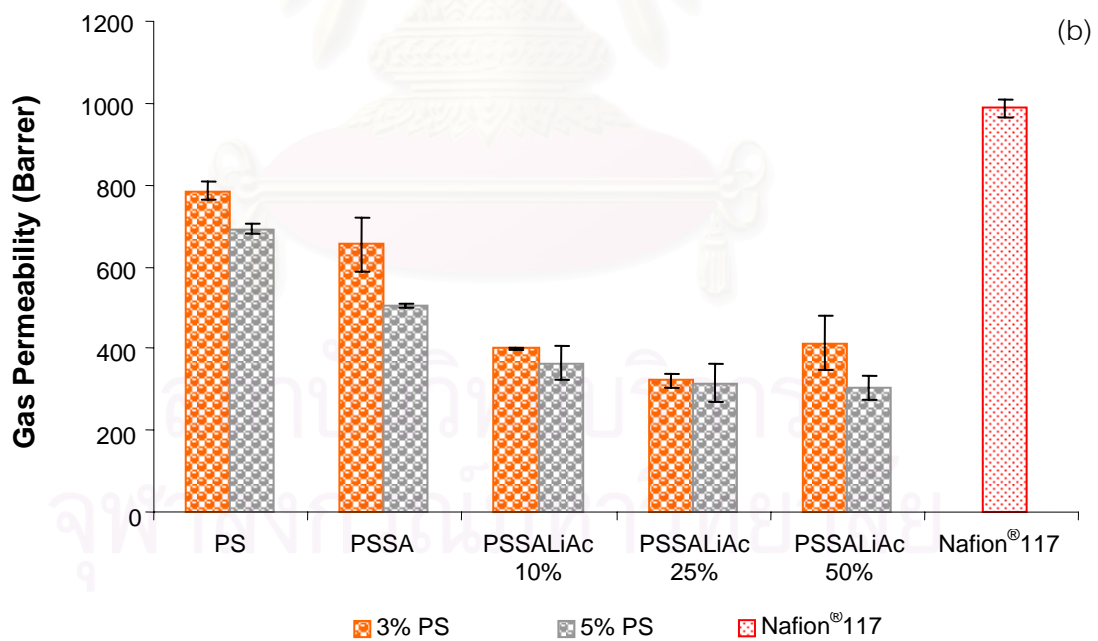
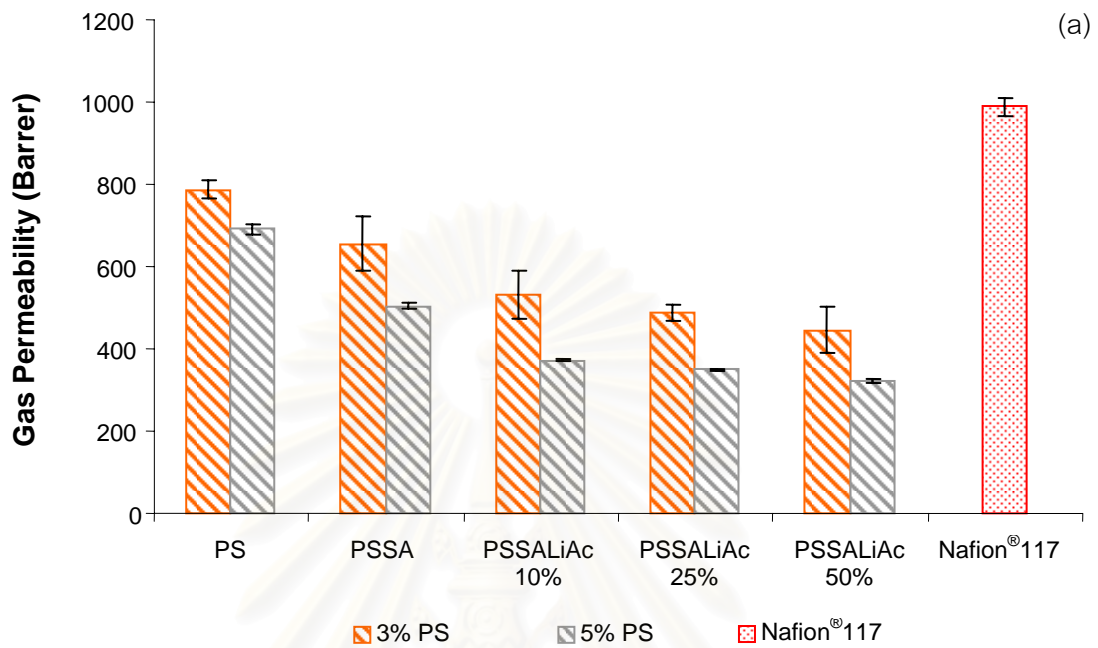
โดยสรุปเยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนน้อยกว่า Nafion® 117 ที่มีค่าเท่ากับ 988 ± 21 บาร์เรอร์ ซึ่งเยื่อแผ่นที่ต้องการควรมีค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนต่ำเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน



รูปที่ 4.17 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิไอสไตรีนไม่เชื่อมขวาง และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.18 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิไอสไตรีนเชื่อมขวางด้วย ไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.19 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิไธรีนเชื่อมขวางด้วย ไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

4.9 ค่าการนำโปรตอน

ค่าการนำโปรตอนเป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาถึงเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง มีค่าเท่ากับ 0.002 ซีเมนส์/เซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่น Nafion® 117 ซึ่งมีค่าการนำโปรตอนเท่ากับ 0.092 ± 0.003 ซีเมนส์/เซนติเมตร

ก) ผลของการเชื่อมขวาง

การเชื่อมขวางเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และ 7% ไม่มีผลทำให้การนำโปรตอนดีขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.003 ± 0.000 ดังรูปที่ 4.21 หรือตารางที่ ก.51 และ 0.001 ± 0.000 ซีเมนส์/เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.22 หรือตารางที่ ก.55 ตามลำดับ แสดงว่ากลไกการนำโปรตอนไม่สามารถผ่านหมู่ฟังก์ชันที่ไม่มีประจุของพอลิสไตรีน หรือไดไวนิลเบนซีน แต่การเชื่อมขวางในเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนทั้งที่ไม่ได้ทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียม และทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียม มีค่าการนำโปรตอนสูงขึ้นมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการเชื่อมขวางก่อนการทำซัลโฟเนชันในเยื่อแผ่นแบบเชื่อมขวาง ทำให้หมู่ซัลโฟนิลสามารถเกาะกับสายโซ่พอลิเมอร์หลักได้แข็งแรงขึ้น มีตำแหน่งให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านได้มากขึ้น โดยค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนอยู่ในช่วง 0.015-0.019 และ 0.015-0.024 ซีเมนส์/เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.21 หรือตารางที่ ก. 54 และรูปที่ 4.22 หรือตารางที่ ก.56 ตามลำดับ

ข) ผลของการทำซัลโฟเนชัน

รูปที่ 4.20 แสดงค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง โดยเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการซัลโฟเนชันมีค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของโปรตอน ซึ่งจะเคลื่อนที่ในรูปของโปรตอน หรือไฮโดรเนียมไอออนจากตำแหน่งที่เป็นไอออนลบ ไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งที่เป็นไอออนลบเช่นเดียวกัน [21] ดังนั้นการทำซัลโฟเนชัน ซึ่งเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่เป็นไอออนลบให้แก่เยื่อแผ่น ทำให้ความหนาแน่นของประจุเพิ่มขึ้น โปรตอนจึงเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้หมู่ซัลเฟตยังเป็นหมู่ที่มีความสามารถในการแตกตัวให้โปรตอนได้ดี (strong proton donating) [20] ทำให้การเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ง่ายขึ้น เพราะไม่ต้องใช้พลังงานสูงในการสลายพันธะร่วมกับหมู่ซัลโฟนิล [21] จากผลการทดลองสามารถบอกได้ว่า ค่าการนำโปรตอนในสูตรของซัลโฟเนตพอลิสไตรีน สามารถนำโปรตอนได้ระดับหนึ่ง มีค่าอยู่ในช่วง 0.006-0.009 ซีเมนส์/เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.20 และตารางที่ ก.48 แต่การ

ทำซัลฟอนเนชันที่มีประสิทธิผลมากกว่า คือ การทำซัลฟอนเนชันแก่เยื่อแผ่นเชื่อมขวางดังกล่าวข้างต้น

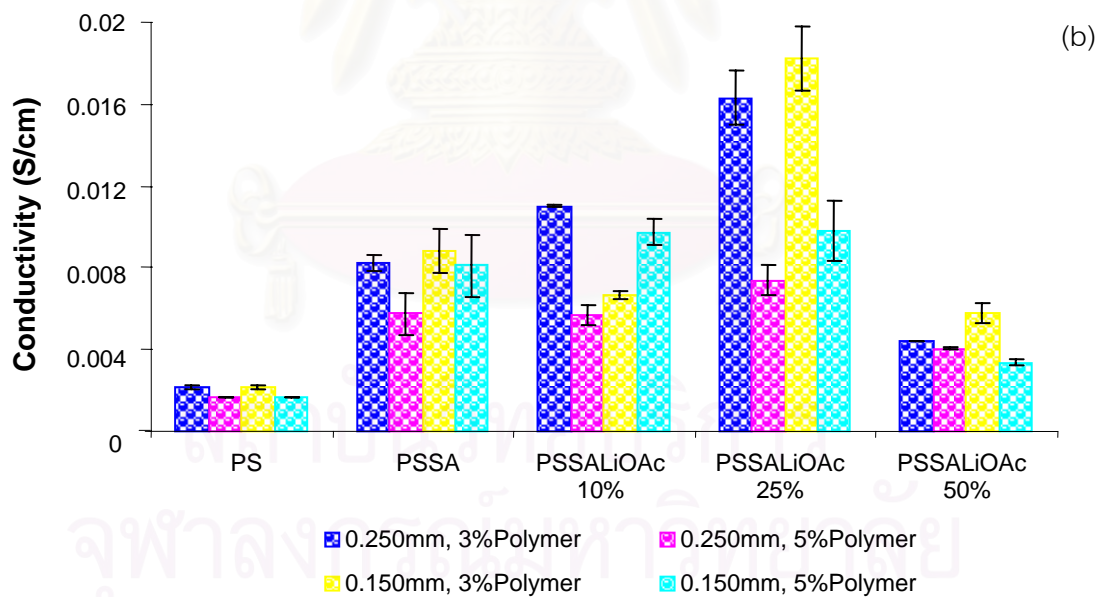
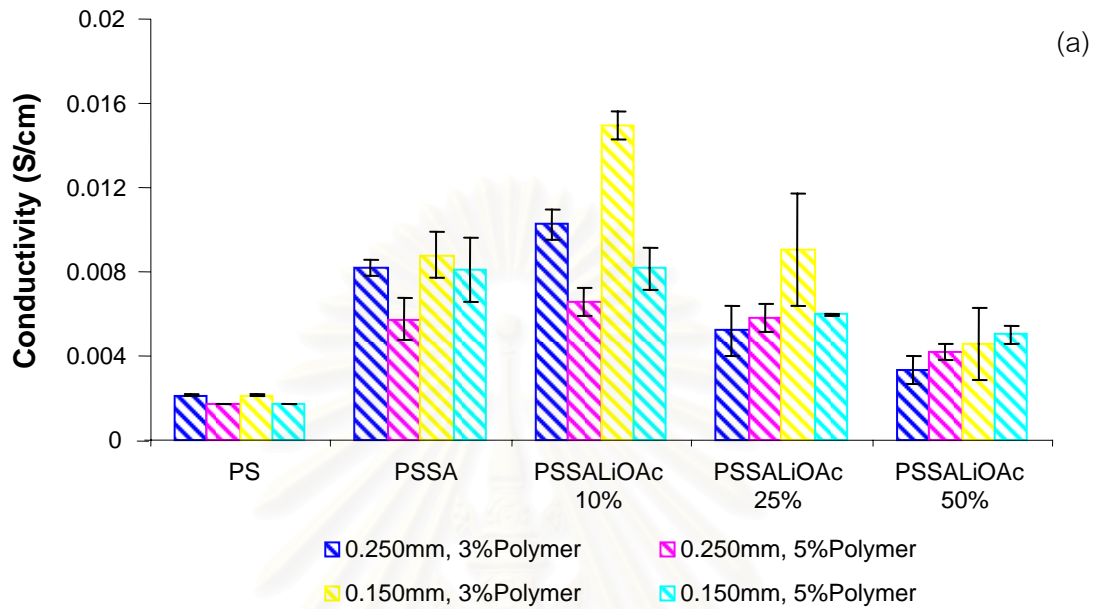
ค) ผลของการเติมเกลือลิเทียม

เมื่อทำการเติมลิเทียมไอออนลงไปในพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง ทำให้ค่าการนำโปรตอนเพิ่มสูงขึ้น ดังที่คาดหวังไว้ในการออกแบบการทดลองการ ว่า เกลือลิเทียมน่าจะช่วยให้ค่าการนำโปรตอนสูงขึ้น เนื่องจากการเติมลิเทียม เป็นการนำลิเทียมเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ซัลฟอนิก ดังนั้นจึงส่งผลโดยตรงกับปริมาณพันธะไฮโดรเจนภายในพอลิเมอร์ เมื่อปริมาณพันธะไฮโดรเจนลดลง ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้มากขึ้น ช่วยให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนดีขึ้นผ่านทางรูปร่าง และทำลายพันธะของไอออน จึงมีการสร้างช่องว่าง (Free volume) ให้โปรตอนผ่านไปได้ [21] โดยในรูปที่ 4.20 (a) (หรือตารางที่ ก.39) และ 4.20 (b) (หรือตารางที่ ก.40) เป็นผลจากการเติมลิเทียมแอสซิเทต และลิเทียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ พบว่า มีค่าการนำโปรตอนสูงสุดที่ปริมาณความเข้มข้นของเกลือลิเทียมเหมาะสมค่าหนึ่ง กล่าวได้ว่า หากเติมลิเทียมในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้ลิเทียมที่เหลือมากเกินไป เป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของโปรตอน และส่งผลให้ค่าการนำโปรตอนมีค่าลดลงดังกราฟ โดยจากผลของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนที่ไม่เชื่อมขวางนี้ให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุดที่ 0.018 ± 0.002 ซีเมนส์/เซนติเมตร ในสูตรของซัลฟอนเนตพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวางและทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 25 ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ร้อยละ 3

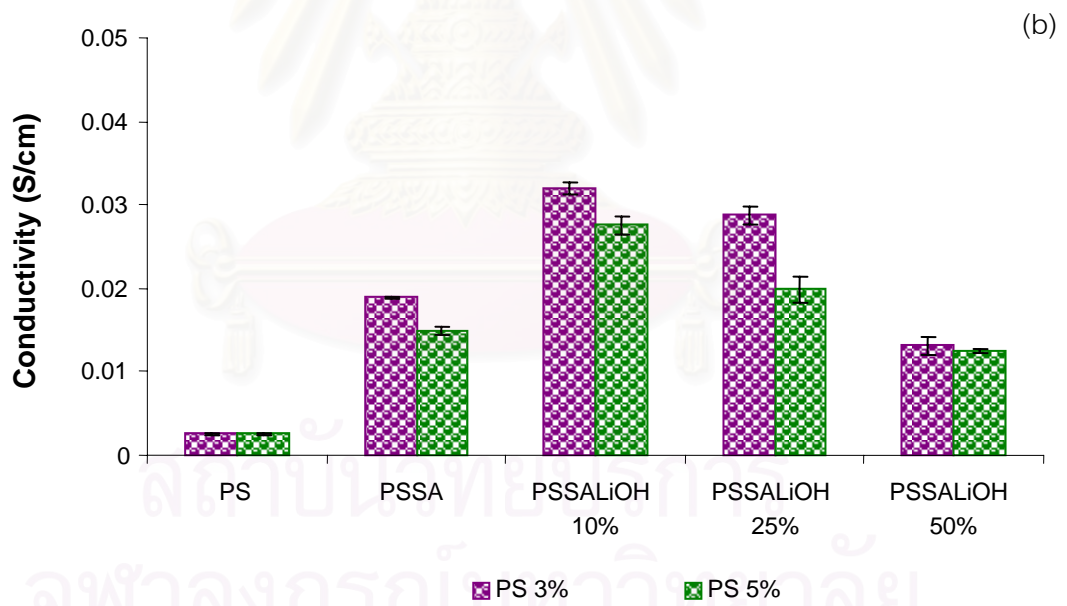
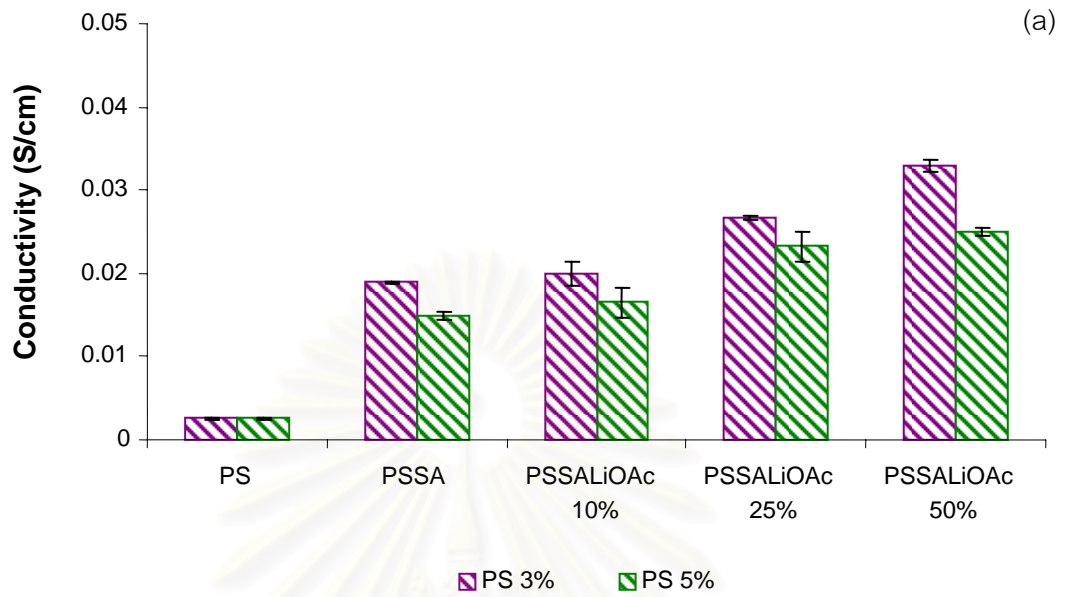
จากรูปที่ 4.21 แสดงค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% ที่เติมเกลือลิเทียม โดยในรูปที่ 4.21 (a) (หรือตารางที่ ก.53) และ 4.21 (b) (หรือตารางที่ ก.54) เป็นการเติมลิเทียมแอสซิเทต และลิเทียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ พบว่า มีค่าการนำโปรตอนที่สูงสุดที่ปริมาณความเข้มข้นของเกลือลิเทียมเหมาะสมค่าหนึ่ง โดยจากผลของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง 4% ไดไวนิลเบนซีนนี้ ให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุดที่ 0.033 ± 0.001 ซีเมนส์/เซนติเมตร ในสูตรของซัลฟอนเนตพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 4 และทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซิเทตร้อยละ 50 ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ร้อยละ 3

จากรูปที่ 4.22 และตารางที่ ก.57-ก.58 แสดงค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% ที่เติมเกลือลิเทียม พบว่ามีค่าการนำโปรตอนต่ำกว่าในเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง 4% ไดไวนิลเบนซีนในบางสูตร จึงเป็นข้อยืนยันได้ว่าการเพิ่มขึ้นของหมู่ซัลฟอนิกให้แก่เยื่อแผ่น ไม่ใช่เป็นปัจจัยเดียวในการทำให้ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นดีขึ้น ถึงแม้ว่าจะทำให้ความหนาแน่นของประจุเพิ่มขึ้นก็ตาม [21] โดยจากผลของเยื่อแผ่นซัลฟอนเนตพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนร้อยละ 7 และทำคอมโพสิตกับเกลือ

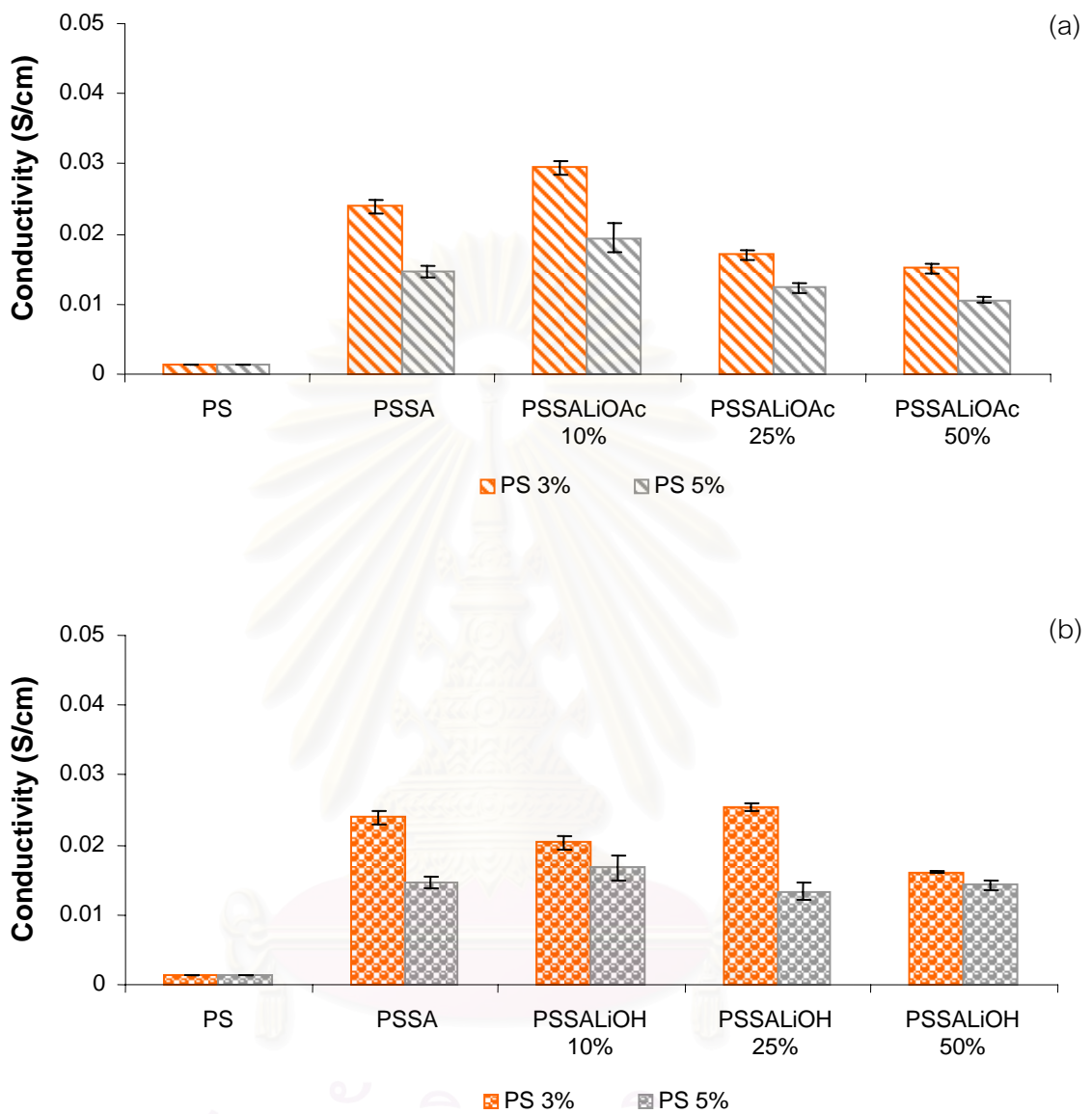
ลิเทียมแอสีเทตร้อยละ 10 ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ร้อยละ 3 ให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุด เท่ากับ 0.030 ± 0.001 ซีเมนส์/เซนติเมตร



รูปที่ 4.20 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนไม่เชื่อมขวางและทำคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสีเทต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.21 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอสซีเตต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.22 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับ (a) เกลือลิเทียมแอซีเตต (b) เกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ชนิดของเยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบด้วย

- เยื่อแผ่นพอลิสไตรีนที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง
- เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง
- เยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนที่เติมเกลือลิเทียมทั้งเชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันโดยเครื่อง FTIR พบว่า เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้เกิดการเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนในเยื่อแผ่นเชื่อมขวาง และเกิดหมู่ซัลฟอนิลในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน จากการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่าเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเกลือลิเทียม และซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนที่ทำคอมโพสิตกับเกลือลิเทียม และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้น พบว่ามีลักษณะเป็นแบบเนื้อแน่น และสมมาตร (symmetric) ทุกสูตร

จากการออกแบบการทดลอง เมื่อเริ่มแรกที่ต้องการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์ ผลของขนาดอนุภาคต่อประสิทธิภาพในการทำซัลฟอนชัน ผลของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม ผลของปริมาณสารเชื่อมขวาง และผลของความหนาเยื่อแผ่น พบว่า การบดและคัดขนาดของเม็ดพอลิสไตรีน น่าจะเป็นตัวช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาซัลฟอนชันในกรณีเยื่อแผ่นไม่เชื่อมขวาง แต่กลับไม่มีผลต่อสมบัติต่างๆ อย่างเด่นชัด คาดว่าเนื่องจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้นเป็นสารทำซัลฟอนชันที่อ่อนสำหรับพอลิสไตรีน ขนาดของผงพอลิสไตรีน หรือความหนาของเยื่อแผ่น ค่อนข้างใกล้เคียงกันเกินไป จึงไม่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ในงานวิจัย และการเลือกเติมเกลือลิเทียมทั้ง 2 ชนิด ไม่มีผลต่อสมบัติการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นอย่างชัดเจน เนื่องจากความสามารถของลิเทียมไฮดรอกไซด์ในการเข้าแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ซัลฟอนิลที่

มีอย่างจำกัดในสายโซ่พอลิเมอร์ ดังนั้นการเข้าจับกับหมู่ซัลฟอนิกของลิเทียมไฮดรอกไซด์ (เบสแก่) หรือลิเทียมแอสซิเตต (เบสอ่อน) จึงไม่ต่างกันมาก

อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ว่า การเชื่อมขวาง การทำซัลฟอนेशन และการเติมเกลือลิเทียม มีผลต่อสมบัติของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนประเภทพอลิสไตรีนได้ดังนี้

1) ผลของการเชื่อมขวางต่อ

- ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

มีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนพบว่าที่ปริมาณการเชื่อมขวางสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาน้อยลง เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้โครงสร้างของพอลิเมอร์ยึดเกาะกันอย่างแข็งแรง จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยากขึ้น

- ความทนแรงดึง

มีค่าลดลง เนื่องจากการเชื่อมขวางทำให้เยื่อแผ่นมีความแข็งแรงขึ้นแต่เปราะ

- อุณหภูมิการสลายตัว

มีค่าลดลง เนื่องจากธรรมชาติของไดไวนิลเบนซีนมีส่วนในการเหนี่ยวนำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ลดลง

- ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

มีค่าใกล้เคียงกับเยื่อแผ่นไม่เชื่อมขวาง เนื่องจากการเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีนไม่ได้เป็นการเพิ่มฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วให้กับเยื่อแผ่น

- ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางทำให้เกิดโพรงมากขึ้นจากการเกี่ยวพันกันเป็นร่างแหของสายโซ่พอลิเมอร์

- ค่าการนำโปรตอน

มีค่าใกล้เคียงกับเยื่อแผ่นไม่เชื่อมขวาง เนื่องจากไม่มีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่เป็นไฮดรอกซิลให้แก่เยื่อแผ่น จึงส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเป็นไปอย่างลำบาก

2) ผลของการทำซัลโฟเนชันต่อ

- ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่ซัลโฟนิลทำให้พอลิสไตรีนกลายเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำมากขึ้น แต่มีผลน้อยต่อซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง เพราะมีการยึดเกาะกันมากขึ้นระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างยากขึ้น

- ความทนแรงดึง

มีค่าไม่แตกต่างจากเยื่อแผ่นพอลิสไตรีน เนื่องจากปริมาณของหมู่ซัลโฟนิลมีน้อยมากเมื่อเทียบกับพอลิสไตรีนที่เป็นพอลิเมอร์หลัก แต่มีค่าลดลงในเยื่อแผ่นซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง เนื่องจากพอลิเมอร์มีความแข็งแรงแต่เปราะ

- อุณหภูมิการสลายตัว

เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากผลของหมู่ซัลโฟนิลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน และต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการสลายพันธะดังกล่าว แต่ในการทำซัลโฟเนชันของพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงเล็กน้อย เนื่องจากผลของหมู่ไดไวนิลเบนซีนที่ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดต่ำลงมาก จึงทำให้อิทธิพลของการทำซัลโฟเนชันไม่มีนัยสำคัญ

- ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วที่แรงมากให้กับเยื่อแผ่น โดยมีค่าสูงขึ้นอีกในกรณีของซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนแบบเชื่อมขวาง เพราะสามารถเกิดปฏิกิริยาซัลโฟเนชันได้ดีขึ้น จึงทำให้มีปริมาณของหมู่ซัลโฟนิลเพิ่มขึ้นนั่นเอง

- ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

มีการเปลี่ยนแปลงทั้งในทางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง และจะน้อยลงเนื่องจากเกิดการปิดช่องว่างด้วยหมู่ซัลโฟนิล

- ค่าการนำโปรตอน

มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่งผลให้ความหนาแน่นของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบให้กับเยื่อแผ่นสูงขึ้น การเคลื่อนที่ของโปรตอนจึงดีขึ้น

3) ผลของการเติมเกลือลิเทียมต่อ

- ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

ไม่มีผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา เนื่องจากลิเทียมที่เกาะอยู่กับหมู่ซัลโฟนิลไม่ได้ทำให้เยื่อแผ่นมีความสามารถในการชอบน้ำเพิ่มขึ้น

- ความทนแรงดึง

ไม่ส่งผลต่อค่าความทนแรงดึง เพราะลิเทียมที่เกาะอยู่กับหมู่ซัลโฟนิลนั้นไม่ได้ส่งผลต่อความเป็นผลึกของเยื่อแผ่น

- อุณหภูมิการสลายตัว

อุณหภูมิการสลายตัวลดลงเล็กน้อยในกรณีของเยื่อแผ่นที่ไม่เชื่อมขวาง และมีค่าสูงขึ้นในกรณีของเยื่อแผ่นที่ทำการเชื่อมขวาง เนื่องจากลิเทียมไอออนจะสามารถเกิดอันตรกิริยาที่แรงกว่า

- ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เนื่องจากการจับของหมู่ลิเทียมกับหมู่ซัลโฟนิลน่าจะเป็นการจับชั่วคราวเท่านั้นในกรณีของเยื่อแผ่นที่ไม่เชื่อมขวาง แต่มีค่าลดลงในกรณีของเยื่อแผ่นที่ทำการเชื่อมขวาง เนื่องจากลิเทียมไอออนสามารถอยู่กับหมู่ซัลโฟนิลภายใต้โครงสร้างที่มีการเชื่อมขวางได้อย่างถาวร

- ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

มีการเปลี่ยนแปลงทั้งในทางที่ลดลง เนื่องจากลิเทียมไอออนสามารถเข้าไปปิดช่องว่างที่เกิดจากการเชื่อมขวาง และเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของลิเทียมไอออนที่มากเกินไป จึงเกิดการผลักดันของลิเทียมไอออนเกิดเป็นโพรงขึ้น

- ค่าการนำโปรตอน

มีการเปลี่ยนแปลงทั้งในทางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากลิเทียมไอออนจะเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจน จึงช่วยให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้มากขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณของลิเทียมที่มากเกินไป ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของโปรตอน

เยื่อแผ่นในงานวิจัยนี้ที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุด คือ เยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนที่มีการเชื่อมขวางด้วย 7% ไดไวนิลเบนซีน ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในสารละลายพอลิเมอร์ 3% (Crosslinked_7%DVB, 3%PSSA) โดยมีสมบัติต่างๆเทียบกับเยื่อแผ่น Nafion[®] 117 ดังนี้

สมบัติ	Crosslinked_7%DVB 3%PSSA	Nafion [®] 117
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา (%)	4.5±0.1	11.5±0.2
ความทนแรงดึง (MPa)	10.3±1.3	30.1±2.9
อุณหภูมิการสลายตัว (°C)	392.5	-
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (meq/g)	5.7±0.2	4.99±0.74
ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน (Barrer)	655±67	988±21
ค่าการนำโปรตอน (S/cm)	0.024±0.0011	0.092±0.0028

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเลือกใช้กรดซัลฟิวริกในการทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชันไม่เหมาะสม ควรเปลี่ยนใหม่เป็นสารทำซัลโฟเนชันที่แรงขึ้น เช่น โอเลียม เป็นต้น

รายการอ้างอิง

1. อภิชาติ เทอดเทียนวงษ์. เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเหลว. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
2. Kettering University, Fuel Cell Background [online], available from: <http://www.kettering.edu/~altfuel/fckback.htm>, [2005, September 14].
3. Cornell University and CFCI, How a Fuel Cell Works [online], available from: <http://www.news.cornell.edu/releases/Nov03/Fuelcell.institute.deb.html>, [2005, September 15].
4. Fuel Cells 2000, Type of Fuel Cell [online], available from: <http://www.fuelcells.org/basics/types.html>, [2005, September 15].
5. Rocky Mountain Institute, Type of Fuel Cell [online], available from: <http://www.rmi.org/sitepages/pid556.php>, [2005, October 1].
6. R.W. Baker, Membrane Technology and Applications, New York: McGraw-Hill, 2000.
7. ชันทอง สุนทรภา. การพัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
8. บรรณ เลง ศรีนิล. เทคโนโลยีพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 17. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2542.
9. G.M. Glenn and W.J. Orts, Properties of starch-based foam by compression and explosion processing, *Industrial Crops and Product*, 13 (1998): 2129-2140.
10. S.Y. Lam-Leung and H.R. Li, A Study on the Preparation and Properties of the Heterogenous Cation-Exchange Membranes of Sulfonated Polystyrene /Divinyl Benzene on an Acetal Base, *Journal of Applied Polymer Science*, 57 (1995): 1373-1379.
11. S.-L. Chen, L. Krishnan, S. Srinivasan, J. Benziger and A.B. Bocarsly, Ion Exchange Resin/Polystyrene Sulfonate Composite Membranes for PEM Fuel Cells, *Journal of Membrane Science*, 243 (2004): 327-333.
12. S.-H. Kwak, T.-H. Yang, C.-S. Kim and K.H. Yoon, Polymer Composite Membrane Incorporated with a Hygroscopic Material for High-Temperature PEMFC, *Electrochimica Acta*, 50 (2004): 653-657.

13. J. Yu, B. Yi, D. Xing, F. Liu, Z. Shao and Y. Fu, Degradation Mechanism of Polystyrene Sulfonic Acid Membrane and Application of Its Composite Membrane in Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, 4937 (2002): 1-6.
14. M.-S. Kang, Y.-J. Choi and S.-H. Moon, Water-Swollen Cation-Exchange Membranes Prepared Using Poly(Vinyl Alcohol) (PVA)/Poly(Styrene Sulfonic Acid-co-Maleic Acid) (PSSA-MA), *Journal of Membrane Science*, 207 (2002): 157-170.
15. B. Smitha, S. Sridhar and A.A. Khan, Synthesis and Characterization of Proton Conducting Polymer Membrane for Fuel Cells, *Journal of Membrane Science*, 225 (2003): 63-76.
16. C. Martin, L. Ramirez and J. Cuellar, Stainless Steel Microbeads Coated with Sulfonated Polystyrene-Co-Divinylbenzene, *Surface and Coatings Technology*, 165 (2003): 58-64.
17. N. Carretta, V. Tricoli and F. Picchioni, Ionomeric Membranes Based on Partially Sulfonated Poly(styrene): Synthesis, Proton Conduction and Methanol Permeation, *Journal of Membrane Science*, 166 (2000): 189-197.
18. สุมน ตรีสรณะพงศ์, การแจกแจงขนาดของโพร่งและอิทธิพลของโพร่งที่มีผลต่อสมบัติการดูดซึมและการคายตัวทำละลาย ของปีดูดซึมสไตรีน-ไดไวนิลเบนซีน, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
19. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรี, สมบัติของพอลิเมอร์, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
20. R. A. Robinson, R. H. Stokes, Electrolyte solutions, London: Butterworths, 1959.
21. P. G. Bruce, Solid State Electrochemistry, Cambridge university Press, 1995.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

1. การทดสอบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือลิเทียม

ตารางที่ ก.1 การหาค่าความเป็นกรด-ด่างของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง (ขนาดของผงพอลิสไตรีน 150 ไมโครเมตร, ความเข้มข้นของพอลิเมอริโนสารละลายพอลิเมอริ 3%)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)
PS	6.80
PSSA	4.56
PSSA + 10% LiOH	6.80
PSSA + 25% LiOH	7.05
PSSA + 50% LiOH	7.50
Nafion [®] 117	4.30

2. การทดลองหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

ตารางที่ ก.2 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่น Nafion[®] 117

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	ความหนา (ไมโครเมตร)		(%)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		แห้งเฉลี่ย	เปียกเฉลี่ย			
Nafion [®] 117	1	155.33	173.00	11.37	11.52	0.21
	2	151.33	169.00	11.67		

ตารางที่ ก.3 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Uncrosslinked 3%PS_20 μ m	3.33	0.00

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked 3%PS_30 μ m	1.70	0.03
Uncrosslinked 5%PS_20 μ m	1.53	0.05
Uncrosslinked 5%PS_30 μ m	0.57	0.80

ตารางที่ ก.4 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตเตดพอลิไสตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked 3%PSSA_20 μ m (250 μ m)	10.69	0.12
Uncrosslinked 3%PSSA_30 μ m (250 μ m)	6.50	0.62
Uncrosslinked 5%PSSA_20 μ m (250 μ m)	11.50	1.11
Uncrosslinked 5%PSSA_30 μ m (250 μ m)	6.51	0.80
Uncrosslinked 3%PSSA_20 μ m (150 μ m)	11.39	0.20
Uncrosslinked 3%PSSA_30 μ m (150 μ m)	6.26	0.28
Uncrosslinked 5%PSSA_20 μ m (150 μ m)	10.26	0.00
Uncrosslinked 5%PSSA_30 μ m (150 μ m)	5.33	0.99

ตารางที่ ก.5 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOAc 20 μ m_(250 μ m)	9.99	0.87
Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOAc 30 μ m_(250 μ m)	6.29	1.11
Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOAc 20 μ m_(250 μ m)	9.76	0.17
Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOAc 30 μ m_(250 μ m)	6.42	0.05
Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOAc 20 μ m_(150 μ m)	12.63	3.35
Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOAc 30 μ m_(150 μ m)	9.79	0.65
Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOAc 20 μ m_(150 μ m)	13.48	0.21
Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOAc 30 μ m_(150 μ m)	9.58	0.08
Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOAc 20 μ m_(250 μ m)	10.26	0.12
Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOAc 30 μ m_(250 μ m)	7.49	1.03
Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOAc 20 μ m_(250 μ m)	11.46	0.19
Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOAc 30 μ m_(250 μ m)	7.80	0.92
Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOAc 20 μ m_(150 μ m)	11.24	0.74

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOAc 30 μ m_(150 μ m)	6.33	0.23
Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOAc 20 μ m_(150 μ m)	10.89	0.03
Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOAc 30 μ m_(150 μ m)	6.80	0.07
Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOAc 20 μ m_(250 μ m)	10.31	0.64
Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOAc 30 μ m_(250 μ m)	4.36	0.15
Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOAc 20 μ m_(250 μ m)	11.48	0.00
Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOAc 30 μ m_(250 μ m)	3.97	0.82
Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOAc 20 μ m_(150 μ m)	8.68	1.87
Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOAc 30 μ m_(150 μ m)	6.11	0.69
Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOAc 20 μ m_(150 μ m)	10.76	0.72
Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOAc 30 μ m_(150 μ m)	6.87	2.19

ตารางที่ ก.6 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOH 20 μ m_(250 μ m)	9.02	0.63
Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOH 30 μ m_(250 μ m)	5.06	0.21
Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOH 20 μ m_(250 μ m)	10.02	3.95
Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOH 30 μ m_(250 μ m)	6.76	0.24
Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOH 20 μ m_(150 μ m)	9.33	0.00
Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOH 30 μ m_(150 μ m)	6.63	0.96
Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOH 20 μ m_(150 μ m)	12.34	0.48
Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOH 30 μ m_(150 μ m)	10.41	0.43
Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOH 20 μ m_(250 μ m)	9.34	0.35
Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOH 30 μ m_(250 μ m)	6.79	0.38
Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOH 20 μ m_(250 μ m)	8.22	0.16
Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOH 30 μ m_(250 μ m)	6.78	0.05
Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOH 20 μ m_(150 μ m)	10.70	0.58

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOH 30 μ m_(150 μ m)	8.56	1.36
Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOH 20 μ m_(150 μ m)	10.38	0.33
Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOH 30 μ m_(150 μ m)	5.62	0.03
Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOH 20 μ m_(250 μ m)	8.97	0.57
Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOH 30 μ m_(250 μ m)	5.30	0.28
Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOH 20 μ m_(250 μ m)	8.11	0.31
Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOH 30 μ m_(250 μ m)	6.80	0.39
Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOH 20 μ m_(150 μ m)	7.93	0.74
Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOH 30 μ m_(150 μ m)	3.88	0.25
Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOH 20 μ m_(150 μ m)	9.79	0.10
Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOH 30 μ m_(150 μ m)	5.43	0.54

ตารางที่ ก.7 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิไสตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PS	1.33	0.037
Crosslinked_4%DVB 5%PS	0.58	0.82

ตารางที่ ก.8 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไสตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA	7.37	0.11
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA	4.74	0.22

ตารางที่ ก.9 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไสตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอซีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 10%LiOAc	6.02	0.66
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 10%LiOAc	4.37	0.10
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 25%LiOAc	5.57	0.54

ตารางที่ ก.9 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 25%LiOAc	4.15	0.27
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 50%LiOAc	4.06	0.92
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 50%LiOAc	5.46	0.04

ตารางที่ ก.10 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน
เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 10%LiOH	7.38	0.09
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 10%LiOH	5.61	1.50
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 25%LiOH	5.68	0.81
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 25%LiOH	4.37	0.75
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 50%LiOH	5.10	0.14
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 50%LiOH	4.88	0.08

ตารางที่ ก.11 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นพอลิไสตรีนเชื่อมขวางด้วย ไดไวนิลเบนซีน 7%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PS	1.11	0.01
Crosslinked_7%DVB 5%PS	0.50	0.70

ตารางที่ ก.12 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไสตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA	4.74	0.12
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA	4.04	0.72

ตารางที่ ก.13 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไสตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 10%LiOAc	4.63	0.11
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 10%LiOAc	4.77	0.24
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 25%LiOAc	3.81	0.05

ตารางที่ ก.13 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 25%LiOAc	3.83	0.95
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 50%LiOAc	3.49	0.06
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 50%LiOAc	4.47	1.02

ตารางที่ ก.14 การหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน
เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนาเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 10%LiOH	5.20	0.10
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 10%LiOH	3.81	0.10
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 25%LiOH	5.20	0.19
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 25%LiOH	4.89	0.83
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 50%LiOH	3.02	0.06
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 50%LiOH	2.68	0.03

3. การทดลองหาค่าความทนแรงดึง

ตารางที่ ก.15 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่น Nafion® 117

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Nafion® 117	30.046	2.847

ตารางที่ ก.16 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิไสตีรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked 3%PS	19.063	2.243
Uncrosslinked 5%PS	23.835	2.767

ตารางที่ ก.17 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไสตีรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA	23.308	1.827
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA	19.278	2.022
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA	19.909	0.591
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA	21.391	2.164

ตารางที่ ก.18 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิไสตีรีนแบบไม่เชื่อมขวาง และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 10%LiOAc	21.885	1.397
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 10%LiOAc	19.117	1.913
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 10%LiOAc	20.116	0.795

ตารางที่ ก.18 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 10%LiOAc	24.494	1.108
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 25%LiOAc	16.885	1.390
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 25%LiOAc	15.919	1.258
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 25%LiOAc	17.933	2.068
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 25%LiOAc	21.174	1.642
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 50%LiOAc	21.309	0.625
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 50%LiOAc	16.587	0.685
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 50%LiOAc	22.247	0.726
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 50%LiOAc	19.766	1.350

ตารางที่ ก.19 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 10%LiOH	17.180	1.461
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 10%LiOH	23.363	1.692
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 10%LiOH	17.398	0.985
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 10%LiOH	17.262	1.051
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 25%LiOH	21.751	1.799
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 25%LiOH	18.172	1.443
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 25%LiOH	18.403	0.789
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 25%LiOH	23.455	1.152

ตารางที่ ก.19 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 50%LiOH	21.246	1.169
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 50%LiOH	17.808	1.778
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 50%LiOH	18.845	1.327
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 50%LiOH	21.213	1.453

ตารางที่ ก.20 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PS	11.143	0.353
Crosslinked_4%DVB 5%PS	17.342	1.688

ตารางที่ ก.21 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA	7.091	1.198
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA	9.626	0.259

ตารางที่ ก.22 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 10%LiOAc	9.623	0.377
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 10%LiOAc	9.570	0.695

ตารางที่ ก.22 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 25%LiOAc	8.806	0.987
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 25%LiOAc	10.043	0.789
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 50%LiOAc	7.653	0.976
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 50%LiOAc	9.039	2.252

ตารางที่ ก.23 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 10%LiOH	6.552	1.960
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 10%LiOH	9.195	1.171
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 25%LiOH	8.288	0.585
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 25%LiOH	11.696	0.735
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 50%LiOH	12.028	0.413
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 50%LiOAc	9.194	0.984

ตารางที่ ก.24 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PS	8.122	0.420
Crosslinked_7%DVB 5%PS	11.973	1.110

ตารางที่ ก.25 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA	10.300	1.314
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA	13.481	0.547

ตารางที่ ก.26 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมลิเทียมแอสซิเตต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 10%LiOAc	5.927	0.775
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 10%LiOAc	9.195	0.878
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 25%LiOAc	5.440	0.969
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 25%LiOAc	9.885	0.528
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 50%LiOAc	11.099	0.987
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 50%LiOAc	9.974	0.417

ตารางที่ ก.27 ค่าความทนแรงดึงของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

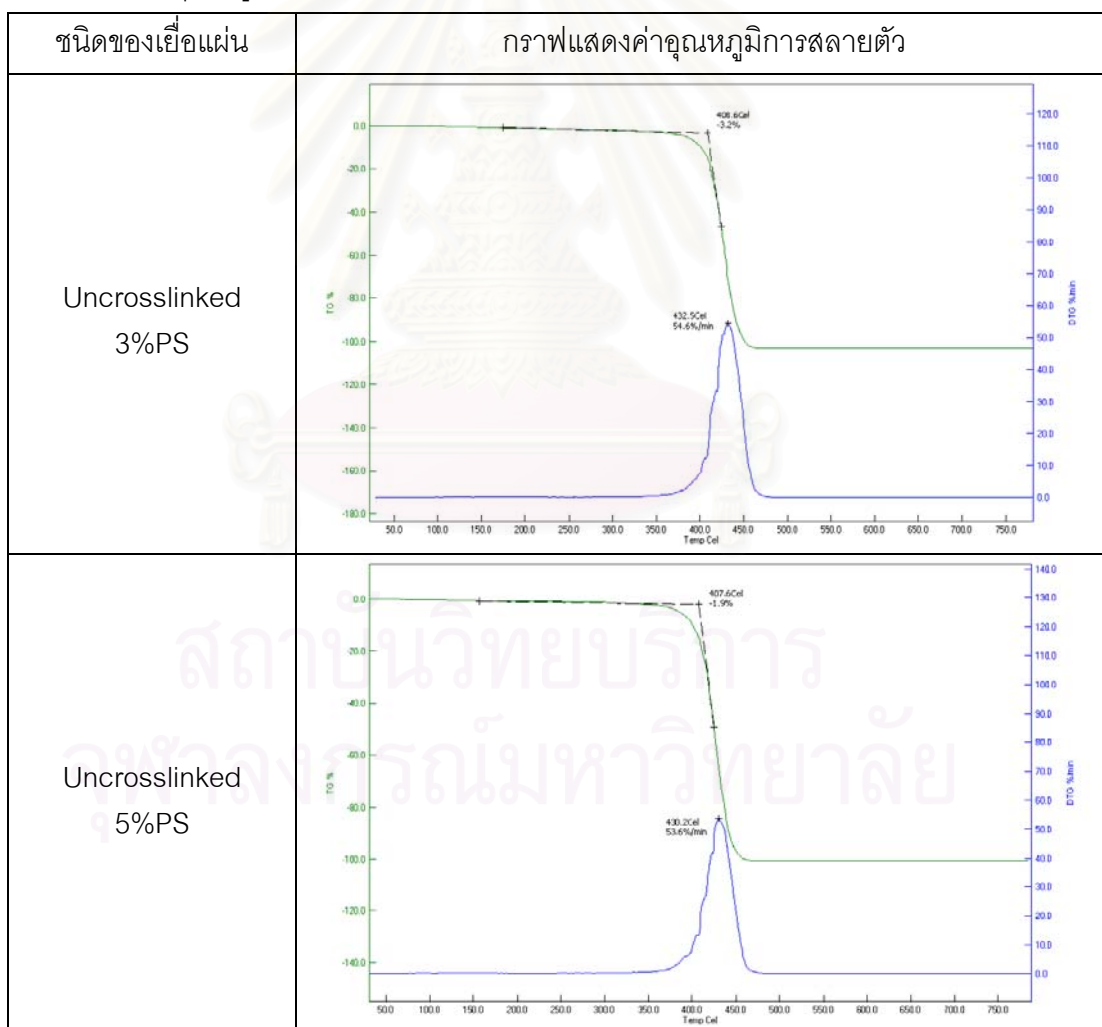
ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 10%LiOH	14.265	1.199
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 10%LiOH	6.750	0.436
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 25%LiOH	12.913	1.318

ตารางที่ ก.27 (ต่อ)

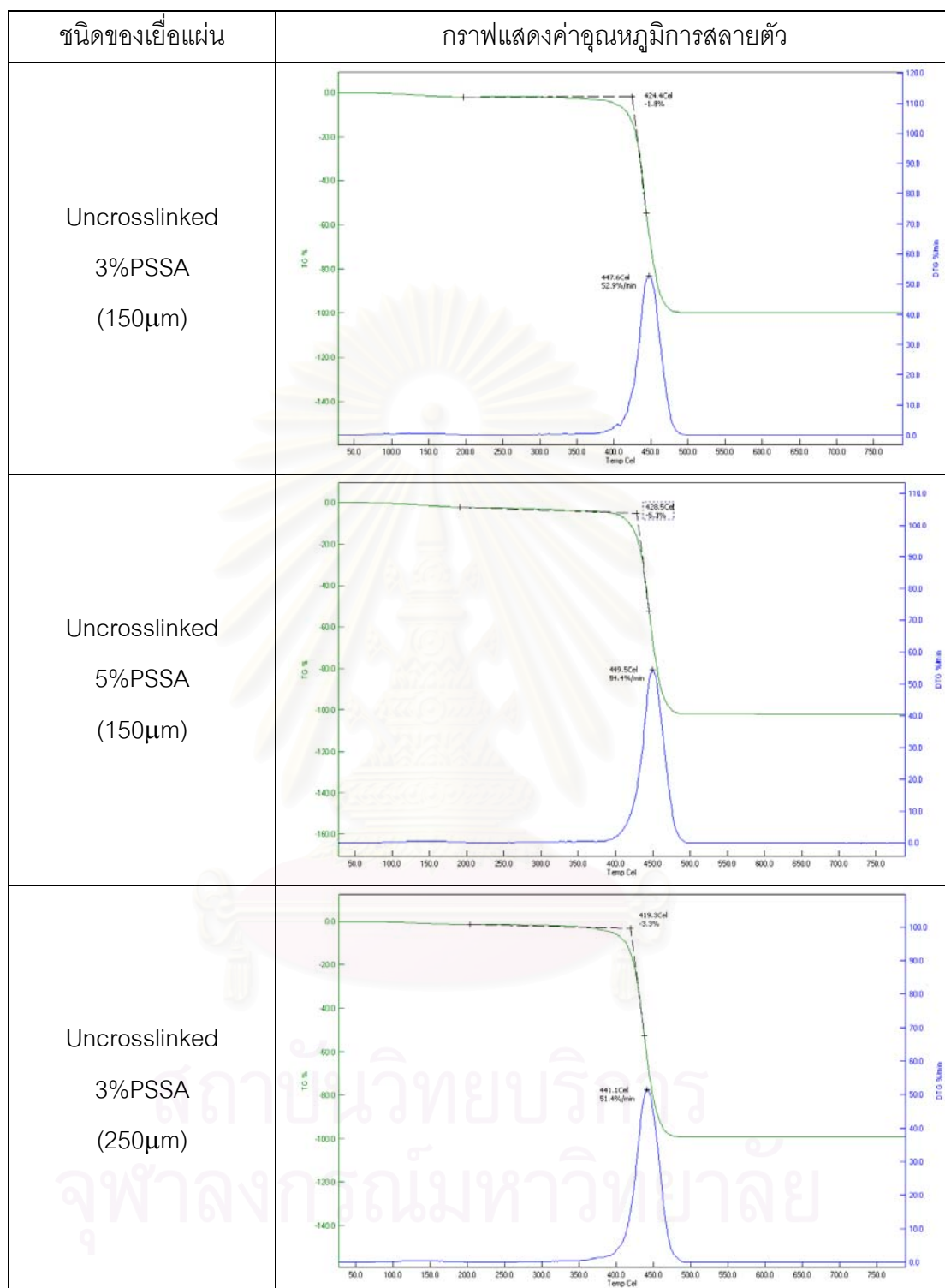
ชนิดของเยื่อแผ่น	ความทนแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 25%LiOH	5.193	1.689
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 50%LiOH	3.384	1.532
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 50%LiOH	8.468	0.198

4. คุณหมุมิการสลายตัว

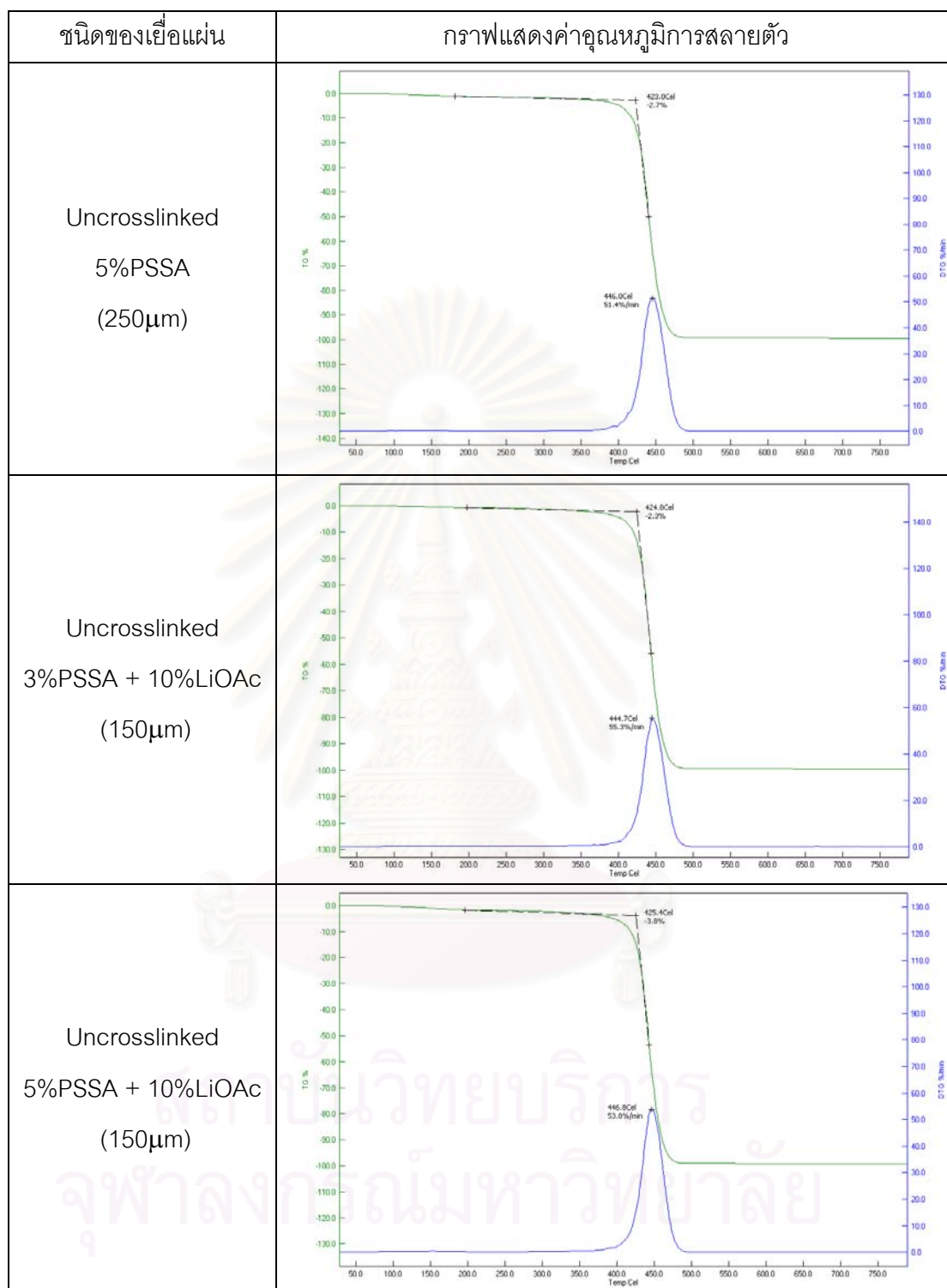
ตารางที่ ก.28 คุณหมุมิการสลายตัวของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง



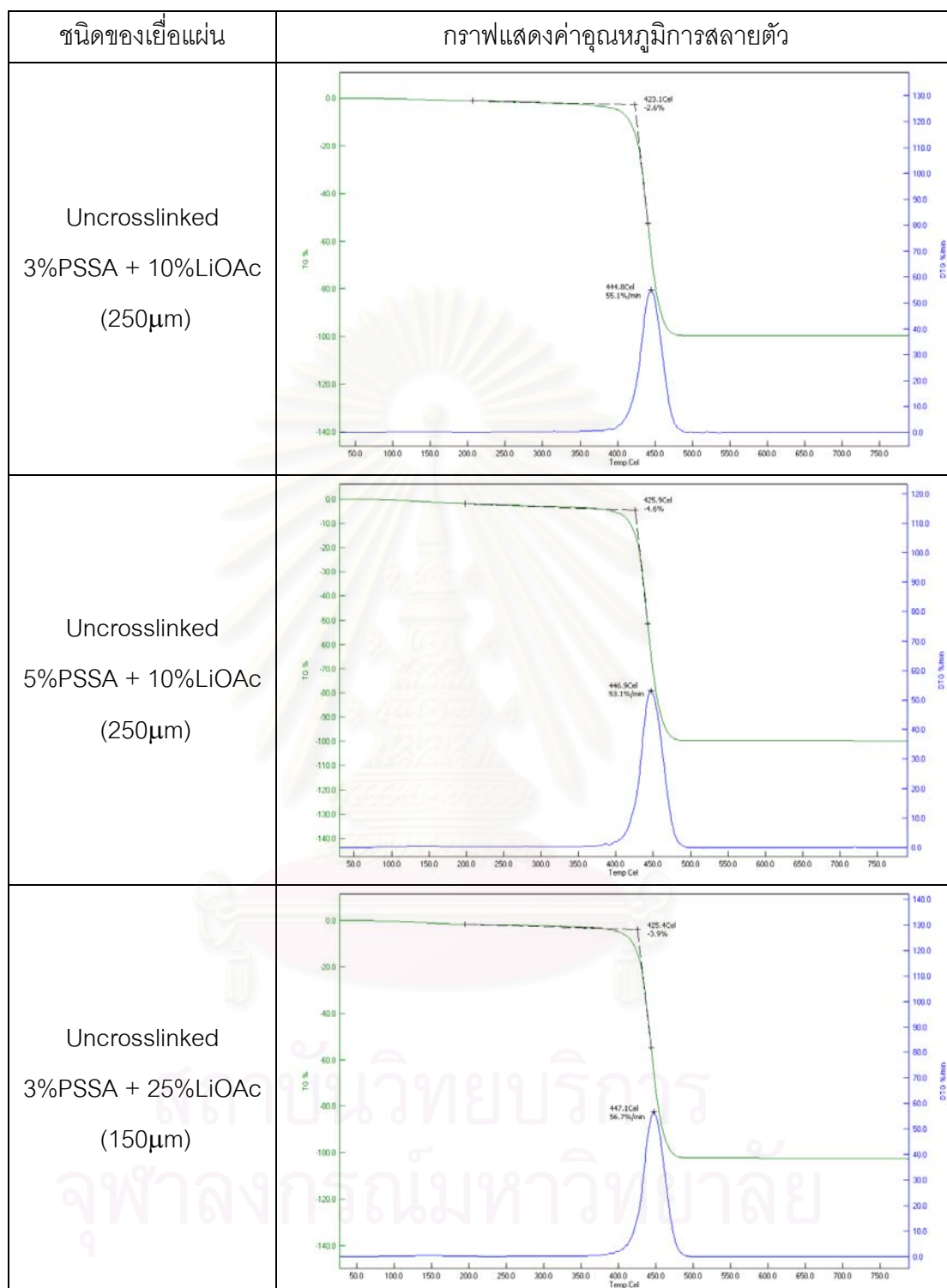
ตารางที่ ก.28 (ต่อ)



ตารางที่ ก.28 (ต่อ)



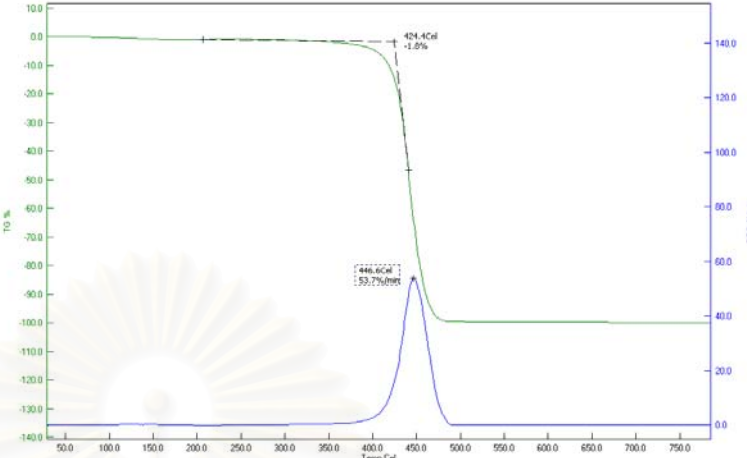
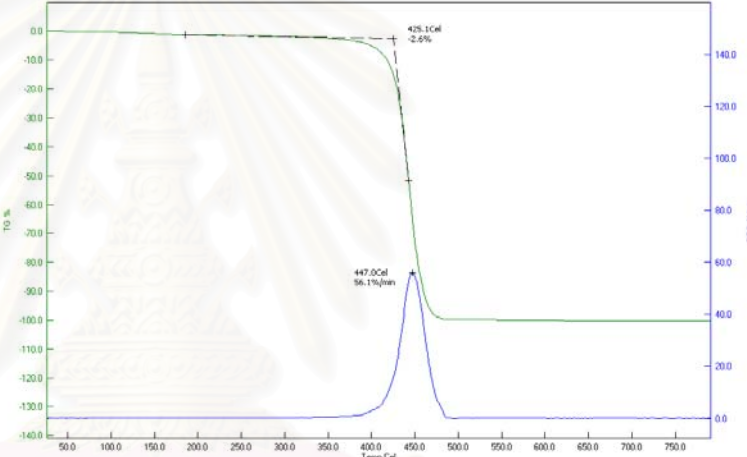
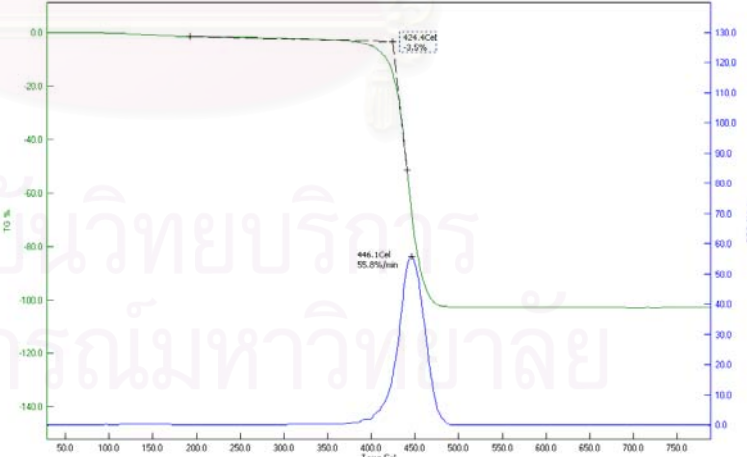
ตารางที่ ก.28 (ต่อ)



ตารางที่ ก.28 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว
<p style="text-align: center;">Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOAc (150μm)</p>	
<p style="text-align: center;">Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOAc (250μm)</p>	
<p style="text-align: center;">Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOAc (250μm)</p>	

ตารางที่ ก.28 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว
<p>Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOAc (150μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOAc (150μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOAc (250μm)</p>	

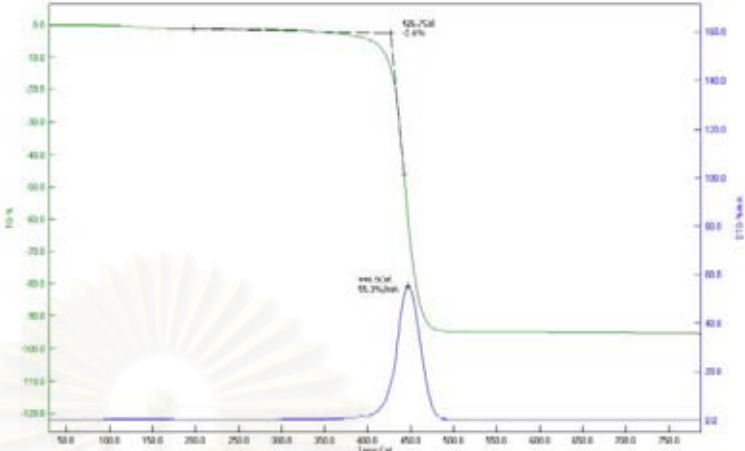
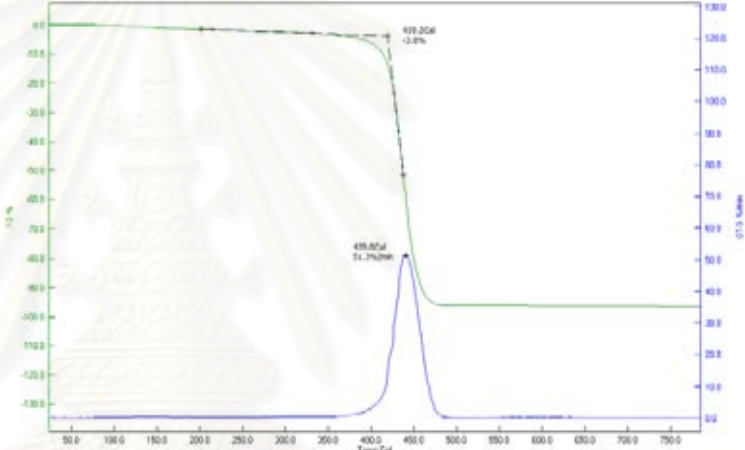
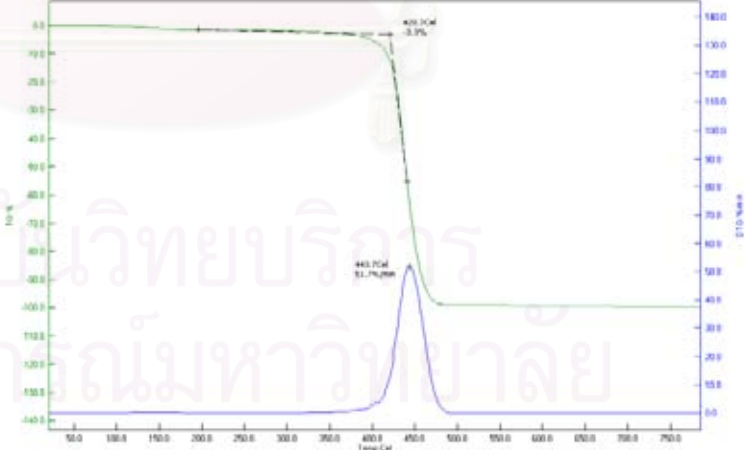
ตารางที่ ก.28 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว
<p>Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOAc (250μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOH (150μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOH (150μm)</p>	

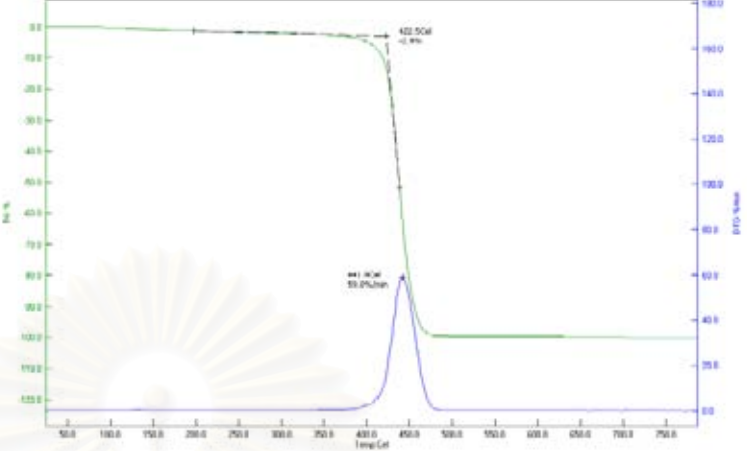
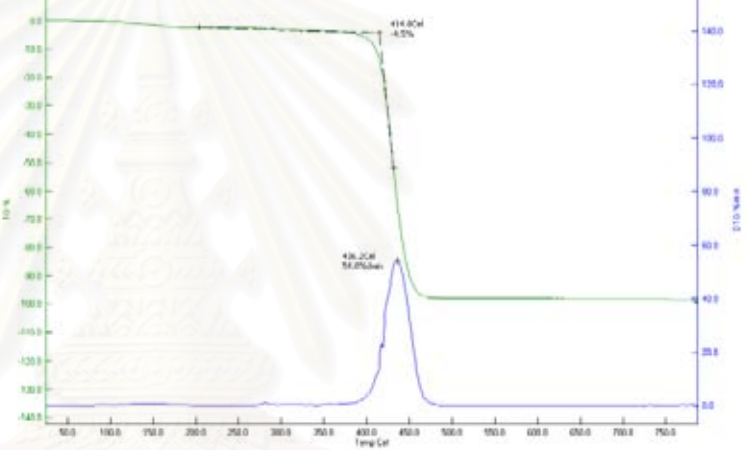
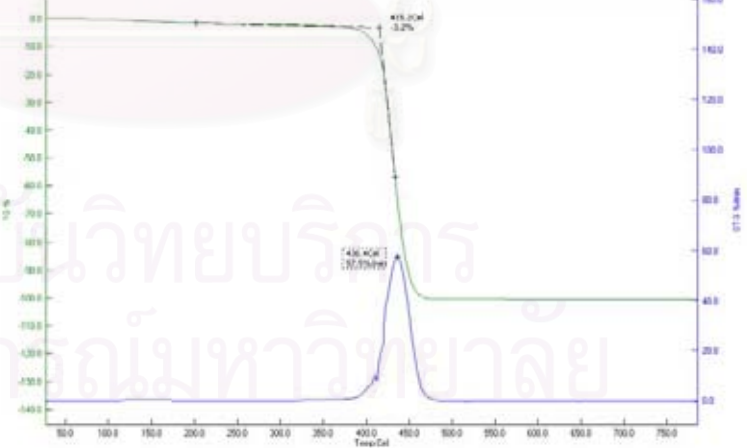
ตารางที่ ก.28 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว
<p>Uncrosslinked 3%PSSA + 10%LiOH (250μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 5%PSSA + 10%LiOH (250μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOH (150μm)</p>	

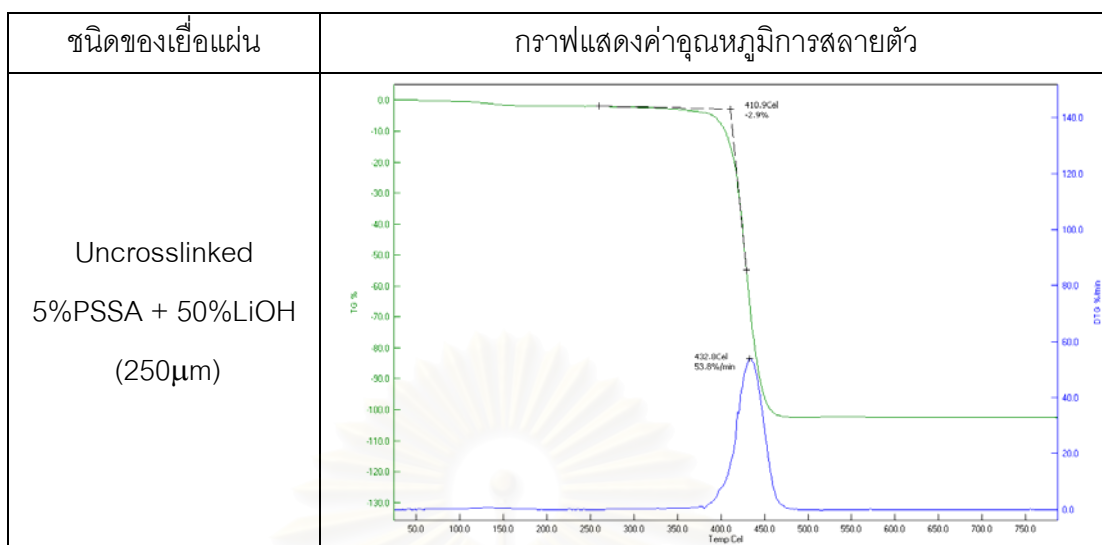
ตารางที่ ก.28 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว
<p>Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOH (150μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 3%PSSA + 25%LiOH (250μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 5%PSSA + 25%LiOH (250μm)</p>	

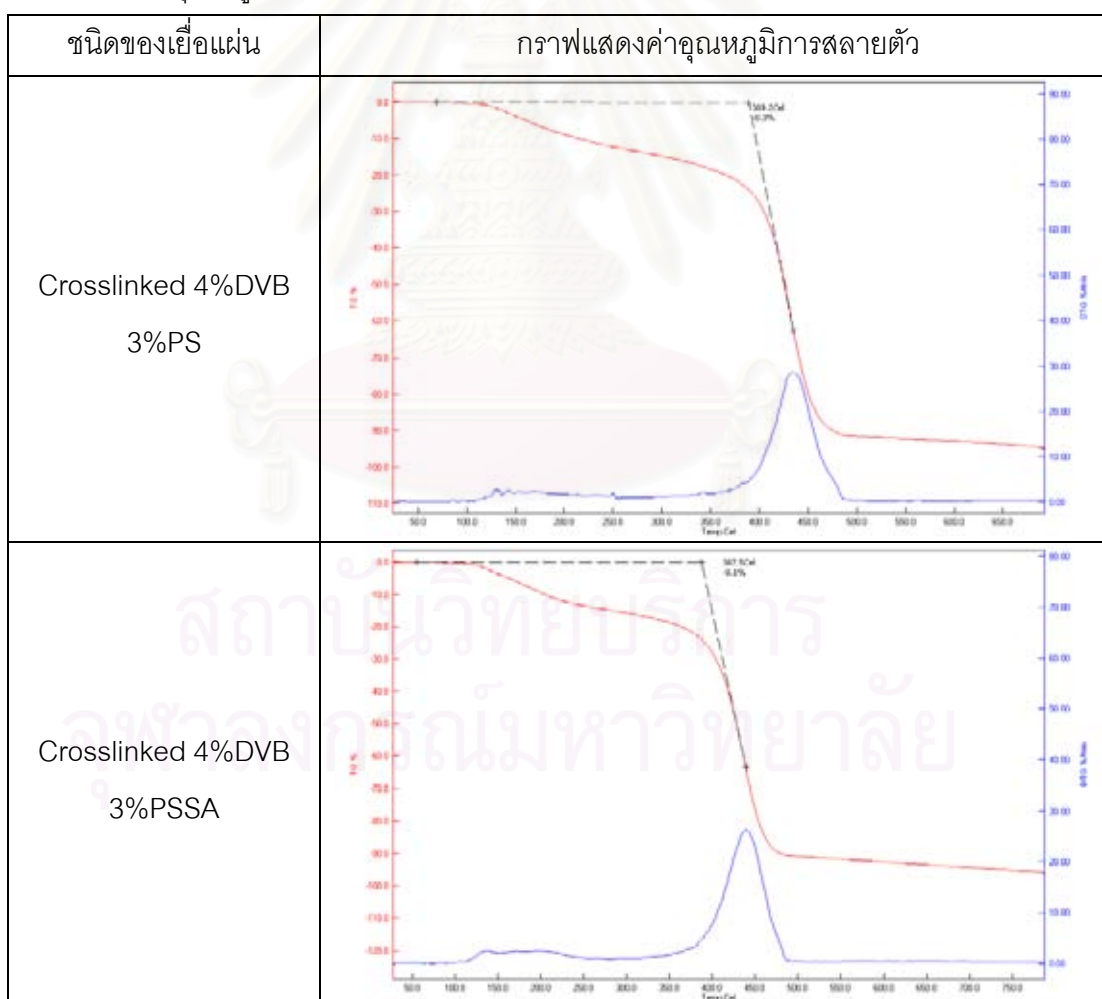
ตารางที่ ก.28 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว
<p>Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOH (150μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 5%PSSA + 50%LiOH (150μm)</p>	
<p>Uncrosslinked 3%PSSA + 50%LiOH (250μm)</p>	

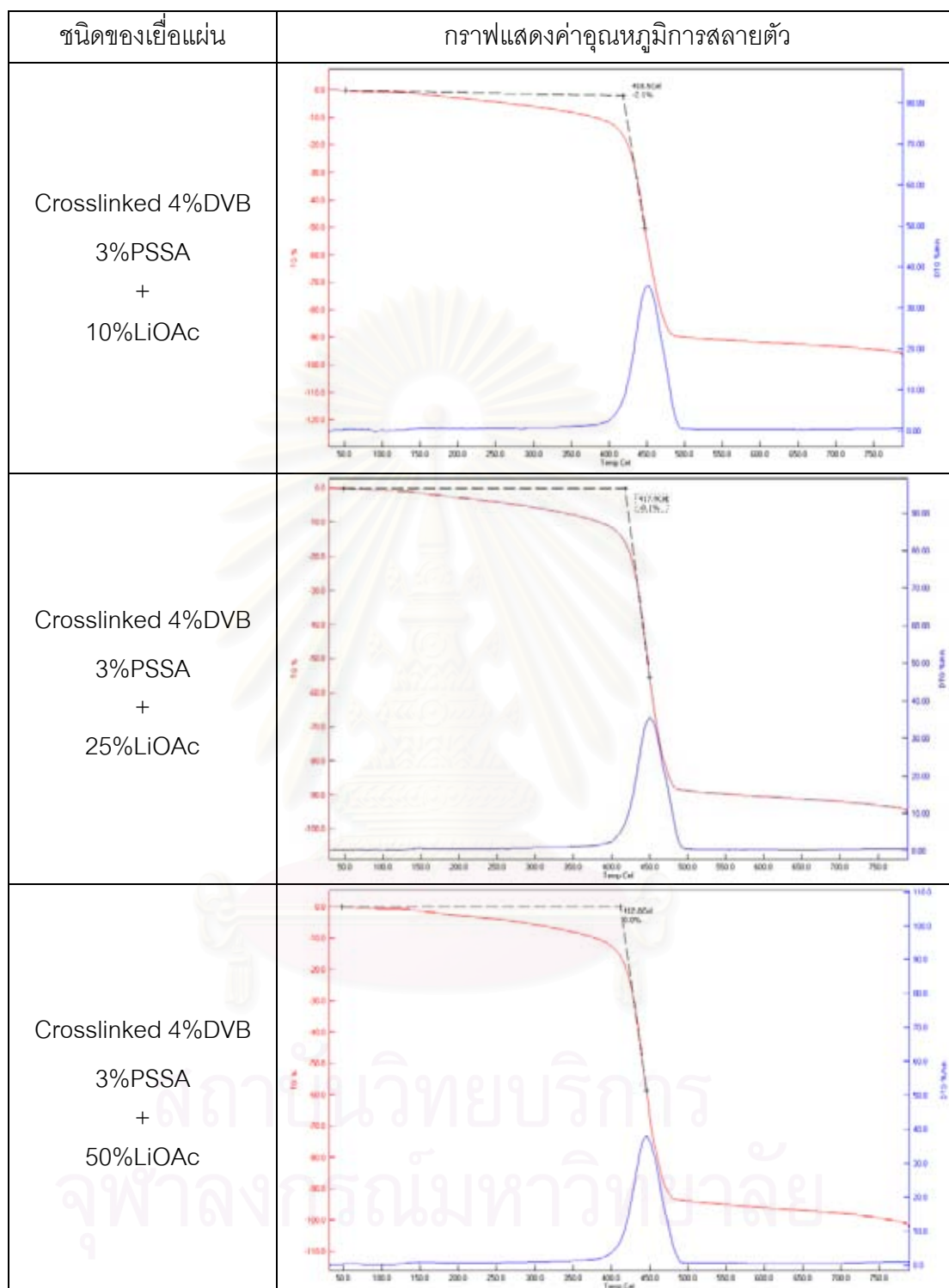
ตารางที่ ก.28 (ต่อ)



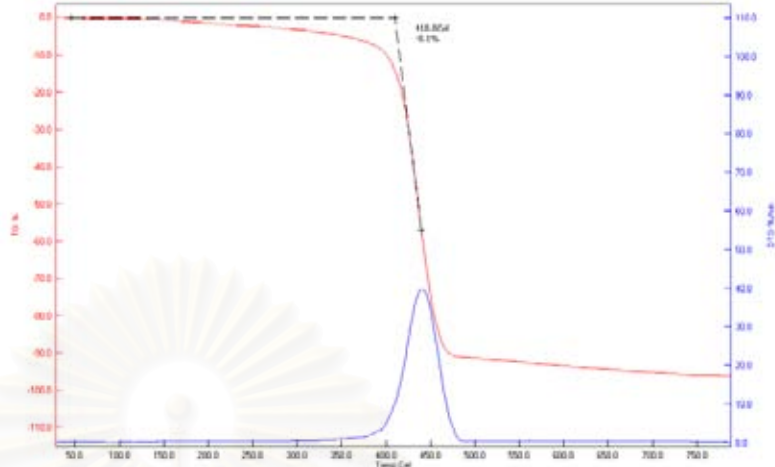
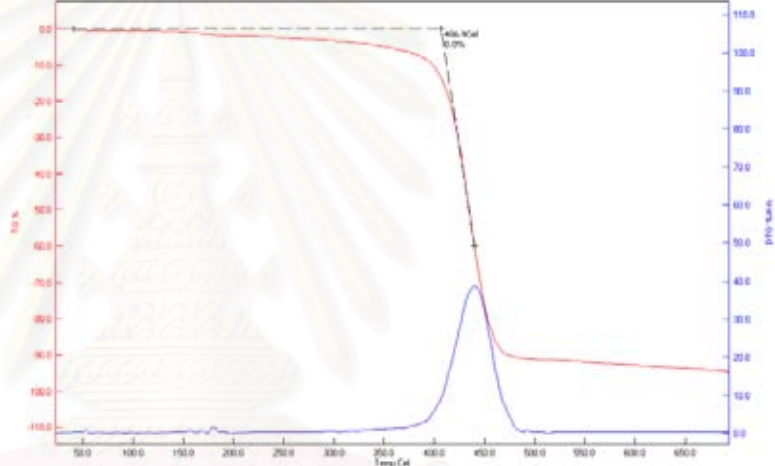
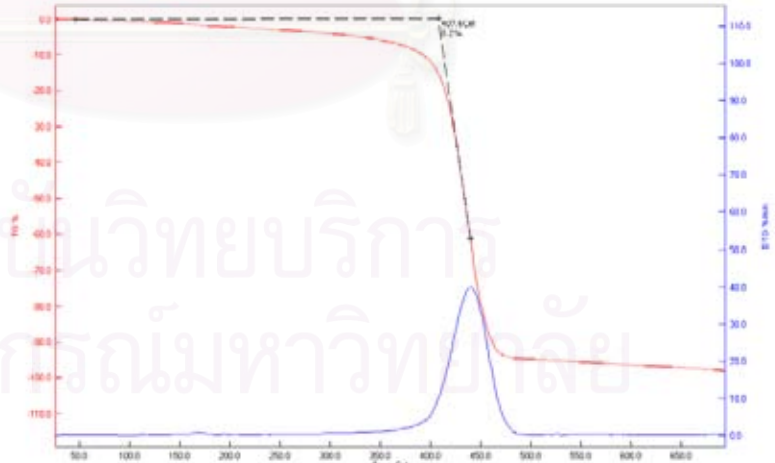
ตารางที่ ก.29 อุณหภูมิการสลายตัวของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%



ตารางที่ ก.29 (ต่อ)



ตารางที่ ก.29 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว
Crosslinked 4%DVB 3%PSSA + 10%LiOH	
Crosslinked 4%DVB 3%PSSA + 25%LiOH	
Crosslinked 4%DVB 3%PSSA + 50%LiOH	

5. ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

ตารางที่ ก.30 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่น Nafion® 117

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Nafion® 117	4.99	0.74

ตารางที่ ก.31 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของพอลิस्टไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked PS	0.39	0.09

ตารางที่ ก.32 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซิลฟอนเตดพอลิस्टไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA, 20µm	2.90	0.63
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA, 30µm	3.66	1.08
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA, 20µm	3.10	0.69
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA, 30µm	2.99	0.92
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA, 20µm	3.08	1.45
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA, 30µm	2.41	1.90
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA, 20µm	2.71	1.95
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA, 30µm	2.44	1.09

ตารางที่ ก.33 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซัลโฟเนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวางที่เติมเกลือลิเทียมแอสซีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 10%LiOAc, 20 μ m	2.69	0.27
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 10%LiOAc, 30 μ m	2.54	0.86
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 10%LiOAc, 20 μ m	2.23	0.41
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 10%LiOAc, 30 μ m	1.64	0.23
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 10%LiOAc, 20 μ m	2.15	0.63
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 10%LiOAc, 30 μ m	2.98	0.81
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 10%LiOAc, 20 μ m	3.12	1.73
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 10%LiOAc, 30 μ m	3.71	1.12
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 25%LiOAc, 20 μ m	2.84	1.13
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 25%LiOAc, 30 μ m	1.91	0.82
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 25%LiOAc, 20 μ m	1.55	0.23
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 25%LiOAc, 30 μ m	2.09	1.34
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 25%LiOAc, 20 μ m	1.92	0.59
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 25%LiOAc, 30 μ m	3.83	0.22
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 25%LiOAc, 20 μ m	1.92	0.47
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 25%LiOAc, 30 μ m	2.81	0.8
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 50%LiOAc, 20 μ m	1.25	0.58
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 50%LiOAc, 30 μ m	1.91	1.01
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 50%LiOAc, 20 μ m	2.03	1.64
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 50%LiOAc, 30 μ m	2.79	1.51

ตารางที่ ก.33 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 50%LiOAc, 20µm	1.71	0.16
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 50%LiOAc, 30µm	2.17	1.88
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 50%LiOAc, 20µm	1.71	1.36
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 50%LiOAc, 30µm	2.54	0.28

ตารางที่ ก.34 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซัลฟอนเตดพอลิไธรีนแบบ
ไม่เชื่อมขวางที่เติมเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 10%LiOH, 20µm	2.65	0.84
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 10%LiOH, 30µm	1.79	0.12
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 10%LiOH, 20µm	2.95	1.15
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 10%LiOH, 30µm	3.18	1.22
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 10%LiOH, 20µm	1.53	0.68
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 10%LiOH, 30µm	2.17	1.53
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 10%LiOH, 20µm	3.32	0.37
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 10%LiOH, 30µm	1.75	0.65
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 25%LiOH, 20µm	2.11	1.37
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 25%LiOH, 30µm	1.91	0.43
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 25%LiOH, 20µm	2.80	1.3
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 25%LiOH, 30µm	2.11	0.13
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 25%LiOH, 20µm	2.45	0.77

ตารางที่ ก.34 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 25%LiOH, 30 μ m	2.71	0.58
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 25%LiOH, 20 μ m	1.48	0.74
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 25%LiOH, 30 μ m	3.00	0.89
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 50%LiOH, 20 μ m	1.87	0.10
Uncrosslinked_250 μ m 3%PSSA + 50%LiOH, 30 μ m	2.72	1.04
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 50%LiOAc, 20 μ m	1.80	0.14
Uncrosslinked_250 μ m 5%PSSA + 50%LiOAc, 30 μ m	2.20	0.47
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 50%LiOAc, 20 μ m	2.46	1.54
Uncrosslinked_150 μ m 3%PSSA + 50%LiOAc, 30 μ m	1.34	0.28
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 50%LiOAc, 20 μ m	3.65	0.11
Uncrosslinked_150 μ m 5%PSSA + 50%LiOAc, 30 μ m	2.28	0.15

ตารางที่ ก.35 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PS	0.54	0.33
Crosslinked_4%DVB 5%PS	0.55	0.10

ตารางที่ ก.36 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA	4.75	0.18

ตารางที่ ก.36 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA	4.68	0.20

ตารางที่ ก.37 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิ
สไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 10%LiOAc	4.60	0.16
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 10%LiOAc	2.53	0.31
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 25%LiOAc	3.77	0.66
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 25%LiOAc	2.36	0.35
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 50%LiOAc	2.10	0.47
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 50%LiOAc	1.22	0.15

ตารางที่ ก.38 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิ
สไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับเกลือไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 10%LiOH	3.77	0.48
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 10%LiOH	3.18	0.41
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 25%LiOH	1.72	0.10
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 25%LiOH	1.60	0.10
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA + 50%LiOH	1.44	0.27
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA + 50%LiOH	1.39	0.13

ตารางที่ ก.39 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PS	0.57	0.09
Crosslinked_7%DVB 5%PS	0.61	0.14

ตารางที่ ก.40 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA	5.69	0.15
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA	4.74	0.82

ตารางที่ ก.41 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือแอสซีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 10%LiOAc	5.35	0.30
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 10%LiOAc	5.20	0.13
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 25%LiOAc	5.28	0.10
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 25%LiOAc	4.51	1.26
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 50%LiOAc	2.74	0.29
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 50%LiOAc	2.48	0.22

ตารางที่ ก.42 การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นซัลโฟเนตพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเฉลี่ย (meq/g)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 10%LiOH	3.11	0.76
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 10%LiOH	2.38	0.95
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 25%LiOH	1.88	0.26
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 25%LiOH	1.88	1.15
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA + 50%LiOH	1.77	1.12
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA + 50%LiOH	1.47	0.81

6. ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

ตารางที่ ก.43 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	สภาพให้แก๊สซึมผ่านเฉลี่ย (P, Barrer)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Nafion [®] 117	987.98	20.945
5%PS	232.78	13.871
3%PS	372.97	34.030
5%PSSA_250 μ m	551.88	48.086
3%PSSA_250 μ m	470.17	21.685
5%PSSA_150 μ m	339.30	47.069
3%PSSA_150 μ m	480.73	19.234
5%PSSA + 10%LiOAc_250 μ m	306.93	31.256
3%PSSA + 10%LiOAc_250 μ m	323.54	55.114
5%PSSA + 10%LiOAc_150 μ m	202.34	24.552
3%PSSA + 10%LiOAc_150 μ m	293.43	5.780

ตารางที่ ก.43 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	สภาพให้แก๊สซึมผ่านเฉลี่ย (P, Barrer)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5%PSSA + 25%LiOAc_250 μ m	357.25	13.270
3%PSSA + 25%LiOAc_250 μ m	485.57	48.641
5%PSSA + 25%LiOAc_150 μ m	232.68	112.401
3%PSSA + 25%LiOAc_150 μ m	222.58	21.824
5%PSSA + 50%LiOAc_250 μ m	606.18	85.214
3%PSSA + 50%LiOAc_250 μ m	828.60	24.413
5%PSSA + 50%LiOAc_150 μ m	454.77	15.258
3%PSSA + 50%LiOAc_150 μ m	603.96	186.379
5%PSSA + 10%LiOH_250 μ m	558.09	8.230
3%PSSA + 10%LiOH_250 μ m	351.92	38.284
5%PSSA + 10%LiOH_150 μ m	229.15	11.975
3%PSSA + 10%LiOH_150 μ m	470.50	97.420
5%PSSA + 25%LiOH_250 μ m	540.63	56.593
3%PSSA + 25%LiOH_250 μ m	549.39	28.482
5%PSSA + 25%LiOH_150 μ m	396.58	208.711
3%PSSA + 25%LiOH_150 μ m	578.10	127.890
5%PSSA + 50%LiOH_250 μ m	770.01	63.621
3%PSSA + 50%LiOH_250 μ m	633.94	22.656
5%PSSA + 50%LiOH_150 μ m	621.35	144.951
3%PSSA + 50%LiOH_150 μ m	821.96	189.523

ตารางที่ ก.44 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิไสตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน

4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	สภาพให้แก๊สซึมผ่านเฉลี่ย (P, Barrer)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PS	752.32	14.195
Crosslinked_4%DVB 5%PS	610.73	55.854
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA	781.36	68.291
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA	734.83	69.540
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+10%LiOAc	522.71	1.295
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+10%LiOAc	586.53	21.269
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+25%LiOAc	546.29	26.863
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+25%LiOAc	586.27	21.269
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+50%LiOAc	498.45	27.464
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+50%LiOAc	352.70	10.542
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+10%LiOH	504.93	57.703
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+10%LiOH	470.96	2.266
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+25%LiOH	443.27	38.376
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+25%LiOH	436.86	23.581
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+50%LiOH	332.66	38.145
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+50%LiOH	365.26	58.813

ตารางที่ ก.45 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นพอลิไสตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน

7%

ชนิดของเยื่อแผ่น	สภาพให้แก๊สซึมผ่านเฉลี่ย (P, Barrer)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PS	785.67	21.685
Crosslinked_7%DVB 5%PS	691.19	12.068
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA	654.80	66.765
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA	504.60	6.751
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+10%LiOAc	530.62	58.535
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+10%LiOAc	372.32	0.925
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+25%LiOAc	488.22	21.130
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+25%LiOAc	349.73	3.838
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+50%LiOAc	444.90	56.593
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+50%LiOAc	322.63	3.514
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+10%LiOH	400.60	1.988
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+10%LiOH	364.41	43.370
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+25%LiOH	321.06	16.460
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+25%LiOH	315.04	47.901
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+50%LiOH	412.93	65.193
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+50%LiOH	305.62	29.406

8. ค่าการนำโปรตอน

ตารางที่ ก.46 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่น Nafion® 117

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Nafion® 117	0.092	0.028

ตารางที่ ก.47 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked 3%PS	0.002	0.0001
Uncrosslinked 5%PS	0.002	0.0000

ตารางที่ ก.48 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA	0.008	0.0004
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA	0.006	0.0010
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA	0.009	0.0011
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA	0.008	0.0015

ตารางที่ ก.49 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 10%LiOAc	0.010	0.0014
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 10%LiOAc	0.007	0.0007

ตารางที่ ก.49 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 10%LiOAc	0.007	0.0002
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 10%LiOAc	0.008	0.0010
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 25%LiOAc	0.005	0.0012
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 25%LiOAc	0.007	0.0007
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 25%LiOAc	0.009	0.0026
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 25%LiOAc	0.008	0.0010
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 50%LiOAc	0.003	0.0006
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 50%LiOAc	0.008	0.0004
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 50%LiOAc	0.005	0.0017
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 50%LiOAc	0.005	0.0005

ตารางที่ ก.50 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนแบบไม่เชื่อมขวาง และคอมโพสิตกับเกลือไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 10%LiOH	0.011	0.0000
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 10%LiOH	0.006	0.0005
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 10%LiOH	0.007	0.0002
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 10%LiOH	0.010	0.0007
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 25%LiOH	0.016	0.0014
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 25%LiOH	0.007	0.0008
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 25%LiOH	0.018	0.0016

ตารางที่ ก.50 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 25%LiOH	0.010	0.0015
Uncrosslinked_250µm 3%PSSA + 50%LiOH	0.004	0.0000
Uncrosslinked_250µm 5%PSSA + 50%LiOH	0.004	0.0000
Uncrosslinked_150µm 3%PSSA + 50%LiOH	0.006	0.0005
Uncrosslinked_150µm 5%PSSA + 50%LiOH	0.003	0.0001

ตารางที่ ก.51 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วย ไดไวนิลเบนซีน 4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PS	0.003	0.0000

ตารางที่ ก.52 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA	0.019	0.0001
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA	0.015	0.0005

ตารางที่ ก.53 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีนเชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสซีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+ 10%LiOAc	0.020	0.0015

ตารางที่ ก.53 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+ 10%LiOAc	0.016	0.0018
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+ 25%LiOAc	0.027	0.0003
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+ 25%LiOAc	0.023	0.0019
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+ 50%LiOAc	0.033	0.0007
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+ 50%LiOAc	0.025	0.0005

ตารางที่ ก.54 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน
เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 4% และคอมโพสิตกับเกลือไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+ 10%LiOH	0.032	0.0007
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+ 10%LiOH	0.028	0.0011
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+ 25%LiOH	0.029	0.0010
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+ 25%LiOH	0.020	0.0016
Crosslinked_4%DVB 3%PSSA+ 50%LiOH	0.013	0.0011
Crosslinked_4%DVB 5%PSSA+ 50%LiOH	0.013	0.0003

ตารางที่ ก.55 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นพอลิสไตรีนเชื่อมขวาง
ด้วย ไดไวนิลเบนซีน 7%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PS	0.001	0.0000

ตารางที่ ก.56 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน
เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7%

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA	0.024	0.0011
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA	0.015	0.0008

ตารางที่ ก.57 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน
เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมแอสีเทต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+ 10%LiOAc	0.030	0.0009
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+ 10%LiOAc	0.019	0.0021
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+ 25%LiOAc	0.017	0.0008
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+ 25%LiOAc	0.013	0.0007
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+ 50%LiOAc	0.016	0.0008
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+ 50%LiOAc	0.011	0.0004

ตารางที่ ก.58 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นซัลฟอนเตดพอลิสไตรีน
เชื่อมขวางด้วยไดไวนิลเบนซีน 7% และคอมโพสิตกับเกลือลิเทียมไฮดรอกไซด์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+ 10%LiOH	0.021	0.0010
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+ 10%LiOH	0.017	0.0018
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+ 25%LiOH	0.026	0.0006

ตารางที่ ก.58 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอนเฉลี่ย (S/cm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+ 25%LiOH	0.014	0.0012
Crosslinked_7%DVB 3%PSSA+ 50%LiOH	0.016	0.0001
Crosslinked_7%DVB 5%PSSA+ 50%LiOH	0.015	0.0007



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนา

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.2 เยื่อแผ่น Nafion[®] 117 ของตัวอย่างที่ 1

ความหนาเยื่อแผ่นแห้งเฉลี่ย	=	155.33	ไมโครเมตร
ความหนาเยื่อแผ่นเปียกเฉลี่ย	=	173.00	ไมโครเมตร

$$\% \text{Thickness change} = \frac{(\text{Thickness}_{\text{wet}} - \text{Thickness}_{\text{dry}}) \times 100}{\text{Thickness}_{\text{dry}}}$$

$$\therefore \% \text{Thickness change} = \frac{(173.00 - 155.33) \times 100}{155.33} = 11.52$$

2. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.30 เยื่อแผ่น Nafion[®] 117 ของตัวอย่างที่ 1

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	0.005	นอร์มอล
ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	=	0.005	นอร์มอล
ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	25	มิลลิลิตร
ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเฉลี่ย	=	1.05	มิลลิลิตร
ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ดูต่อมาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	=	10	มิลลิลิตร
น้ำหนักของเยื่อแผ่น	=	0.0203	กรัม

$$\text{Ion exchange capacity} = \frac{\left(N_1 V_1 - \left(\frac{V_1}{V_3} \right) N_2 V_2 \right)}{m}$$

เมื่อ

N_1	=	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)
N_2	=	ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล)
V_1	=	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)
V_2	=	ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)
V_3	=	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ดูต่อมาไทเทรตกับ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)
m	=	น้ำหนักของเยื่อแผ่น (กรัม)

$$\therefore \text{Ion exchange capacity} = \frac{(0.005(25) - \left(\frac{25}{10}\right)(0.005)(1.05))}{0.0203} = 5.51 \text{ meq/g}$$

3. ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.43 เยื่อแผ่น Nafion[®] 117 ของตัวอย่างที่ 1

อัตราการไหลผ่านเยื่อ	=	0.0068	Sccs
ความดันต่าง	=	105.6	cmHg
ความหนาของเยื่อแผ่น	=	0.0121	cm
พื้นที่ของเยื่อแผ่น	=	8.0457	cm ²

$$P = \frac{Q \times l}{\Delta P \times A}$$

P = ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน (cm³(STP)*cm)/(s*cm²*cmHg)

Q = อัตราการไหลผ่านเยื่อแผ่น (Sccs)

l = ความหนาของเยื่อแผ่น (cm)

ΔP = ความดันต่าง (cmHg)

A = พื้นที่ของเยื่อแผ่น (cm²)

$$P = \frac{0.0068 \times 0.0121}{105.6 \times 8.0457} = 9.73 \times 10^{-8} \text{ (cm}^3\text{(STP)*cm)/(s*cm}^2\text{*cmHg)}$$

$$\therefore P = 973.17 \text{ Barrer}$$

$$1 \text{ Barrer} = 10^{-10} \text{ (cm}^3\text{(STP)*cm)/(s*cm}^2\text{*cmHg)}$$

4. ค่าการนำโปรตอน

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.46 เยื่อแผ่น Nafion® 117 ของตัวอย่างที่ 1

$$\text{ความหนาของเยื่อแผ่น} = 0.0141 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ความกว้างของเยื่อแผ่น} = 1.00 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ระยะห่างระหว่างลวดแพลทินัม} = 0.50 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ของเยื่อแผ่น} &= \text{ความหนาของเยื่อแผ่น} \times \text{ความกว้างของเยื่อแผ่น} \\ &= 0.0141 \times 1.00 \\ &= 0.0141 \text{ ตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

$$\sigma = \frac{1}{R} \left(\frac{l}{A} \right)$$

$$\sigma = \text{ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)}$$

$$R = \text{ความต้านทาน (โอห์ม)}$$

$$l = \text{ระยะห่างระหว่างลวดแพลทินัม (เซนติเมตร)}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของเยื่อแผ่น (ตารางเซนติเมตร)}$$

$$\therefore \sigma = \frac{1}{379} \left(\frac{0.5}{0.0141} \right) = 0.094 \text{ ซีเมนส์/เซนติเมตร}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกัณตสุดา เวชรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน พุทธศักราช 2522 จบการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรมในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิคในปี 2545 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย