

การเตรียมและลักษณะสมบัติของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจากไคโตซานคอมโพสิต



นางสาวอัญชลี อินตรา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5072-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF CHITOSAN COMPOSITE  
BASED PROTON EXCHANGE MEMBRANE



Miss Unchalee Intra

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5072-2



อัญชลี อินตรา: การเตรียมและลักษณะสมบัติของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจากไคโตซาน  
(PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF CHITOSAN COMPOSITE BASED  
PROTON EXCHANGE MEMBRANE) อ. ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ชันทอง สุนทรภา, 113 หน้า.  
ISBN 974-17-5072-2.

งานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตเพื่อใช้เป็นเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิง โดยมีการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก การเติมเกลือลิเทียมไนเตรตและลิเทียมแอสซิเตต การเติมเอทิลีนคาร์บอนเนต และการโดปด้วยกรดซัลฟิวริกพบว่า เยื่อแผ่นมีสมบัติที่ดีกว่า Nafion® ในด้านค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน และความสามารถทนต่อแรงดึง สำหรับสมบัติที่ยังต้องมีการปรับปรุงต่อไป ได้แก่ ค่าร้อยละการบวมตัวของเยื่อแผ่นที่มีค่าน้อยลงภายหลังการปรับปรุงแต่ยังคงมีค่าสูง ค่าการนำโปรตอนสูงขึ้นแต่ยังน้อยกว่า Nafion® จากการศึกษาพบว่าปริมาณของเกลือลิเทียมร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้เชื่อมขวางเท่ากับร้อยละ 2 หรือ 4 เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการปรับปรุงเยื่อแผ่น สามารถทำนายกลไกการเคลื่อนที่ของโปรตอนว่า เคลื่อนที่ในรูปแบบของไฮโดรเนียมโดยการเคลื่อนที่ไปตามหมู่ซัลเฟตในเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวางมีประสิทธิภาพมากกว่าการเคลื่อนที่ผ่านหมู่อะมิโนในเยื่อแผ่นที่ไม่ได้เชื่อมขวาง การเติมเอทิลีนคาร์บอนเนตและเกลือลิเทียมจะช่วยให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของไฮโดรเนียมดีขึ้น การโดปด้วยกรดซัลฟิวริกจะทำให้ไฮโดรเนียมผ่านได้ง่ายขึ้นและมากขึ้น

เยื่อแผ่นที่มีสมบัติซึ่งเหมาะสมในการนำไปใช้ทดแทน Nafion® ได้ คือ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> ซึ่งมีค่าการนำโปรตอนหลังจากโดปเท่ากับ 0.066 ซีเมนส์/เซนติเมตร ในขณะที่ Nafion® มีค่าเท่ากับ 0.08 ซีเมนส์/เซนติเมตร

ภาควิชา เคมีเทคนิค  
สาขาวิชา เคมีเทคนิค  
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4472499923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CHITOSAN / COMPOSITE MEMBRANE / PROTON CONDUCTIVITY

UNCHALEE INTRA : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF CHITOSAN COMPOSITE BASED PROTON EXCHANGE MEMBRANE. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. KHANTONG SOONTARAPA, D. ENG, 113 pp. ISBN 974-17-5072-2.

In this research, various chitosan composite membranes were prepared for using as proton exchange membrane in fuel cell. The membranes were made by crosslinking with sulfuric acid, addition of lithium nitrate, lithium acetate and ethylene carbonate and doping with sulfuric acid. It was found that the prepared membranes possessed better properties than Nafion<sup>®</sup> in term of ion exchange capacity, hydrogen permeability and tensile strength. Some properties, which had to be improved, were the swelling and proton conductivity. Although they were improved after composition but still be worse than Nafion<sup>®</sup>. From the studies, the appropriate quantities of lithium salts and sulfuric acid were 50% and 2% or 4%, respectively. The sulfate groups in crosslinked membranes conducted the protons in the form of hydroniums ions more efficient than through the amino groups in uncrosslinked membranes. The addition of ethylene carbonate and lithium salts made the polymer chain be more flexible providing better hydronium transport. The doping with sulfuric acid provided easier and more hydronium ions passing through membranes.

The appropriate membrane to replace Nafion<sup>®</sup> was 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> membrane whose proton conductivity after dope was 0.066 S/cm whereas Nafion<sup>®</sup> was 0.08 S/cm.

Department Chemical Technology    Student's signature.....  
 Field of study Chemical Technology    Advisor's signature.....  
 Academic year 2003    Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรามา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

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.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง.....	3
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง.....	5
2.3 พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์.....	11
2.4 ไคโตซาน.....	12
2.5 กลไกการนำไอออนในตัวนำโปรตอน.....	12
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
3. วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	16
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	17
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	17
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	
4.1 สมบัติของโคโตซาน.....	31
4.2 ความสามารถทนต่อแรงดึง.....	32
4.3 ร้อยละการบวมตัว.....	34
4.4 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	36
4.5 คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว.....	39
4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	40
4.7 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน.....	42
4.8 ค่าการนำโปรตอน.....	45
4.9 กลไกการนำโปรตอน.....	51
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลจากผลการทดลอง.....	65
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์สมบัติของเกล็ดโคโตซาน.....	19
ตารางที่ 3.2 ชนิดของเยื่อแผ่น.....	22
ตารางที่ 4.1 สมบัติของโคโตซาน.....	31
ตารางที่ 4.2 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นโคโตซาน และเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต.....	43
ตารางที่ 4.3 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต และเอทิลีนคาร์บอนเนต.....	44
ตารางที่ 4.4 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมแอสเทต.....	44
ตารางที่ ก.1 การหาความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์โซเดียม โดยการไทเทรตสารละลายไฮดรอกไซด์โซเดียมกับสารละลาย KHP 0.112 โมล/ลิตร.....	65
ตารางที่ ก.2 การไทเทรตสารละลายโคโตซานไฮดรอกไซด์กับสารละลาย ไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.110 โมล/ลิตร.....	65
ตารางที่ ก.3 ค่าร้อยละผลได้และการกำจัดหมู่อะเซทิลของโคโตซาน.....	66
ตารางที่ ก.4 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเยื่อแผ่น.....	67
ตารางที่ ก.5 น้ำหนักของเยื่อแผ่นขณะแห้งและเปียก.....	74
ตารางที่ ก.6 ร้อยละการบวมตัว.....	81
ตารางที่ ก.7 น้ำหนักแห้งของเยื่อแผ่นที่นำมาหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน.....	88
ตารางที่ ก.8 ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.005 นอร์มอล ที่ใช้ในการ การไทเทรตกับสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.005 นอร์มอลเพื่อหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน.....	90
ตารางที่ ก.9 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่น.....	93
ตารางที่ ก.10 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว.....	96
ตารางที่ ก.11 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน.....	98
ตารางที่ ก.12 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวาง.....	103
ตารางที่ ก.13 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นโคโตซานคอมโพสิต.....	103
ตารางที่ ก.14 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นโคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง (LiNO <sub>3</sub> ) และเติมสารพลาสติกไซเซอร์.....	104

**สารบัญตาราง (ต่อ)**

	หน้า
ตารางที่ ก.15 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นไคซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง(LiOAc).....	104
ตารางที่ ก.16 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่โดปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก.....	105
ตารางที่ ก.17 ค่าการนำโปรตอนที่ความชื้นต่างๆ.....	106



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	หลักการทํางานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง.....	5
รูปที่ 2.2	การเตรียม Nafion <sup>®</sup> หรือ Perfluorosulfonic acid polymer ของบริษัท DuPont.....	8
รูปที่ 2.3	การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของเยื่อแผ่น Nafion <sup>®</sup> ที่ผลิตโดยบริษัท DuPont กับเยื่อแผ่นฟลูออโรซัลโฟเนตไอโอโนเมอร์ ที่ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical.....	10
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างโครงสร้างของ a) พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่มีเกลือ MX ประกอบอยู่ b) พอลิอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีแอนไอออนสร้างพันธะติดอยู่กับพอลิเมอร์.....	11
รูปที่ 2.5	โครงสร้างทางเคมีของโคโคซาน.....	12
รูปที่ 3.1	แผนภาพวิธีการเตรียมเยื่อแผ่น.....	24
รูปที่ 3.2	แผนภาพวิธีการโคปเยื่อแผ่น.....	25
รูปที่ 3.3	เครื่อง Universal testing LLOYD Instruments LR 5K.....	25
รูปที่ 3.4	ชุดทดสอบการซึมผ่านของแก๊ส.....	28
รูปที่ 3.5	การวัดค่าการนำโปรตอนด้วยวิธี Four probe method.....	30
รูปที่ 4.1	ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต a) เยื่อแผ่นที่ไม่เติมสารพลาสติกไซเซอร์ b) เยื่อแผ่นที่เติมสารพลาสติกไซเซอร์.	33
รูปที่ 4.2	ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต และลิเทียมแอสซีเทต.....	34
รูปที่ 4.3	ค่าร้อยละการบวมตัวของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต a) เยื่อแผ่นที่ไม่เติมสารพลาสติกไซเซอร์ b) เยื่อแผ่นที่เติมสารพลาสติกไซเซอร์.	35
รูปที่ 4.4	ค่าร้อยละการบวมตัวของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต และลิเทียมแอสซีเทต.....	36
รูปที่ 4.5	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต a) เยื่อแผ่นที่ไม่เติมสารพลาสติกไซเซอร์ b) เยื่อแผ่นที่เติมสารพลาสติกไซเซอร์.	38
รูปที่ 4.6	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต และลิเทียมแอสซีเทต.....	38

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 DSC Thermograms ของ a) uncrosslinked chitosan b) 4% crosslinked chitosan c) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO <sub>3</sub> d) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO <sub>3</sub> + EC .....	39
รูปที่ 4.8 คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมในปริมาณต่างๆ.....	40
รูปที่ 4.9 ภาควัดขวางของเยื่อแผ่นก่อนและหลังการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง a) uncrosslinked chitosan b) 4% crosslinked chitosan c) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO <sub>3</sub> .....	41
รูปที่ 4.10 ภาควัดขวางของ Nafion <sup>®</sup> .....	41
รูปที่ 4.11 การเคลื่อนที่ของโปรตอนใน Free volume.....	42
รูปที่ 4.12 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวาง.....	46
รูปที่ 4.13 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมในปริมาณต่างๆ.....	47
รูปที่ 4.14 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่โดปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 %w/w .....	47
รูปที่ 4.15 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นต่างๆ.....	48
รูปที่ 4.16 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวางที่ความชื้นต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.17 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือและเอทิลีนคาร์บอนเนตที่ความชื้นต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.18 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่โดปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1%w/wที่ความชื้นต่างๆ.....	51
รูปที่ 4.19 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวาง.....	52
รูปที่ 4.20 FTIR spectra ของเยื่อแผ่น a) uncrosslinked chitosan b) 2 %crosslinked chitosan c) 4% crosslinked chitosan d) 6% crosslinked chitosan.....	52
รูปที่ 4.21 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมในปริมาณต่างๆ.....	53
รูปที่ 4.22 FTIR spectra ของเยื่อแผ่น a) chitosan b) chitosan + 50%LiNO <sub>3</sub> .....	54
รูปที่ 4.23 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวางและไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง.....	55
รูปที่ 4.24 FTIR spectra ของเยื่อแผ่น a) chitosan b) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO <sub>3</sub> + EC.....	55

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.25 FTIR spectra ของเยื่อแผ่น a) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO <sub>3</sub>	
b) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO <sub>3</sub> + EC.....	56



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้พลังงานมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากความต้องการในการใช้มีสูงขึ้นทุกปี ในขณะที่แหล่งพลังงานมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นจึงต้องมีการหาวิธีใช้พลังงานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และรักษาสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป หรือหาแหล่งพลังงานใหม่ทดแทน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรง ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงและสูญเสียพลังงานน้อยกว่า นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งผลิตพลังงานที่สะอาด และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้มีการนำโคโตซานซึ่งเตรียมขึ้นได้จากเปลือกกุ้งมาทำเป็นเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1] พบว่าค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นโคโตซานดีขึ้น เมื่อได้รับการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเยื่อแผ่นโคโตซานที่โดป (Dope) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงว่าโคโตซานนั้นมีความเป็นไปได้ในการที่จะนำมาใช้เป็นเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน แต่ยังคงต้องการปรับปรุงให้มีค่าการนำโปรตอนที่ดีขึ้นอีก จึงมีแนวความคิดในการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของเยื่อแผ่นโคโตซานโดยการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ ที่จะช่วยให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น เพื่อเพิ่มขนาดช่องว่าง (Free volume) และการเติมสารประกอบลิเทียม เพราะโคโตซานมี Heteroatom เช่น ไนโตรเจนและออกซิเจน ซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวที่สามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับสารประกอบตัวอื่นๆ เรียกเยื่อแผ่นที่มีการเติมสารประกอบลิเทียม และ/หรือสารพลาสติกไซเซอร์ว่า เยื่อแผ่นโคโตซานคอมโพสิต

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เตรียมเยื่อแผ่นโคโตซานคอมโพสิตเพื่อนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงประเภทเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
2. ศึกษาลักษณะสมบัติของเยื่อแผ่นโคโตซานคอมโพสิตที่เตรียมได้
3. ศึกษากลไกการเคลื่อนที่ของโปรตอนในเยื่อแผ่นโคโตซานคอมโพสิต

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมเยื่อแผ่นโคโตะซานและโคโตะซานคอมโพสิตโดยการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ เอทีลินคาร์บอนเนต เชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก และเติมเกลือ 2 ชนิด คือ ลิเทียมไนเตรต และลิเทียมแอสซีเทต ดังนี้

- เติมลิเทียมไนเตรตร้อยละ 5, 10, 20, 40, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักโคโตะซาน
- เติมลิเทียมแอสซีเทตร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักโคโตะซาน
- เติมเอทีลินคาร์บอนเนตร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักโคโตะซาน
- เชื่อมขวางในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก
- โด๊ปเยื่อแผ่นด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

2. วิเคราะห์สมบัติของเยื่อแผ่น ดังนี้

- 1) สมบัติกายภาพ ได้แก่ ความสามารถทนต่อแรงดึง ร้อยละการบวมตัว ลักษณะพื้นฐานของเยื่อแผ่นด้วย Scanning Electron Microscopy และความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน
- 2) สมบัติเคมี ได้แก่ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Microscopy และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วด้วย Differential Scanning Calorimeter
- 3) สมบัติการนำไอออน ได้แก่ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และค่าการนำโปรตอน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใหม่จากวัสดุภายในประเทศ
2. เข้าใจกลไกการเคลื่อนที่ของโปรตอนในเยื่อแผ่นโคโตะซาน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง [2]

เซลล์เชื้อเพลิง คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ (Battery) กล่าวอีกนัยหนึ่ง เซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่อีกอย่างหนึ่ง คือ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตเป็นหน่วยเล็กๆ แล้วสามารถนำมาต่อเข้าด้วยกัน ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะที่แตกต่างกับแบตเตอรี่ตรงที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือแก๊สเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ในเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ถูกใช้หมดไป เซลล์เชื้อเพลิงนับว่าเป็นเทคโนโลยีที่ล้ำหน้าทันสมัย ด้วยเหตุผลง่ายๆ 3 ประการ คือ “ประสิทธิภาพสูง สะอาด เงียบ”

เซลล์เชื้อเพลิงไม่ก่อให้เกิดสารพิษต่างๆ ผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ น้ำ ( $H_2O$ ) แก๊สที่ปล่อยออกมาจากเซลล์เชื้อเพลิงมีปริมาณของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) ต่ำกว่าระดับมาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดโดยกองควบคุมมลพิษ

ในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่มีความพรุน 2 ขั้ว (แอโนดและแคโทด) กลุ่มหรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเหลวและ/หรือของแข็ง เชื้อเพลิงซึ่งได้แก่ แก๊สธรรมชาติหรือไฮโดรเจนถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแอโนด (Anode) ในขณะที่ตัวออกซิไดซ์ (Oxidant) ถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแคโทด (Cathode) แก๊สไฮโดรเจนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยจะมีการให้หรือปล่อยอิเล็กตรอน (Electron) ที่ขั้วแอโนด ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของแก๊สออกซิไดซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังแสดงในสมการที่ (2.2)





จากปฏิกิริยาทั้งสองข้างต้น จะก่อให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (Direct – current หรือ DC) โดยขั้วอิเล็กโทรดทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งปฏิกิริยา (Reaction site) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้าของเชื้อเพลิง และตัวออกซิไดซ์ขึ้น จะเห็นว่าออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนแล้วเกิดเป็นน้ำ และทุกๆหนึ่งโมลของน้ำที่เกิดขึ้น จะเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนจำนวน 2 ตัว

แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ผลิตขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibb's free energy) ของเชื้อเพลิง ค่าแอกติวิตี (Activities) ของสารตั้งต้น ตลอดจนกระแสไฟฟ้าที่ถูกดึงออก การประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ มักต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสลับ (Alternating current power หรือ AC) ดังนั้นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง จึงต้องถูกนำมาเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เครื่องผกผันหรืออินเวอร์เตอร์ (Inverter)

วิธีจำแนกประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงที่ง่ายที่สุด คือ การจัดแบ่งตามประเภทของสารอิเล็กโทรไลต์ การจัดแบ่งแบบนี้สามารถแบ่งเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cells) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรด (Acid fuel cells) เซลล์เชื้อเพลิงแบบสารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นเกลือหลอมเหลว (Molten salt electrolyte fuel cells) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของของแข็ง (Solid oxide fuel cells)

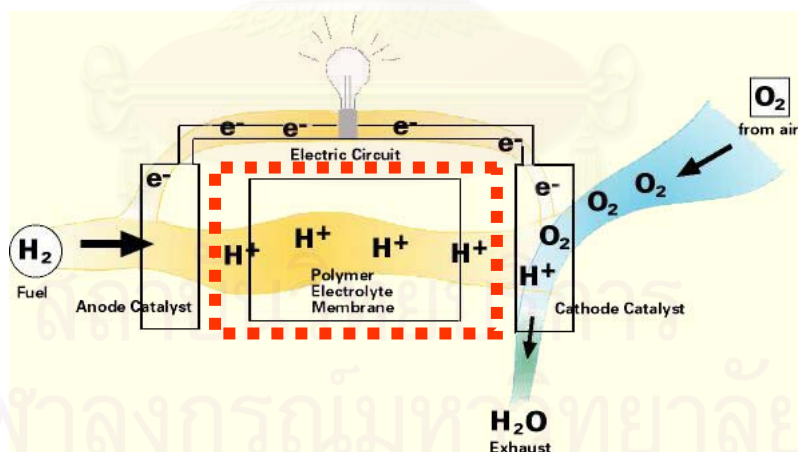
เซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตขึ้นมาเมื่อไม่นานมานี้มีอยู่หลายประเภท แต่ที่ได้รับการพัฒนาจนถึงระดับผลิตในขั้นอุตสาหกรรมมีอยู่เพียง 3 ประเภท ได้แก่

- 1) เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ซึ่งมีการทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส
- 2) เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นเกลือคาร์บอเนต (Carbonate salt) ซึ่งมีการทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส
- 3) เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นออกไซด์ของของแข็ง (Solid oxide) ซึ่งมีการทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส

## 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง (Solid Polymer Fuel Cells) [3]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งต้องการเคลื่อนย้าย เช่น การใช้กับรถยนต์ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวมีค่าความหนาแน่นของกำลังงาน (Power density) สูง ถึงแม้ว่าสภาวะอุณหภูมิการทำงานจะมีค่าอยู่ในช่วง 60 – 100 องศาเซลเซียส เซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ถูกผลิตขึ้นเป็นครั้งแรก เพื่อใช้กับองค์การอวกาศของสหรัฐอเมริกาหรือองค์การนาซา (NASA) โดยบริษัท General Electric ในช่วงทศวรรษที่ 1960 เหตุผลที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ถูกเลือกใช้ในโครงการอวกาศ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SPFC นี้มีค่าความหนาแน่นพลังงานสูง (Power density) เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ไม่มีการกัดกร่อน และหอสเซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้สามารถประกอบได้ง่ายเพราะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน

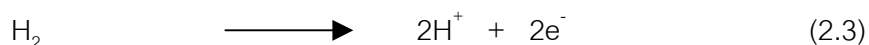
เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งประกอบด้วยเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ในที่นี้เยื่อแผ่นจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอน เยื่อแผ่นดังกล่าวจะถูกประกบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่มีความพรุนตัวและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลตินัม (Pt) เกาะอยู่ รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ น้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกดึงออกจากเซลล์มาเก็บกับแก๊สทางฝั่งแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง [4]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบ SPFC นี้ต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่มีความชื้น (Humidified gases) ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขั้วอิเล็กโทรด มีดังนี้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด : ไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์แล้วเกิดเป็น  $H^+$  (ไฮโดรเจนไอออน) และอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2.3



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด :  $H^+$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดจะเกิดการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นมาที่ขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ 2.4



ปฏิกิริยาสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งแสดงดังสมการที่ 2.5



อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งจะไม่ใช่อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว แต่เป็นเยื่อแผ่นที่เหมือนพลาสติกที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่สามารถนำไอออนของไฮโดรเจนได้ดี เยื่อแผ่นที่เคยนำมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งมีอยู่มากมายรวมทั้งพอลิเมอร์ที่ทำมาจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น Cross-linked polystyrene-divinylbenzene sulfonic acids และ Sulfonated phenolformaldehyde เป็นต้น โดยทั่วไปเยื่อแผ่นดังกล่าวข้างต้นจะมีฤทธิ์เป็นกรด เนื่องจากมีกลุ่มกรดซัลโฟนิคที่อยู่ในเนื้อเมทริกซ์ สำหรับเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ของแข็งที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะมีลักษณะเป็นเจล (Gel) ซึ่งต้องมีโมเลกุลของน้ำและโปรตอนอยู่จึงจะเกิดการนำไอออนได้ อัตราส่วนระหว่างโมเลกุลของน้ำต่อโปรตอน เพื่อให้เกิดการนำไอออนได้ดีที่สุด คือ ประมาณ 3 ต่อ 1 ดังนั้นค่าการนำไอออนของพอลิเมอร์ดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับค่าความดันของน้ำที่ตำแหน่งนั้นๆ (หรืออีกนัยหนึ่งก็คือขึ้นอยู่กับอุณหภูมินั่นเอง) โดยภาพรวมสามารถพิจารณาว่าเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ของแข็งส่วนใหญ่เป็น อิเล็กโทรไลต์กรด (Acid electrolyte) ที่ซึ่งไอออนลบ (Anion) จะถูกยึดไว้โดยโครงสร้างพอลิเมอร์

สำหรับเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นกรดซึ่งถูกใช้เป็นตัวนำอิเล็กโทรไลต์จะต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีค่าการนำไอออนสูง
2. มีการแพร่ของแก๊สต่ำ

3. มีขนาดที่แน่นอน
4. มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
5. มีค่าการแพร่ของน้ำต่ำ
6. มีความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำ (Dehydration)
7. มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันและไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
8. มีค่าการถ่ายเทไอออนบวก (Cation) สูง
9. พื้นผิวของเยื่อแผ่นต้องสามารถเชื่อมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกาะบนพื้นผิวได้ดี
10. มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity)

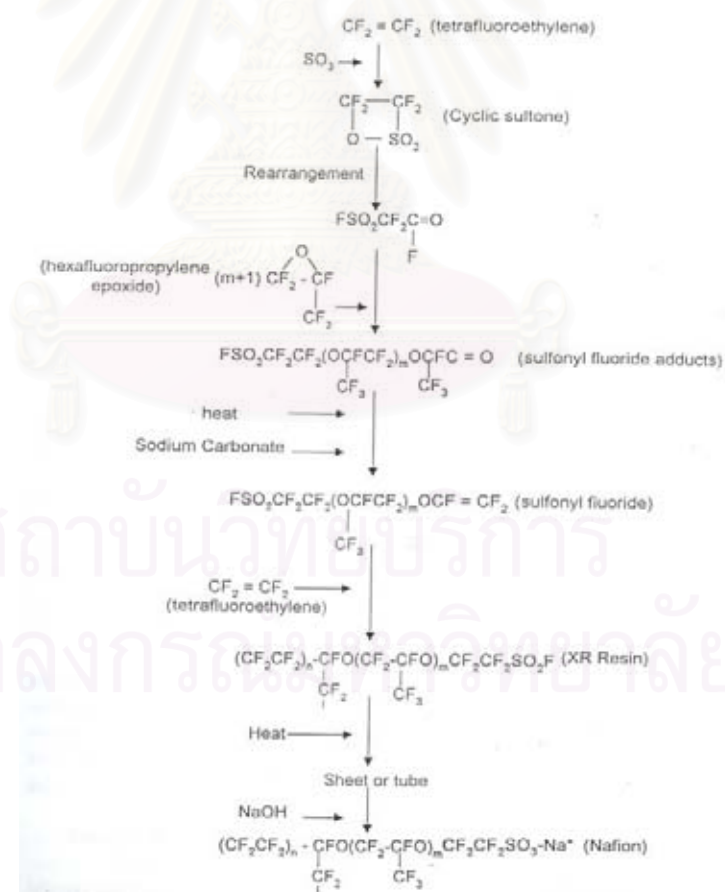
แต่เนื่องจากไม่มีเยื่อแผ่นใดที่จะมีสมบัติเบื้องต้นครบทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องพยายามเลือกให้มีความเหมาะสมมากที่สุด

งานพัฒนาเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน ได้เริ่มโดยบริษัท General Electric ซึ่งผลิตโดยการควบแน่นกรดฟีนอลซัลโฟนิค (Phenolsulfonic acid) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เยื่อแผ่นนี้จะมีความเปราะและแตกได้ง่าย เมื่อเยื่อแผ่นแห้ง และถูกไฮโดรไลซิสได้อย่างรวดเร็ว กลายเป็นกรดซัลฟิวริก เยื่อแผ่นแบบพอลิเมอร์ของแข็งชุดถัดมาผลิตได้จากการทำซัลโฟเนชันบางส่วน (Partial sulfonation) ของพอลิสไตรีน (Polystyrene) แต่สมบัติของเยื่อแผ่นนี้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เพราะมีอายุการใช้งานสั้น คือ ประมาณ 200 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เยื่อแผ่นชุดต่อมาที่ได้รับการพัฒนา คือ เยื่อแผ่นที่ได้จากการใช้สไตรีนไดไวนิลเบนซีน (Styrene divinylbenzene) ที่เกาะอยู่บนเมทริกซ์ที่ทำมาจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon matrix) ที่เฉื่อย แล้วตามด้วยการทำซัลโฟเนชัน เยื่อแผ่นนี้จัดเป็นเยื่อแผ่นชุดแรกที่มีความแข็งแรงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ทั้งในสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งเยื่อแผ่นนี้ได้ถูกนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในยานอวกาศ Gemini 7 ในปี ค.ศ. 1964 แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นนี้สามารถใช้งานได้นานแค่ 500 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพราะเกิดการเสื่อมสภาพของพันธะ C-H ตรงตำแหน่งอัลฟา (Alpha) ในโครงสร้างของเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ ภายหลังจากการปรับปรุงเยื่อแผ่นให้มีโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) พบว่าเยื่อแผ่นที่ผลิตได้นี้มีอายุการใช้งานนานขึ้นเป็น 1000 ชั่วโมง

เยื่อแผ่นชุดถัดมา คือ เยื่อแผ่นซึ่งผลิตได้จากโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ของกรด  $\alpha$ - $\beta$ ,  $\beta$  trifluorostyrene sulfonic acid เยื่อแผ่นชนิดนี้มีความเสถียรทางเคมีและทางความร้อน แต่ยังมีจุดอ่อนในด้านสมบัติทางกายภาพ ต่อมาเยื่อแผ่นชนิดนี้ได้ถูกปรับปรุงโดยการผสมพอลิเมอร์ที่ผลิตจากกรดเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคเข้ากับพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

(Polyvinylidene fluoride) โดยการใช้ตัวพลาสติกไซเซเซอร์ (Plasticizer) ที่เป็นไตรเอทิลฟอสเฟต (Triethyl phosphate) เยื่อแผ่นนี้สามารถใช้ได้นาน 2000 ชั่วโมงที่ 80 องศาเซลเซียส

ประมาณปี ค. ศ. 1968 บริษัท DuPont ได้พัฒนาเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน Nafion<sup>®</sup> จากการทำปฏิกิริยาของเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene) กับ SO<sub>3</sub> เพื่อให้ได้ไซคลิกซัลโทน (Cyclic sultone) จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับเฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน-อีพ็อกไซด์ (Hexafluoropropylene epoxide) จำนวน m+1 โมเลกุล โดยที่ m > 1 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างต้นถูกนำไปให้ความร้อนร่วมกับไซเดียมคาร์บอเนต จะเกิดเป็นซัลโฟนิลฟลูออไรด์ไวนิลอีเทอร์ (Sulfonyl fluoride vinyl ether) จากนั้นนำไปทำโคพอลิเมอร์ไรซ์กับเตตระฟลูออโรเอทิลีน เพื่อให้ได้เรซินซึ่งสามารถขึ้นรูปให้เป็นแผ่นหรือท่อ ขั้นตอนสุดท้าย คือ การนำแผ่นพอลิเมอร์นี้ไปทำไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (Base hydrolysis) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น Nafion<sup>®</sup> รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการผลิต Nafion<sup>®</sup> ตามกรรมวิธีข้างต้น

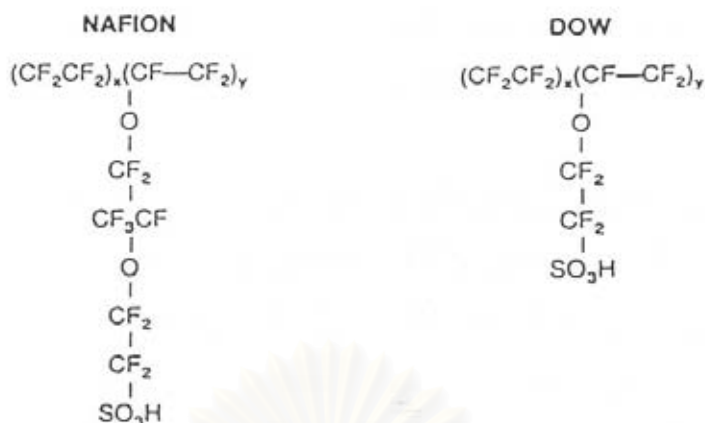


รูปที่ 2.2 การเตรียม Nafion<sup>®</sup> หรือ Perfluorosulfonic acid polymer ของบริษัท DuPont [3]

โดยทั่วไปเยื่อแผ่น Nafion<sup>®</sup> จะทนต่อการกัดเซาะเข้มข้น และตัวออกซิแดนท์ และเยื่อแผ่นนี้จะสามารถนำไอออนไฮโดรเนียม (Hydronium ions) ได้ เมื่อมีน้ำอยู่ในเยื่อแผ่นประมาณ 20% โดยน้ำหนัก เยื่อแผ่นดังกล่าวสามารถสร้างเป็นแผ่นที่มีความกว้าง 120 เซนติเมตร โดยไม่จำกัดความยาว และมีความหนาเท่ากับ 7 mils (หรือ 175 ไมครอน) ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ขายในท้องตลาด จะมีชื่อเรียกตามหมายเลข เช่น Nafion<sup>®</sup> 1170 เมื่อเลขสองหลักแรก คือ ค่าน้ำหนักเทียบเท่า (Equivalent weight)หารด้วย 100 และตัวเลขสองตัวหลัง คือ ความหนาเป็น mils ที่คูณด้วย 10 (หมายเหตุ : น้ำหนักเทียบเท่า คือ อัตราส่วนของน้ำหนักของพอลิเมอร์ต่อจำนวนโมลของกลุ่มซัลโฟนิค)

การเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลของพอลิเมอร์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ โดยการฝังตะแกรงที่ทำมาจากฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoro ethylene, PTFE) ลงในเยื่อแผ่นหรือการใช้ตัวรองรับมาหนุนด้านหลังของเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นที่มีแผ่นรองรับ (Supported Nafion<sup>®</sup> membrane) จะสามารถทนความแตกต่างของความดันได้มากกว่า 70 บรรยากาศ และสามารถทำงานที่ความดันสูงถึง 200 บรรยากาศ เยื่อแผ่น Nafion<sup>®</sup> ทั้งภาวะแห้งและเปียกจะมีความเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชันภายใต้ช่วงอุณหภูมิ 25 – 150 องศาเซลเซียส สมบัติการนำไอออนของเยื่อแผ่นที่มีน้ำหนักเทียบเท่า 1100 จนถึง 1500 จะมีค่าสูง

บริษัท Dow Chemical ได้พัฒนาเยื่อแผ่นชนิดใหม่แต่ยังคงจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ของเปอร์ฟลูออริเนต ไอโอโนเมอร์ (Perfluorinated ionomers) วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาเยื่อแผ่นแบบใหม่ คือ การผลิตเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับอุตสาหกรรมคลอโร-แอลคาไล (Chloro-alkali industry) ผลการทดสอบพบว่าเยื่อแผ่นชนิดใหม่นี้มีสมรรถนะสูงและทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตดังกล่าวสูงขึ้นกว่าเยื่อแผ่น Nafion<sup>®</sup> พอลิเมอร์ชนิดใหม่มีโครงสร้างโมเลกุลหลักเหมือนพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน Nafion<sup>®</sup> แต่สายโซ่โมเลกุลด้านข้าง (Side chain) ซึ่งมีกลุ่มกรดซัลโฟนิคอยู่จะสั้นกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของเยื่อแผ่น Nafion<sup>®</sup> ที่ผลิตโดยบริษัท DuPont กับเยื่อแผ่นฟลูออโรซัลโฟเนตไอออนเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical [3]

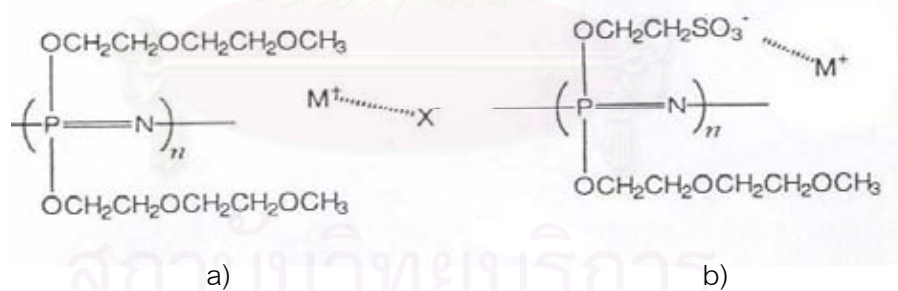
พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical จะมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนที่คล้ายคลึงกับ Nafion<sup>®</sup> แต่เยื่อแผ่นชนิดนี้จะมีค่าความรุนแรงของกรด (Acid strength) ที่สูงกว่า และมีค่าน้ำหนักเทียบเท่าต่ำกว่า (600 - 950) แม้ว่าเยื่อแผ่นของ Dow จะมีค่าน้ำหนักเทียบเท่าที่ต่ำกว่า แต่ค่าความแข็งแรงเชิงกลของเยื่อแผ่นกลับมีค่าสูง และไม่เกิดการแห้งอย่างรุนแรง ในขณะที่ถ้าเป็น Nafion<sup>®</sup> ที่มีค่าน้ำหนักเทียบเท่าที่เท่ากันแล้ว Nafion<sup>®</sup> จะเกิดเป็นพอลิเมอร์เจล (Gelled polymer) ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเชิงกลต่ำ พอลิเมอร์ของ Dow จะดูดน้ำน้อยกว่า Nafion<sup>®</sup> ถึง 50 เท่า แต่จะสามารถนำไอออนได้ดีเท่ากับ Nafion<sup>®</sup> โดยมีค่าการแพร่ซึมผ่านได้ของแก๊ส (Permeability) ต่ำ พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ที่สูงกว่า 165 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับที่ 110 องศาเซลเซียสของ Nafion<sup>®</sup> ดังนั้นเยื่อแผ่นที่ผลิตโดยบริษัท Dow จะสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า (>100 องศาเซลเซียส)

### 2.3 พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (Polymer Electrolyte) [5]

พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ได้รับความสนใจมากขึ้น ในการนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมี เช่น แบตเตอรี่ เนื่องจากพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์นั้นมีความยืดหยุ่นตามการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของขั้วอิเล็กโทรด ตามวัฏจักรของการสะสมและปล่อยประจุ แตกต่างจากอิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากแก้วหรือเซรามิก

โครงสร้างและกลไกการเคลื่อนที่ของประจุสำหรับพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์จะแตกต่างกับอิเล็กโทรไลต์อินทรีย์อย่างสิ้นเชิง โดยการเคลื่อนที่ของไอออนในพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Segmental motion) ในบริเวณที่ไอออนกำลังเคลื่อนที่ผ่าน

พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สารเชิงซ้อนของเกลือกับพอลิเมอร์ (Polymer-salt complex) และพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) โดยสารเชิงซ้อนของเกลือกับพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 a) ทั้งแคตไอออนและแอนไอออนเคลื่อนที่ในอิเล็กโทรไลต์ประเภทนี้ได้ แต่พอลิอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย หมู่ฟังก์ชันที่มีประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 b) จึงยอมให้เฉพาะไอออนที่มีประจุตรงข้ามเท่านั้นเคลื่อนที่ไปได้

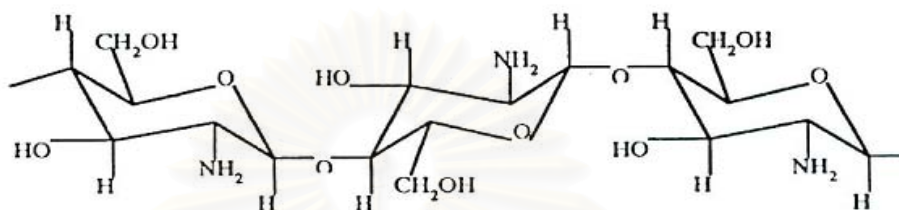


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างโครงสร้างของ a) พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่มีเกลือ MX ประกอบอยู่ b) พอลิอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีแอนไอออนสร้างพันธะติดอยู่กับพอลิเมอร์ [5]



## 2.4 ไคโตซาน (Chitosan) [6]

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน ที่มีชื่อทางเคมีว่า Poly- $\beta$ -(1,4)-2-amino-2-deoxy- D-glucose สูตรทั่วไป คือ  $(C_8H_{11}O_4N)_n$  และมีสูตรโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [6]

ไคโตซานเกิดจากการกำจัดหมู่อะเซทิลในไคตินออก (Deacetylation) โดยที่หมู่อะเซทิล (-CO-CH<sub>3</sub>) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองจะถูกตัดออกเหลือเป็นหมู่อะมีน (-NH<sub>2</sub>) ซึ่งไคโตซานสามารถมีประจุบวกบนหมู่อะมีนได้ ดังนั้นการเพิ่มของหมู่อะมีนนี้จะไปเพิ่มสมบัติการเป็น Polycationic activity บนพอลิเมอร์ การเกิดไคโตซานนั้นขึ้นอยู่กับกำจัดหมู่อะเซทิล โดยดูจากค่าร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล ไคตินมีค่าร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิลประมาณ 50 จะถูกเรียกว่าไคโตซาน แต่โดยทั่วไปแล้ว ไคโตซานจะมีค่าร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิลอยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 90 ซึ่งก็คือ ยังคงมีหมู่ N-Acetyl เหลืออยู่ในโครงสร้างประมาณ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ถ้าหมู่อะเซทิลถูกกำจัดออกไปประมาณ 90 ถึง 100 จะเรียกว่า Full deacetylation

## 2.5 กลไกการนำไอออนในตัวนำโปรตอน [5]

เนื่องจากการที่โปรตอนมีขนาดเล็ก และพลังงานในการเกิดโพลารไรซ์สูง กลไกการนำจึงแตกต่างไปจากไอออนชนิดอื่น (Poulsen: 1989, Colomban: 1992) ได้มีการสร้างกลไกหลายแบบเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ เช่น การนำมีทั้งอยู่ในรูปของแอมโมเนียม (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) และไฮโดรเนียม (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) การผ่านของโปรตอนจะมีการเกิดพันธะไฮโดรเจน และการเคลื่อนที่โดยรวมกับโมเลกุลของน้ำที่อยู่ข้างเคียง ทำให้อยู่ในรูปของไฮโดรเนียมไอออน ตัวนำโปรตอนส่วนใหญ่ที่ถูกค้นพบในช่วงแรกจะต้องอยู่ในรูปที่มีการไฮเดรตหรืออยู่ในเฟสที่ไม่มีความเสถียรทางความร้อน แต่ปัจจุบันนี้ได้มี

การค้นพบวัสดุที่สามารถนำโปรตอนได้ที่อุณหภูมิ 500 - 1000 องศาเซลเซียส ใน Perovskite-like  $\text{SrCeO}_3$

เมื่อเปรียบเทียบกับไอออนชนิดอื่นแล้ว โปรตอนมีลักษณะเฉพาะในการสร้างพันธะ ดังนั้น การเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันในวัสดุที่นำไอออนแต่ละชนิด ในวัสดุไอออนิกอะตอมของไฮโดรเจนจะสร้างออร์บิทัลของโมเลกุลกับไอออนลบซึ่งมีสถานะเป็นตัวรับทางไฟฟ้าที่เสถียรกว่าระดับพลังงาน  $H:1s$  เนื่องจากเป็นไอออนบวกที่เล็กที่สุด โปรตอนจึงมักจะสร้างพันธะร่วมกับไอออนลบที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดสองตัว อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไอออนลบ (X) หรือไอออนจากไอออนลบใกล้เคียงสองตัว จะถูกทำให้เสถียรด้วยการเคลื่อนที่จากไอออนลบ  $X:p^6$  ไปยังที่ว่างของ  $H^+:1s$  ซึ่งจะโพลาริซ์อิเล็กตรอนด้านนอกของไอออนลบที่อยู่ใกล้เคียงกับโปรตอน เพื่อลดผลของประจุบวก การเคลื่อนที่ของประจุนี้จะเพิ่มความแข็งแรง แต่ลดความยาวของพันธะ X-H ในกรณีที่ไอออนลบทั้งสองนี้ไม่เหมือนกัน โปรตอนจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่มีความเป็นขั้วที่มากกว่า

โปรตอนสามารถแพร่ผ่านระบบที่เป็นพันธะไฮโดรเจนโดย Grotthus mechanism ซึ่งจะประกอบด้วยการรวมระหว่างการจัดรูปใหม่บนไอออน (Piggyback reorientation) และการแทนที่ของโปรตอนภายในพันธะไฮโดรเจน ในการแทนที่หนึ่งครั้งโปรตอนจะถูกกั้นไม่ให้เคลื่อนย้ายต่อไป ยกเว้นว่าไดโพลของโมเลกุลมีอิสระในการหมุนภายใต้สนามไฟฟ้าไปยังตำแหน่งใหม่ของพันธะ ซึ่งทำให้เป็นการเริ่มต้นของการแทนที่ของโปรตอนตัวใหม่ การเคลื่อนย้ายพื้นฐานของโปรตอนจะประกอบด้วยสองขั้นตอนที่แตกต่างกัน คือ การแทนที่ภายในพันธะ และการหมุนของไอออนที่จะจับกับโปรตอน

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. Z. A. Yahya และคณะ (2003) [7] ได้เตรียมพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนโดยใช้ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์หลัก กรดโอเลอิกเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ และลิเทียมแอสซีเตตเป็นเกลือผสมอยู่ในพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นพอลิเมอร์นำไอออน พบว่าค่าการนำไอออนสูงสุดเท่ากับประมาณ  $10^{-5}$  ซีเมนส์/เซนติเมตร ได้จากฟิล์มที่ประกอบด้วยเกลือลิเทียมแอสซีเตตร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และกรดโอเลอิกร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ได้ศึกษาค่าการนำไอออนของพอลิเมอร์เชิงซ้อนนี้ในช่วงอุณหภูมิ 300 และ 363 เคลวิน พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\sigma T)$  กับ  $10^3/T$  ของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมขึ้นเป็นไปตามกฎของอาร์เรเนียสแสดงว่า ค่าการนำไอออนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ FTIR ยืนยันว่าได้เกิดสารเชิงซ้อนระหว่างเกลือลิเทียมกับ โคลิตซาน โดยกรดโอเลอิกทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความอดัณฐานมากขึ้น

Y. Wan และคณะ (2003) [8] ได้เตรียมเยื่อแผ่นโคลิตซานที่มีร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล และน้ำหนักโมเลกุลต่างๆกัน เพื่อศึกษาค่าการนำไอออนจำเพาะ (Intrinsic ionic conductivity) ของเยื่อแผ่นไฮเดรตโคลิตซาน พบว่าค่าการนำไอออนจำเพาะสูงถึง  $10^{-4}$  ซีเมนส์/เซนติเมตร หลังจากทำการไฮเดรชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยได้เสนอกลไกการนำไอออนของเยื่อแผ่นโคลิตซานว่า หมู่อะมิโนของโคลิตซานเมื่อรวมกับน้ำจะเปลี่ยนเป็น  $\text{NH}_3^+$  ติดอยู่กับแกนหลัก และให้  $\text{OH}^-$  มีอิสระที่จะเคลื่อนที่ในเยื่อแผ่นภายใต้สัญญาณกระแสสลับของเครื่องอิมพีแดนซ์

M. Z. A. Yahya และคณะ (2002) [9] พบว่าหมู่ของ  $\text{NH}_2$ ,  $\text{NH}_3^+$  และ  $\text{O} = \text{C} - \text{NHR}$  ของสารเชิงซ้อนโคลิตซานและเกลือลิเทียมแอสซีเทตซึ่งตรวจสอบโดยใช้ Infrared spectroscopy เลื่อนไปยังช่วงคลื่นที่ต่ำลง การเกิดพีคที่ค่าพลังงานพันธะประมาณ 55.2 eV ใน Li 1s และประมาณ 403 eV ใน N 1s แสดงว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างไนโตรเจนและลิเทียมขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดของเยื่อแผ่นเชิงซ้อนนี้เท่ากับ  $10^{-6}$  ซีเมนส์/เซนติเมตร จากการศึกษาค่า Transference number แสดงว่าเยื่อแผ่นเชิงซ้อนนี้เป็นตัวนำไอออนเคลื่อนที่ได้ในระดับ  $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

Z. Osman และคณะ (2001) [10] ได้ศึกษากลไกของการนำไอออนในแผ่นฟิล์มของโคลิตซานแอสซีเทต พลาสติกไซค์โคลิตซานแอสซีเทต โคลิตซานแอสซีเทตที่เติมเกลือ และสารเชิงซ้อนพลาสติกไซค์โคลิตซานแอสซีเทตกับเกลือ แผ่นฟิล์มที่เตรียมเหล่านี้มีลักษณะโครงสร้างแบบอดัณฐาน ค่าการนำเนื่องมาจากไอออนของเกลือเคลื่อนที่ บทบาทของพลาสติกไซเซอร์ คือ ทำให้เกลือเกิดการแตกตัว ทำให้จำนวนของไอออนที่เคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไอออนเพิ่มขึ้น

N. M. Morni และคณะ (1999) [11] พบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมขึ้นจากโคลิตซานชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ  $2.14 \times 10^{-7}$  ซีเมนส์/เซนติเมตร และจะเพิ่มขึ้นเป็น  $1.03 \times 10^{-5}$  ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อเติมเอทิลีนคาร์บอนเนต (EC) เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ จากการตรวจวัดด้วย X-ray diffraction (XRD) แสดงให้เห็นว่า EC ทำให้ผลึกของโคลิตซานแอสซีเทตแตกออก และจากการตรวจวัดด้วย Infrared spectroscopy (IR) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมลิเทียมไทรเฟต ( $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ ) ทำให้แถบของกลุ่มเอไมด์เลื่อนจาก 1590 ไปเป็น  $1575 \text{ cm}^{-1}$  แผ่นฟิล์มซึ่งประกอบด้วยโคลิตซานและ EC 0.4 กรัม กับ  $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$  ในอัตราส่วน 80 : 20 ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด เท่ากับ  $3.0 \times 10^{-4}$  ซีเมนส์/เซนติเมตร

N. M. Morni และคณะ (1997) [12] ศึกษาค่าการนำไอออนของแผ่นฟิล์มบางที่เตรียมจากสารเชิงซ้อนของโคโตซานแอสีเทตกับซิลเวอร์ไนเตรต โดยใช้ Impedance Spectroscopy กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไอออนและปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรต แสดงว่าค่าการนำไอออนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรตเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรตเท่ากับ 0.25 กรัม กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \sigma T$  กับ  $10^3/T$  ในช่วงอุณหภูมิ 278 – 313 เคลวินของแผ่นฟิล์มสูตรต่างๆเป็นไปตามกฎของอาร์เรเนียส จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้นกับปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรตอธิบายได้ว่า ค่าการนำไอออนเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นลดลง จากรูปร่างของ Cole-Cole plot แสดงว่ากลไกการเคลื่อนที่ของซิลเวอร์ไอออนเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ ได้ใช้แผ่นฟิล์มที่มีค่าการนำไอออนสูงสุดเท่ากับ  $2.6 \times 10^{-5}$  ซีเมนส์/เซนติเมตร ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี  $Ag/AgNO_3 - chitosan/I_2$  วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของวงจรเปิดได้เท่ากับ 0.672 โวลต์ แสดงว่าวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำซิลเวอร์ไอออน จากวิธี Electromotive force ได้ค่า Ionic transference number เท่ากับ 0.98 แสดงว่าเยื่อแผ่นเชิงซ้อนนี้นำอิเล็กตรอนได้ดี เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

R. H. Y. Subban และคณะ (1996) [13] พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของโคโตซานทำให้เพิ่มขึ้นโดยการละลายในกรดแอสีติก และเติมเกลือเวเลนซ์หนึ่ง (Monovalent salt) เช่น โซเดียมเปอร์คลอเรต โดยพบว่าค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโซเดียมเปอร์คลอเรตจนถึงปริมาณของโซเดียมเปอร์คลอเรต 3 กรัม ต่อโคโตซาน 1 กรัม ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $4.6 \times 10^{-2}$  มิลลิซีเมนส์/เซนติเมตร สามารถนำไปใช้เป็นแบตเตอรี่พอลิเมอร์

N. S. Mohammed และคณะ (1995) [14] พบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้จากการเติมลิเทียมไนเตรต 0.8 กรัม ในสารละลายโคโตซานในกรดแอสีติกเข้มข้นร้อยละ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จะมีค่าการนำไอออนในระดับ  $10^{-4}$  ซีเมนส์/เซนติเมตร แผ่นฟิล์มมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน การนำไอออนเกิดขึ้นที่ช่องว่างจุลภาค (Microvoid) ในโครงสร้างของพอลิเมอร์

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้

##### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโคโคซาน

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
2. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)

##### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเยื่อแผ่น

1. ลิเทียมไนเตรต ( $\text{LiNO}_3$ ) ความบริสุทธิ์ร้อยละ  $>99$  โดยน้ำหนัก (AR grade): Fluka
2. ลิเทียมแอซีเตต ( $\text{LiOAc}$ ) ความบริสุทธิ์ร้อยละ  $>99$  โดยน้ำหนัก (AR grade): Sigma
3. เอทิลีนคาร์บอนเนต (EC) ความบริสุทธิ์ร้อยละ  $>99$  โดยน้ำหนัก (AR grade): Fluka
4. กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
5. กรดแอซีติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก (AR grade): BDH, Germany
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)

##### 3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการวัดค่าการซึมผ่านแก๊ส

แก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99: PRAXAIR

## 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมโคโคซาน

1. ชุดเครื่องกวนชนิดปรับความเร็วรอบ และใบกวนเทพลอน: IKLABOR TECHNIK รุ่น RW 20n
2. เครื่องให้ความร้อน (Heating mantle): FALC รุ่น MF1000
3. เตาอบ (Hot air oven): BINDER รุ่น ED 115
4. เครื่องสูบลูญากาศ (Vacuum pump): Welch รุ่น 889
5. เครื่องชั่ง (Analytical balance): METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S

### 3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเยื่อแผ่น

1. ชุดเครื่องกวนชนิดปรับความเร็วรอบ และใบกวนเทพลอน: IKLABOR TECHNIK รุ่น RW 20n
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance): METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S
3. เตาอบ (Hot air oven): BINDER รุ่น ED 115
4. แผ่นกระจก

### 3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของเยื่อแผ่น

1. ไมโครมิเตอร์
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance): METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002-S
3. โถดูดความชื้น (Desiccator): SANPLATEC รุ่น C-3W No. 0031
4. ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส
5. ชุดทดสอบค่าการนำโปรตอน

## 3.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

### 3.3.1 เครื่องวิเคราะห์ที่มีในภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. เครื่อง Universal testing: LLOYD Instruments LR 5K

2. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter: METTLER รุ่น DSC 822
3. เครื่อง Potentiostat Galvanostat: AUTOLAB PGSTATO
4. เครื่อง Multimeter: Ritchmass รุ่น RM 12

### 3.3.2 เครื่องวิเคราะห์ที่ขอความอนุเคราะห์

1. เครื่อง Gel Permeation Chromatography: PL 110 จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
2. เครื่อง Scanning Electron Microscopy: Jeol JSM 6400 จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy: Perkin Elmer รุ่น 1760x จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.4.1 การเตรียมโคโตซาน

โคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยนี้เตรียมจากเปลือกกุ้ง ตามวิธีการเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้า [15] ดังนี้

#### 1. การเตรียมวัตถุดิบ

ล้างเปลือกกุ้งให้สะอาดด้วยน้ำประปา ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ แล้วอบในตู้อบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นบดเปลือกกุ้งอบแห้งด้วยเครื่องปั่นแล้วใช้ตะแกรงร่อนเพื่อแยกเปลือกกุ้งที่เล็กจนเป็นผงออกไป เก็บเปลือกกุ้งบดในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิห้อง

#### 2. การกำจัดโปรตีน (Deproteinization)

แช่เปลือกกุ้งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนเปลือกกุ้งต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วนำมาล้างให้มีสภาพเป็นกลาง จากนั้นนำไปอบในตู้อบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

### 3. การกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization)

นำเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดโปรตีนแล้วแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.25 นอร์มอล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วนเปลือกกุ้งต่อสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 1:10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วนำมาล้างให้มีสภาพเป็นกลาง จากนั้นนำไปอบในตู้อบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ไคติน

### 4. การกำจัดหมู่อะเซทิล (Deacetylation)

แช่ไคตินในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในสภาวะสูญญากาศ โดยใช้อัตราส่วนไคตินต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วนำมาล้างให้มีสภาพเป็นกลาง จากนั้นนำไปอบในตู้อบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ไคโตซาน

### 5. การวิเคราะห์สมบัติของเกล็ดไคโตซาน

ไคโตซานที่เตรียมได้นำมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์สมบัติของเกล็ดไคโตซาน

พารามิเตอร์	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
ร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล	Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR)
ความหนืด	Brookfield Viscometer
น้ำหนักโมเลกุล	Gel Permeation Chromatography (GPC)

### 3.4.2 การหาค่าร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล [16]

แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ก) การเตรียมอนุพันธ์ไคโตซานคลอไรด์



1. ละลายโคโตซาน 2.5 กรัม ในสารละลายกรดแอสติกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 200 - 400 มิลลิลิตร (ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารละลาย) กวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบสูง เป็นเวลา 15 นาที
2. กรองส่วนที่ไม่ละลายออกด้วยผ้าพอลิเอสเตอร์
3. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นช้าๆ ประมาณ 18 มิลลิลิตร โดยขณะเติมต้องกวนด้วยความเร็วรอบสูง กวนต่อไปจนโคโตซานคลอไรด์ตกตะกอนหมด
4. กรองตะกอนด้วยผ้าพอลิเอสเตอร์ ล้างตะกอนด้วยเมทานอล จนไม่มีคลอไรด์อิสระเหลืออยู่ โดยทดสอบได้ด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งการล้างด้วยเมทานอลจะต้องทำประมาณ 5 - 6 ครั้ง
5. อบตะกอนของอนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์ในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาข้ามคืน อนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์ที่ได้จะมีสีน้ำตาลอ่อน

ข) การไทเทรตอนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์

1. ละลายอนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์ 1 กรัม ในน้ำกลั่น เจือจางจนมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร
2. ดูดสารละลายอนุพันธ์โคโตซานคลอไรด์เจือจางในข้อ 1 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.110 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์
3. บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิลของโคโตซาน ตามสมการที่ (3.1)

$$\text{degree of deacetylation} = \frac{(\text{amount of monomer having } -\text{NH}_2 \text{ group}) \times 100}{\text{total amount of monomer}} \quad (3.1)$$

### 3.4.3 ชนิดของเยื่อแผ่นที่เตรียมในงานวิจัย

เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ ตามตารางที่ 3.2 ประกอบด้วย

1. เยื่อแผ่นโคโตซานที่ไม่เชื่อมขวาง เรียกว่า uncrosslinked membrane
2. เยื่อแผ่นโคโตซานที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก เรียกว่า crosslinked membrane

3. เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่ไม่เชื่อมขวาง และเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก
- เยื่อแผ่นไคโตซานที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตร้อยละ 5, 10, 20, 40, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน เรียกว่า LiNO<sub>3</sub> salt complex membrane
  - เยื่อแผ่นไคโตซานที่เติมเกลือลิเทียมแอสีเตตร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน เรียกว่า LiOAc salt complex membrane
  - เยื่อแผ่นไคโตซานที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตร้อยละ 10, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน และเติมเอทิลีนคาร์บอนเนตร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน เรียกว่า Plasticized LiNO<sub>3</sub> salt complex membrane
  - เยื่อแผ่นไคโตซานที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตร้อยละ 5, 10, 20, 40, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน และเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก เรียกว่า Crosslinked LiNO<sub>3</sub> salt complex membrane
  - เยื่อแผ่นไคโตซานที่เติมเกลือลิเทียมแอสีเตตร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน และเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก เรียกว่า Crosslinked LiOAc salt complex membrane
  - เยื่อแผ่นไคโตซานที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตร้อยละ 10, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน เติมเอทิลีนคาร์บอนเนตร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน และเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก เรียกว่า Crosslinked plasticized LiNO<sub>3</sub> salt complex membrane
4. เยื่อแผ่นที่โดปด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เรียกว่า Doped membrane ของ
- เยื่อแผ่นไคโตซานที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนัก

- เยื่อแผ่นไคโตซานที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน และเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก
- เยื่อแผ่นไคโตซานที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน เติมเอทิลีนคาร์บอนเนตร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน และเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.2 ชนิดของเยื่อแผ่น

Type	LiNO <sub>3</sub> (%w/w of CS)							LiOAc (%w/w of CS)			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%w)			EC 40 %w
	0	5	10	20	40	50	100	0	50	100	2	4	6	
Uncrosslinked	+							+						
Crosslinked	+							+			+			
	+							+				+		
	+							+					+	
Salt complex		+	+	+	+	+	+		+	+				
Crosslinked salt complex		+	+	+	+	+	+		+	+	+			
		+	+	+	+	+	+		+	+		+		
		+	+	+	+	+	+						+	
Plasticized salt complex			+			+	+							+
Crosslinked Plasticized salt complex			+			+	+				+			+
			+			+	+					+		+
			+			+	+						+	+

### 3.4.4 วิธีเตรียมเยื่อแผ่น

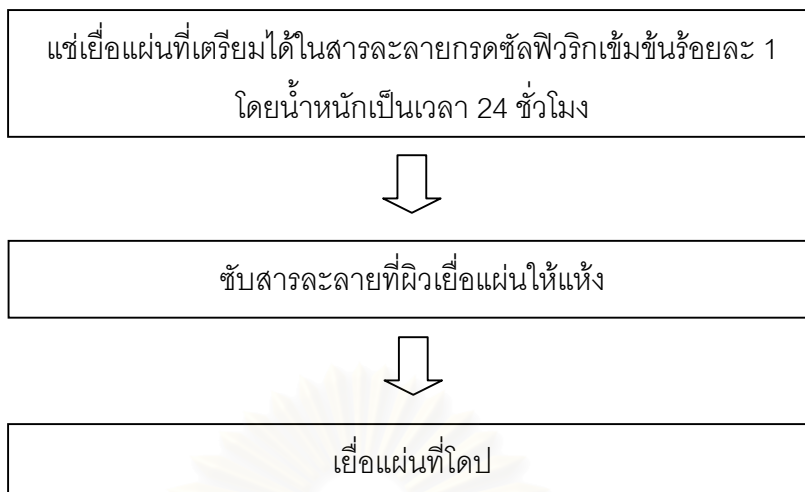
1. เตรียมสารละลายที่ใช้เตรียมเยื่อแผ่นประกอบด้วย
  - โคโตซานร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดแอสติติกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
  - โคโตซานร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ลิเทียมไนเตรต หรือลิเทียมแอสซิเตต และ/หรือเอทิลีนคาร์บอนเตต ในปริมาณตามตารางที่ 3.2 ในสารละลายกรดแอสติติกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
2. กวนสารละลายด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. กรองส่วนที่ไม่ละลายออกด้วยผ้าพอลิเอสเตอร์ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ฟองอากาศ
4. นำสารละลายพอลิเมอร์มาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบนแผ่นกระจก แล้วอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. แच्छื่อแผ่นในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง แล้วอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เยื่อแผ่นที่ไม่เชื่อมขวาง
6. แच्छื่อแผ่นในสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เยื่อแผ่นที่เชื่อมขวาง ตามรูปที่ 3.1

### 3.4.5 วิธีการโคปเยื่อแผ่น

1. แच्छื่อแผ่นที่เตรียมได้ในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ซับสารละลายที่ผิวเยื่อแผ่นให้แห้ง ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการเตรียมเยื่อแผ่น



รูปที่ 3.2 แผนภาพวิธีการได้อบเยื่อแผ่น

#### 3.4.6 ความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

1. ตัดเยื่อแผ่นให้มีลักษณะตามรูปที่ 3.3 a)
2. วัดความหนาของเยื่อแผ่นด้วยไมโครมิเตอร์
3. ทดสอบตาม ASTM D638 ด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามรูปที่ 3.3 b)



a)



b)

รูปที่ 3.3 เครื่อง Universal testing LLOYD Instruments LR 5K

### 3.4.7 ร้อยละการบวมตัว (Swelling)

1. ชั่งน้ำหนักของเยื่อแผ่นแห้ง
2. แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำเยื่อแผ่นมาซับน้ำที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นออกให้แห้งด้วยกระดาษซับแล้วชั่งน้ำหนักอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในเยื่อแผ่น
4. นำค่าน้ำหนักของเยื่อแผ่นแห้งและหลังการดูดซับน้ำ มาคำนวณค่าร้อยละการบวมตัวตามสมการที่ (3.2)

$$\% \text{Swelling} = \frac{(\text{Weight}_{\text{wet}} - \text{Weight}_{\text{dry}}) \times 100}{\text{Weight}_{\text{dry}}} \quad (3.2)$$

### 3.4.8 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange capacity)

1. ชั่งเยื่อแผ่นแห้งให้มีน้ำหนักประมาณ 20 มิลลิกรัม
2. แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.005 นอร์มอล ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ดูดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในข้อ 2 มาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.005 นอร์มอล โดยจุดยุติจะมีความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 7
4. คำนวณค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ตามสมการที่ (3.3)

$$\text{Ion exchange capacity} = \frac{\left( N_1 V_1 - \left( \frac{V_1}{V_3} \right) N_2 V_2 \right)}{m} \quad (3.3)$$

$N_1$  = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)

$N_2$  = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล)

$V_1$  = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)

$V_2$  = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

$V_3$  = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไทเทรต (มิลลิลิตร)

$m$  = น้ำหนักของเยื่อแผ่น (กรัม)

### 3.4.9 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature)

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสามารถหาโดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ณ ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4.10 การทดสอบสัณฐานวิทยา

ทำการตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้านหน้า และภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ดำเนินการโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4.11 การทดสอบโครงสร้างทางเคมี

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเยื่อแผ่นสามารถหาได้ โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy ดำเนินการโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4.12 การทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าการซึมผ่านแก๊สของเยื่อแผ่น โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ การวัดโดยใช้ความดันคงที่ และการวัดโดยปริมาตรคงที่ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือในการวัดเป็นแบบความดันคงที่ โดยผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปทางด้านบนของเยื่อแผ่น ควบคุมความดันขาเข้าของแก๊สให้คงที่ ส่วนด้านขาออกเปิดสู่บรรยากาศ และทำการวัดอัตราการไหลของแก๊สขาออก เพื่อนำไปหาค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

เครื่องมือมีลักษณะเป็นหน้าแปลน 2 ชั้น ประกอบกัน ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม หน้าแปลนด้านบนเป็นช่องว่างทรงกระบอก ด้านล่างมีฐานรองรับเยื่อแผ่นที่มีรูเล็กๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก คือ 3.7 เซนติเมตร พื้นที่บริเวณทดสอบแก๊สมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.1 เซนติเมตร มีแหวนแบนและแหวนกลม ทำจากยางอยู่ระหว่างหน้าแปลนทั้งสองสำหรับกันรั่ว ด้านขาเข้ามีเครื่องวัดความดัน วาล์ว 3 ทางเพื่อเปิดเข้าสู่อุปกรณ์ทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊สหรือเปิดเข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สเพื่อทำ autozero ส่วนหน้าแปลนชั้นล่างต่อกับเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส ตามรูปที่ 3.4





รูปที่ 3.4 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส

การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน ในงานวิจัยนี้ดำเนินการที่ความดันขาเข้า 20 psi และอุณหภูมิห้อง มีขั้นตอน ดังนี้

1. ตัดเยื่อแผ่นเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.1 เซนติเมตร และวัดความหนาของเยื่อแผ่น
2. ประกอบเยื่อแผ่นเข้ากับเครื่องทดสอบ โดยวางบนเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรูพูน
3. วางแหวนแบนที่ทำจากยางบนเยื่อแผ่นและแหวนยางกลมระหว่างหน้าแปลนทั้งสองเพื่อกันรั่ว
4. ไส้ล็กเกลียว (Screw bolt) กับแป้นเกลียว (Nut) เข้าด้วยกันให้แน่นด้วยประแจเหล็ก
5. เปิดแก๊สไฮโดรเจนอัตราการไหลประมาณ 12 Sccm. ผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สเพื่อทำ Auto – zero
6. หมุนวาล์วสามทางเพื่อเปิดแก๊สไฮโดรเจนอัตราการไหลประมาณ 12 Sccm. เข้าสู่ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊สด้วยความดันและอุณหภูมิคงที่
7. วัดอัตราการไหลของแก๊สขาออก แล้วนำไปหาค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน ตามสมการที่ (3.4)

$$P = \frac{QL}{\Delta PA} \quad (3.4)$$

- $P$  = สภาพให้แก๊สซึมผ่าน ( $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$ )  
 $Q$  = อัตราการไหลผ่านเยื่อแผ่น (Sccs)  
 $L$  = ความหนาของเยื่อแผ่น (cm)  
 $\Delta P$  = ความดันต่าง (cmHg)  
 $A$  = พื้นที่ของเยื่อแผ่น ( $\text{cm}^2$ )

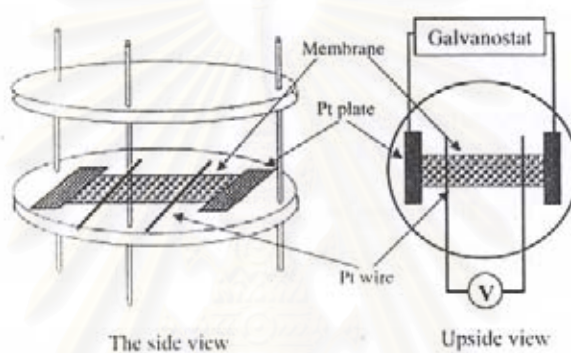
### 3.4.13 การวัดค่าการนำโปรตอน

การวัดค่าการนำโปรตอนโดยวิธี Four probe method มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดเยื่อแผ่นให้มีขนาด 1x4 เซนติเมตร
2. วางเยื่อแผ่นบนเซลล์วัดค่าการนำโปรตอน โดยวางเยื่อแผ่นตามขวางให้อยู่บนลวดแพลตินัมทั้งสอง ตามรูปที่ 3.5
3. วางแผ่นแพลตินัมที่มีขนาด 1x2.5 เซนติเมตร บนปลายทั้งสองข้างของเยื่อแผ่น
4. ประกอบเซลล์วัดค่าการนำโปรตอนเข้าด้วยกัน ชันสกรูทั้ง 4 จุดให้สัมผัสกับแผ่นแพลตินัม ต่อสายไฟที่ขั้วทั้งสอง
5. บรรจุเซลล์เข้าสู่ชุดวัดค่าการนำโปรตอน ปิดฝาของชุดเครื่องมือ และต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดความชื้น
6. ป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่ผ่านระบบควบคุมความชื้นแล้ว เข้าสู่ชุดวัดค่าการนำโปรตอน โดยตั้งอุณหภูมิของระบบควบคุมความชื้น ให้สูงกว่าอุณหภูมิของชุดการวัดโปรตอน 10 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำในทางเดินของแก๊สไฮโดรเจน
7. ต่อชุดวัดค่าการนำโปรตอนเข้ากับเครื่อง Potentiostat Galvanostat
8. รอจนความชื้นในชุดวัดค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น ถึงร้อยละ 100 จึงเริ่มทำการทดลอง
9. บันทึกค่าความต่างศักย์ และกระแส นำข้อมูลมาหาค่าความต้านทานของเยื่อแผ่น เพื่อนำมาหาค่าการนำโปรตอน ตามสมการ (3.5)

$$\sigma = \frac{1}{R} \left( \frac{L}{A} \right) \quad (3.5)$$

- $\sigma$  = ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)  
 $R$  = ความต้านทาน (โอห์ม)  
 $L$  = ระยะห่างระหว่างลวดแพลตินัม (เซนติเมตร)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของเยื่อแผ่น (ตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 3.5 การวัดค่าการนำโปรตอนด้วยวิธี Four probe method

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย

#### 4.1 สมบัติของโคโตซาน

ร้อยละผลได้และสมบัติอื่นๆของโคโตซานที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ ได้แก่ ความหนืด (Viscosity) น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) และค่าร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล (%Deacetylation) แสดงในตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบกับโคโตซานเชิงพาณิชย์ จัดเป็นน้ำหนักโมเลกุลสูง

ตารางที่ 4.1 สมบัติของโคโตซาน

สมบัติ	หน่วย	โคโตซานที่เตรียมได้	โคโตซานเชิงพาณิชย์*	
			ชนิด MW สูง	ชนิด MW ต่ำ
ร้อยละผลได้เฉลี่ย เทียบกับเปลือกกุ้ง เทียบกับโคติน	%	22.2 ± 3.2 73.2 ± 5.8	-	-
น้ำหนักโมเลกุล	ดัลตัน	$1.6 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$7 \times 10^4$
ความหนืด	เซนติพอยส์	3,984	1,061	202
ร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล - ทางเคมี - จาก NMR	%	92.3 ± 3.3 94.0	90	70

\* บริษัท Fluka

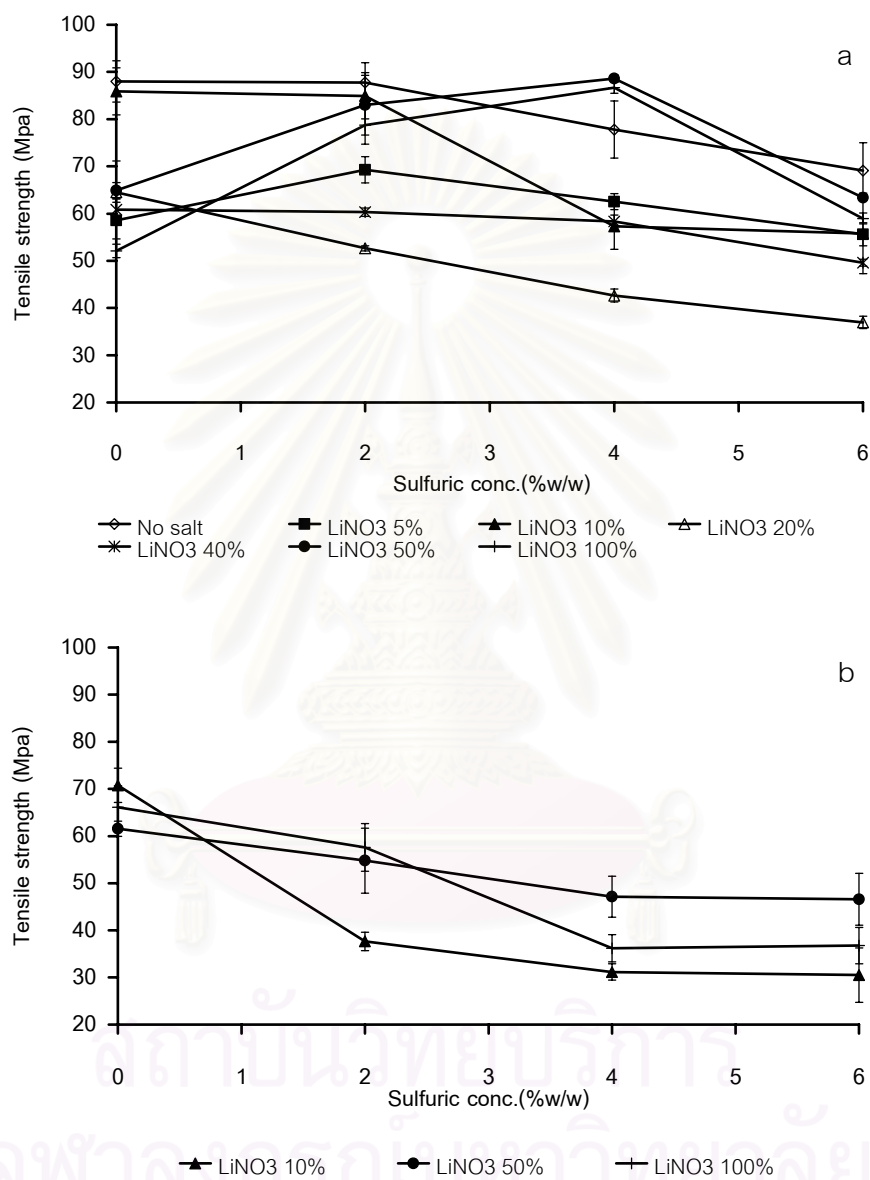
## 4.2 ความสามารถทนต่อแรงดึง

จากรูปที่ 4.1 a) เยื่อแผ่นไคโตซานที่ไม่มีการเชื่อมขวาง หรือที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับร้อยละ 0 เมื่อมีการเติมเกลือลิเทียมไนเตรตทำให้ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงน้อยลง ส่วนในเยื่อแผ่นที่มีการเชื่อมขวางการเติมเกลือลิเทียมไนเตรต ทำให้ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงน้อยลงเช่นกัน เนื่องจากการเติมเกลือทำให้เยื่อแผ่นมีความเป็นอสัณฐานเพิ่มขึ้น [5, 11] ผลของการเชื่อมขวางในเยื่อแผ่นไคโตซาน ทำให้ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงน้อยลงตามความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมขวางทำให้เกิดความเครียด (Stress) ขึ้นในเยื่อแผ่น การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกทำให้ความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายมากขึ้น และการที่โมเลกุลอยู่ชิดกันมากเกินไป ทำให้เยื่อแผ่นมีความแข็งแต่เปราะ เยื่อแผ่นที่ต้องการนั้นควรมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงสูง ดังนั้นเยื่อแผ่นที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาต่อไป คือ เยื่อแผ่นที่มีการเติมเกลือลิเทียมไนเตรตร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เนื่องจากหลังการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 2 และ 4 จะทำให้ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น และเยื่อแผ่นที่มีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงมากที่สุด คือ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 88.6 เมกกะปาสคาล ขณะที่เยื่อแผ่น 2%crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan และ 2%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 87.7, 77.8 และ 83.0 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ

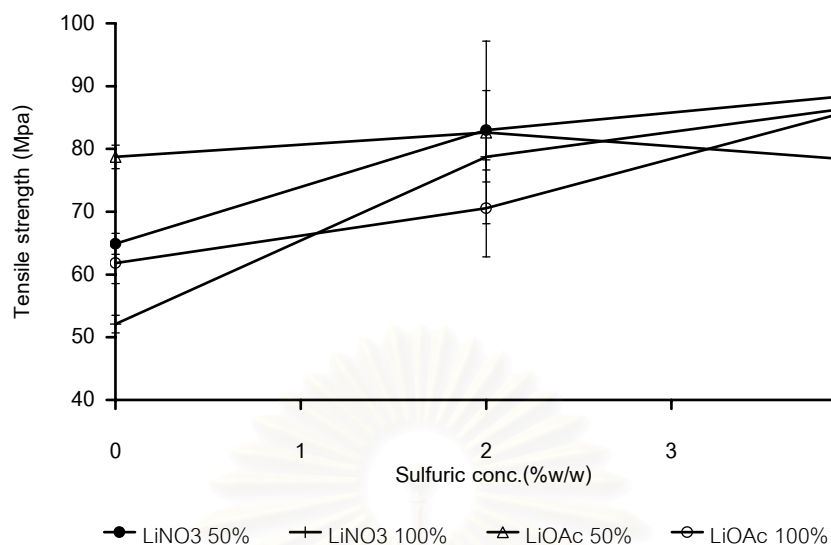
จากรูปที่ 4.1b) การเติมเอทิลีนคาร์บอนเนตทำให้เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่มีการเชื่อมขวางมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงน้อยลง เนื่องจากเอทิลีนคาร์บอนเนตซึ่งเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ จะทำให้เยื่อแผ่นมีความอ่อนตัวมากขึ้น [17] ดังนั้นผลจากการเติมเอทิลีนคาร์บอนเนตจะทำให้ความแข็งแรงของเยื่อแผ่นน้อยลง โดยทำให้เยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 2%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าลดลงเป็น 47.1 และ 54.8 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบผลของเกลือลิเทียมสองชนิดพบว่า ต้องใช้เกลือลิเทียมแอสซีเทตสูงถึงร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก จึงให้กราฟลักษณะเดียวกันกับการใช้เกลือลิเทียมไนเตรต ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยเยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 100%LiOAc มีค่าเท่ากับ 86.3 เมกกะปาสคาล

เมื่อเทียบกับ Nafion<sup>®</sup> 115 ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงเท่ากับ 43 เมกกะปาสคาล [18] แสดงว่าเยื่อแผ่นส่วนใหญ่มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีกว่า Nafion<sup>®</sup> 115



รูปที่ 4.1 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต  
 a) เยื่อแผ่นที่ไม่เติมสารพลาสติกไซเซอร์ b) เยื่อแผ่นที่เติมสารพลาสติกไซเซอร์



รูปที่ 4.2 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตและลิเทียมแอสีเทต

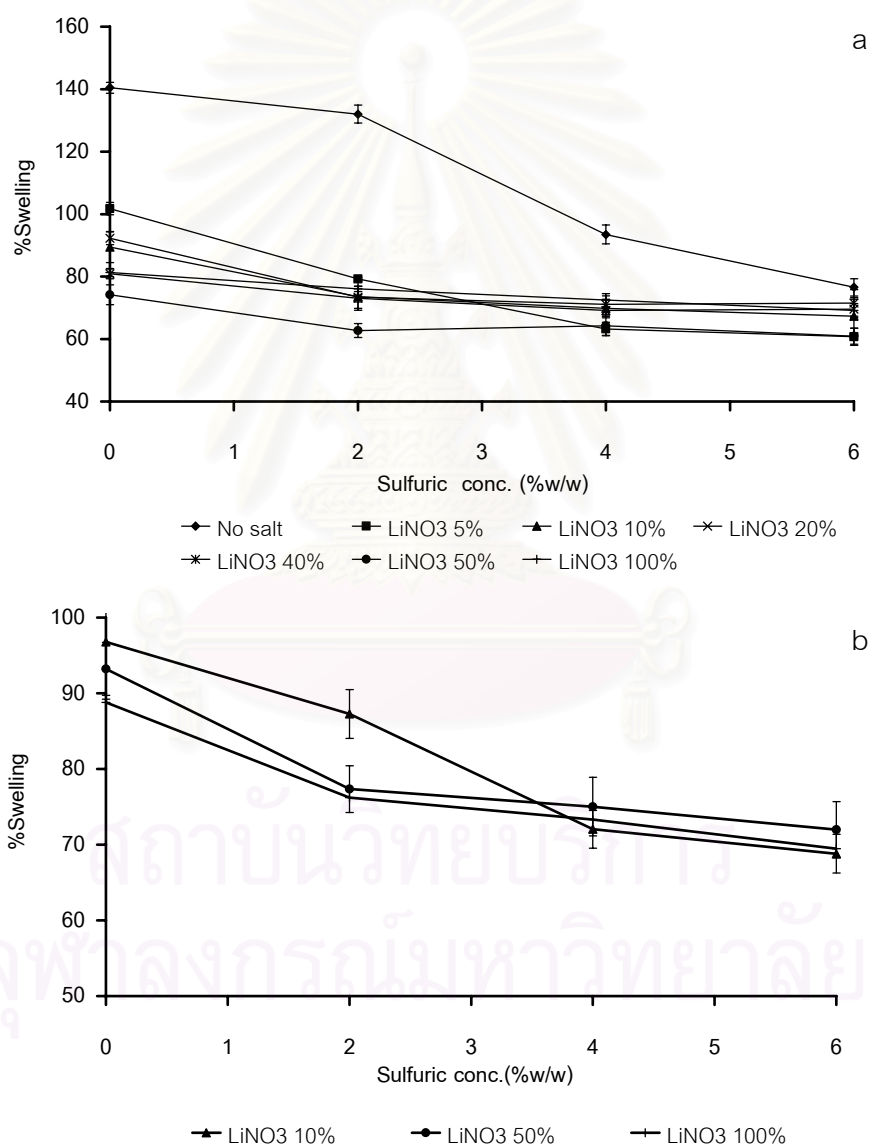
#### 4.3 ร้อยละการบวมตัว

จากรูปที่ 4.3a) เยื่อแผ่นไคโตซานที่ไม่มีการเชื่อมขวางหรือที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับร้อยละ 0 เมื่อมีการเติมเกลือลิเทียมไนเตรตทำให้ค่าการบวมตัวน้อยลง ในเยื่อแผ่นที่มีการเชื่อมขวาง การเติมเกลือลิเทียมไนเตรตทำให้ค่าการบวมตัวน้อยลงเช่นกัน ผลของการเชื่อมขวางในเยื่อแผ่นไคโตซาน จะทำให้ค่าการบวมตัวน้อยลงตามความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก การเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายมากขึ้น การขยายตัวจึงเกิดขึ้นได้ยาก ผลของการเชื่อมขวางในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตทำให้ค่าการบวมตัวน้อยลง แต่การเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกแทบไม่มีผลต่อค่าการบวมตัว เยื่อแผ่นที่ต้องการนั้นควรมีค่าการบวมตัวน้อย ดังนั้นเยื่อแผ่นที่น่าสนใจ คือ เยื่อแผ่นที่มีการเติมเกลือลิเทียมไนเตรตร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยเยื่อแผ่นที่มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด คือ 6%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับร้อยละ 60.9 ขณะที่เยื่อแผ่น 6%crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับร้อยละ 76.5, 93.5 และ 64.2 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.3b) การเติมเอทิลีนคาร์บอนเนตจะทำให้เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตมีค่าการบวมตัวมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น [17] โดยทำให้เยื่อแผ่น 6%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 72.0 และ 75.0 ตามลำดับ

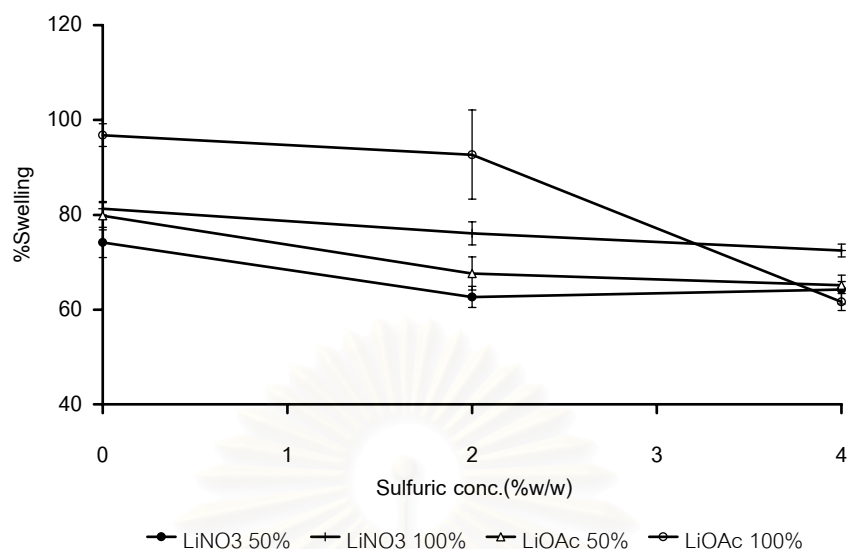
จากรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบผลของเกลือลิเทียมสองชนิดพบว่า เยื่อแผ่นที่มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด คือ 4%crosslinked chitosan + 100%LiOAc เท่ากับร้อยละ 61.6 ส่วนในเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตที่มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด คือ 2%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> เท่ากับร้อยละ 62.7

ค่าการบวมตัวของ Nafion<sup>®</sup> 115 เมื่อแช่ในน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เท่ากับร้อยละ 35 [18] แสดงว่าเยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นยังมีค่าการบวมตัวที่มากเกินไป



รูปที่ 4.3 ค่าร้อยละการบวมตัวของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต  
a) เยื่อแผ่นที่ไม่เติมสารพลาสติไซเซอร์ b) เยื่อแผ่นที่เติมสารพลาสติไซเซอร์



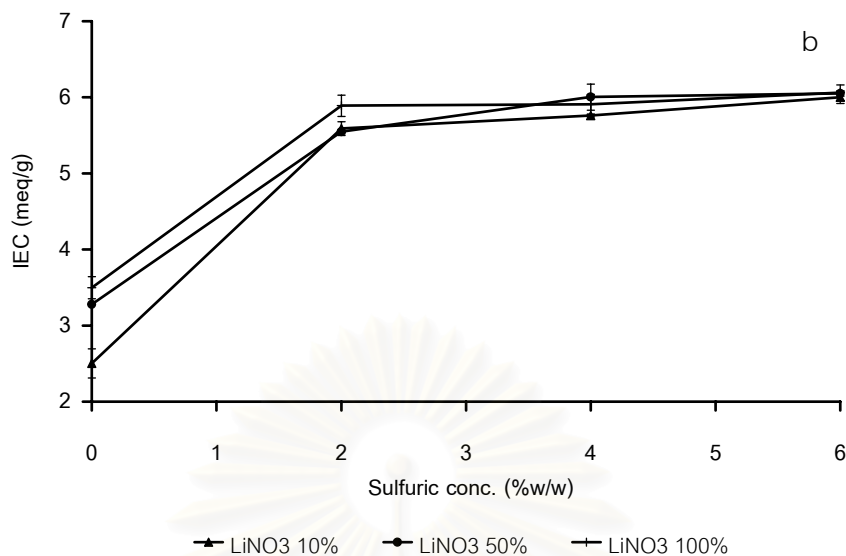


รูปที่ 4.4 ค่าร้อยละการบวมตัวของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตและลิเทียมแอสีเทต

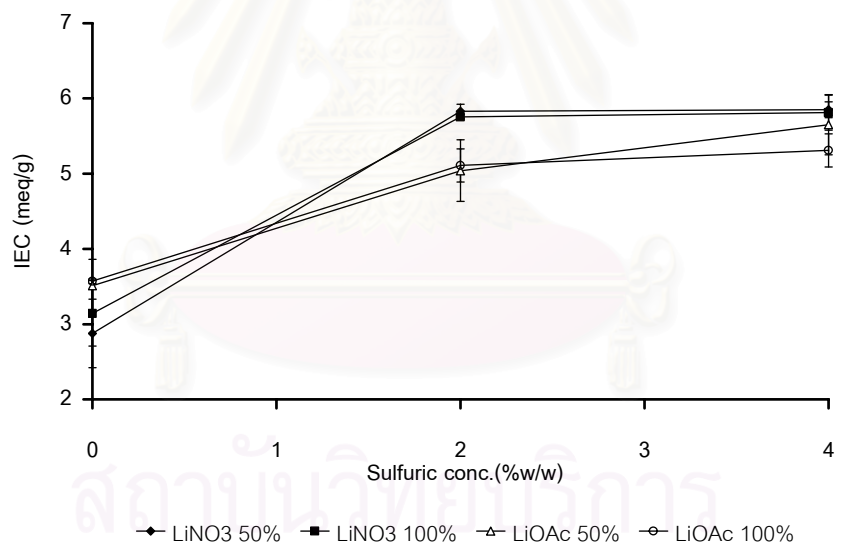
#### 4.4 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

จากรูปที่ 4.5a) เยื่อแผ่นไคโตซานที่ไม่มีการเชื่อมขวางหรือที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับร้อยละ 0 เมื่อมีการเติมเกลือลิเทียมไนเตรต ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่เติม ในเยื่อแผ่นที่มีการเชื่อมขวางการเติมเกลือลิเทียมไนเตรตทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่เติมเช่นกัน ผลของการเชื่อมขวางในเยื่อแผ่นไคโตซานและไคโตซานคอมโพสิต ทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมากขึ้นตามความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก เนื่องจากการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกทำให้หมู่อะมิโนเกิดปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก เป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วทางไฟฟ้านอกจากหมู่อะมิโนและไฮดรอกซิล ซึ่งหมู่ซัลเฟตนี้มีความเป็นขั้วไฟฟ้าที่แรงมาก [19] การแลกเปลี่ยนไอออนจึงเกิดขึ้นได้ดี การเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกทำให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นไม่มาก เยื่อแผ่นที่ต้องการควรมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมาก เนื่องจากสมบัตินี้จะบอกถึงปริมาณหมู่ที่มีความเป็นขั้วในเยื่อแผ่น การที่มีหมู่ซึ่งมีความเป็นขั้วในปริมาณมากทำให้โปรตอนมีตำแหน่งในการเข้าทำปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่มากขึ้น ดังนั้นเยื่อแผ่นที่น่าสนใจ คือ เยื่อแผ่นที่มีการเติมเกลือร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนัก โดยเยื่อแผ่นที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมากที่สุด คือ 6%crosslinked chitosan + 100%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 6.11 มิลลิโมลสมมูลย์/กรัม ขณะที่เยื่อแผ่น 2%crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan, 6%crosslinked chitosan, 2%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ





รูปที่ 4.5 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต  
 a) เยื่อแผ่นที่ไม่เติมสารพลาสติไซเซอร์ b) เยื่อแผ่นที่เติมสารพลาสติไซเซอร์

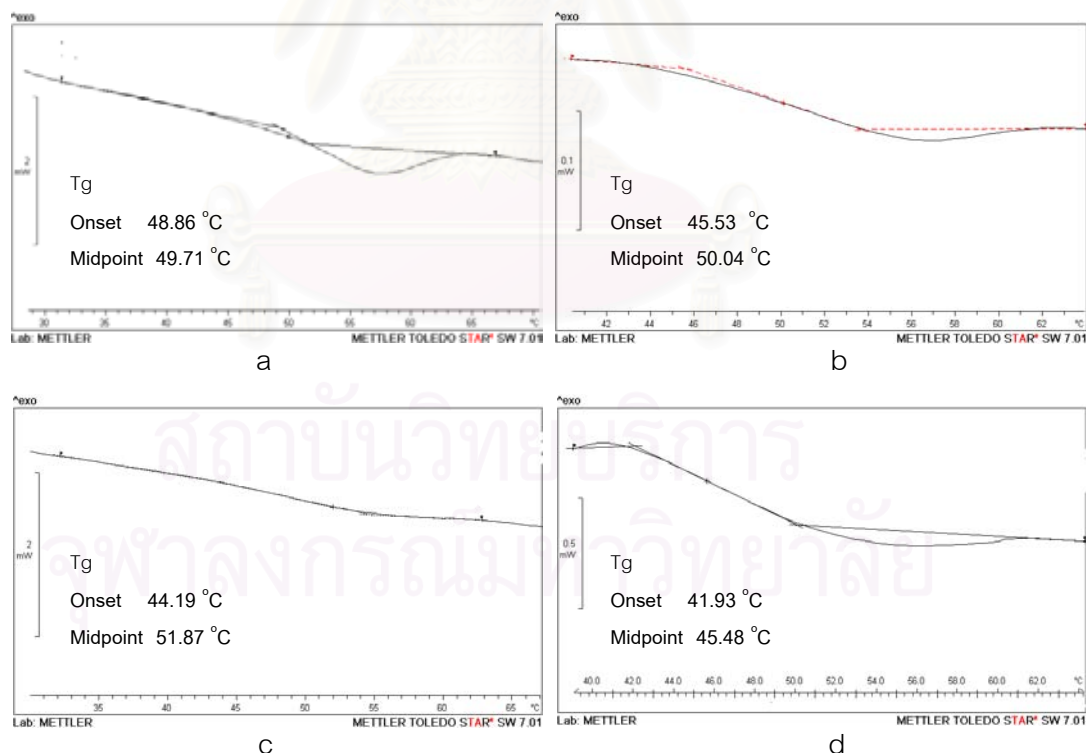


รูปที่ 4.6 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตและลิเทียมแอซีเทต

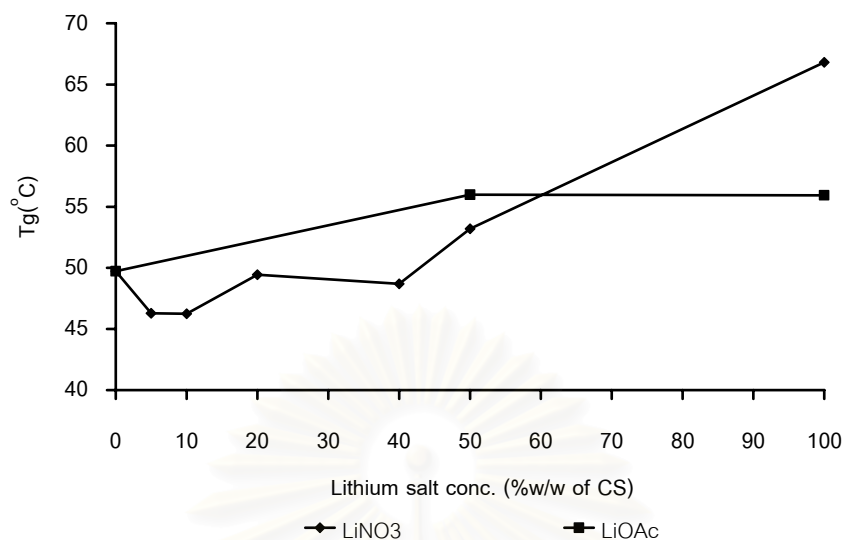
#### 4.5 คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

จากรูปที่ 4.7a) คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเยื่อแผ่นไคโตซานที่ไม่เชื่อมขวางเท่ากับ 49.7 องศาเซลเซียส การเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วไปเป็น 50.0 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่าง กรดซัลฟิวริกและหมู่อะมิโน ดังรูปที่ 4.7b) ในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่มีการเชื่อมขวางตาม รูปที่ 4.7c) คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงขึ้นเป็น 51.9 องศาเซลเซียส แสดงว่าเกิดสาร เชิงซ้อนระหว่างไคโตซานและเกลือ จากรูปที่ 4.7d) การเติมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไปทำให้สายโซ่ ของพอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจึงลดลงเป็น 45.5 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.8 คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณ เกลือลิเทียมไนเตรตมากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก แต่ปริมาณเกลือลิเทียมแอสเทตไม่ทำให้ คุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.7 DSC Thermograms ของ a) uncrosslinked chitosan b) 4% crosslinked chitosan c) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> d) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>+ EC



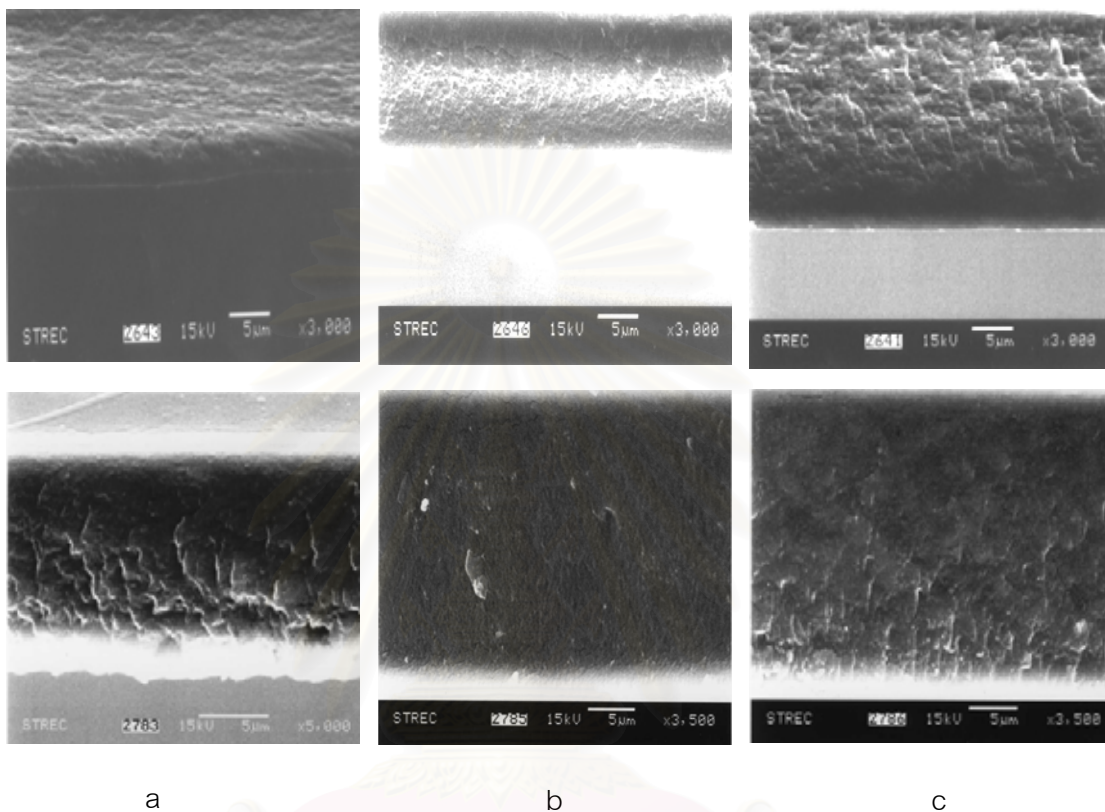
รูปที่ 4.8 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมในปริมาณต่างๆ

#### 4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

จากรูปที่ 4.9 ด้านบนซึ่งแสดงภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นแห้งพบว่า เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นมีลักษณะเป็นแบบเนื้อแน่นและมีลักษณะสมมาตร รูปที่ 4.9a), 4.9b) และ 4.9c) เป็นภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นไคโตซาน 4%crosslinked chitosan และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 12, 10 และ 17 ไมครอน ตามลำดับ แสดงว่าการเชื่อมขวางทำให้เยื่อแผ่นเนื้อแน่นขึ้น ส่วนการเติมเกลือทำให้เยื่อแผ่นมีการบวมตัว และแน่นน้อยกว่าเยื่อแผ่นไคโตซาน และ 4%crosslinked chitosan

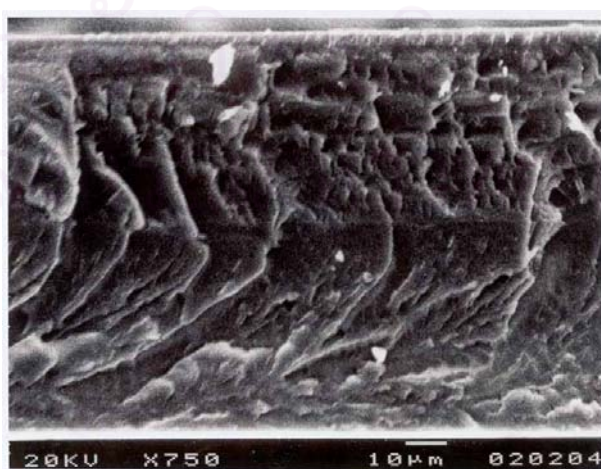
จากรูปที่ 4.9 ด้านล่างซึ่งแสดงภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นที่ผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เนื่องจากการใช้งานจริงในเซลล์เชื้อเพลิงเยื่อแผ่นต้องใช้งานภายใต้สภาวะที่มีความชื้นร้อยละ 100 ซึ่งเยื่อแผ่นควรจะไม่มีเปลี่ยนแปลงลักษณะสัณฐานหลังจากอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นจากรูปพบว่า ในเยื่อแผ่นทุกชนิดมีลักษณะบวมขึ้นหลังการแช่น้ำ โดยมีความหนาของเยื่อแผ่นไคโตซาน 4%crosslinked chitosan และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> เพิ่มขึ้นเป็น 23, 22 และ 21 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวางและเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวางมีการบวมตัวที่น้อยกว่าเยื่อแผ่นไคโตซาน

จากรูปที่ 4.10 แสดงภาคตัดขวางของ Nafion<sup>®</sup> จะเห็นว่าเยื่อแผ่นมีลักษณะเป็นรูพรุนชัดเจนกว่าเยื่อแผ่นไคโตซาน ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโปรตอนในเยื่อแผ่นไคโตซานจึงวิ่งไปตามช่องว่างอิสระ (Free volume) ที่เกิดจากการขยับตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4.11

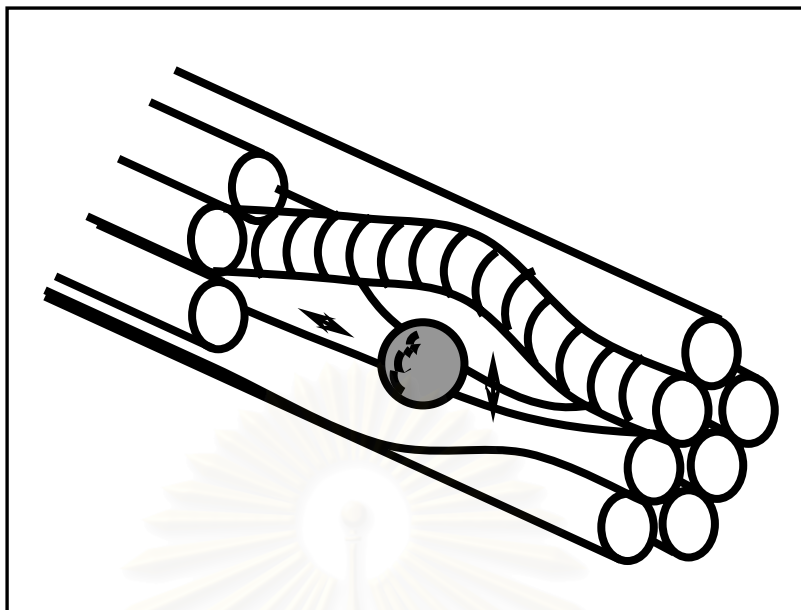


รูปที่ 4.9 ภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นก่อนและหลังการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงใน

a) uncrosslinked chitosan b) 4% crosslinked chitosan c) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>



รูปที่ 4.10 ภาคตัดขวางของ Nafion<sup>®</sup>



รูปที่ 4.11 การเคลื่อนที่ของโปรตอนใน Free volume

#### 4.7 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นไคโตซาน และเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต พบว่าเยื่อแผ่นไคโตซานมีค่าการซึมผ่านเท่ากับ 137 บาร์เรอ (1 บาร์เรอเท่ากับ  $10^{-10} \text{ cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / \text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cm} \cdot \text{Hg}$ ) เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตส่วนใหญ่มีค่าการซึมผ่านมากกว่าเยื่อแผ่นไคโตซาน ค่าการซึมผ่านของเยื่อแผ่นประเภทนี้มีค่าอยู่ในช่วง 127.1 – 302.4 บาร์เรอ สำหรับเยื่อแผ่นที่มีสมบัติทางกายภาพ และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดี ได้แก่ 2%crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan, 2%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>, 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>, 2% crosslinked chitosan + 100%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 100%LiNO<sub>3</sub> มีค่าการซึมผ่านเท่ากับ 191.7, 128.1, 181.5, 181.4, 143.7 และ 256.7 บาร์เรอ ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต และเอทิลีนคาร์บอนเนต พบว่าเยื่อแผ่นส่วนใหญ่มีค่าการซึมผ่านมากกว่าเยื่อแผ่นไคโตซาน ค่าการซึมผ่านของเยื่อแผ่นประเภทนี้มีค่าอยู่ในช่วง 120.4 – 360.0 บาร์เรอ การเติมเอทิลีนคาร์บอนเนตทำให้เยื่อแผ่น 2%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>, 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>, 2% crosslinked chitosan + 100%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 100%LiNO<sub>3</sub> มีค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นเป็น 306.3, 210.9, 221.1 และ 318.3 บาร์เรอ ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมแอสซีเทต พบว่าเยื่อแผ่นส่วนใหญ่มีค่าการซึมผ่านมากกว่าเยื่อแผ่นไคโตซาน ค่าการซึมผ่านของเยื่อแผ่นประเภทนี้มีค่าอยู่ในช่วง 136.5 – 363.6 บาร์เรอ สำหรับเยื่อแผ่นที่มีสมบัติทางกายภาพและค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดี ได้แก่ 2%crosslinked chitosan + 50%LiOAc และ 4%crosslinked chitosan + 100%LiOAc มีค่าการซึมผ่านเท่ากับ 136.5 และ 363.6 บาร์เรอ ตามลำดับ

เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนต่ำกว่า Nafion® ซึ่งค่าเท่ากับ 973 บาร์เรอ แสดงว่าเยื่อแผ่นไคโตซานสามารถนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากโอกาสที่ไฮโดรเจนจะซึมผ่านเยื่อแผ่นแล้วเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนมีน้อย

ตารางที่ 4.2 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นไคโตซานและเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต

ชนิดของเยื่อแผ่น	P (Barrer)	ชนิดของเยื่อแผ่น	P (Barrer)
Uncrosslinked CS	137.0±14.8	4% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 20%	127.1±5.0
2% Crosslinked CS	191.7±13.7	6% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 20%	171.0±12.9
4% Crosslinked CS	128.1±10.3	CS + LiNO <sub>3</sub> 40%	200.5±21.1
6% Crosslinked CS	127.1±10.0	2% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 40%	159.8±2.4
CS + LiNO <sub>3</sub> 5%	302.4±28.1	4% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 40%	166.1±5.6
2% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 5%	292.5±22.2	6% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 40%	260.7±24.1
4% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 5%	131.5±21.2	CS + LiNO <sub>3</sub> 50%	170.6±7.3
6% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 5%	276.0±5.8	2% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 50%	181.5±3.0
CS + LiNO <sub>3</sub> 10%	240.4±6.0	4% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 50%	181.4±13.9
2% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 10%	216.2±10.5	6% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 50%	201.1±4.8
4% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 10%	180.5±4.4	CS + LiNO <sub>3</sub> 100%	129.6±11.7
6% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 10%	170.9±10.8	2% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 100%	143.7±6.5
CS + LiNO <sub>3</sub> 20%	182.5±3.5	4% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 100%	256.7±7.0
2% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 20%	224.5±6.5	6% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 100%	137.9±0.2



ตารางที่ 4.3 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรตและเอทิลีนคาร์บอนเนต

ชนิดของเยื่อแผ่น	P (Barrer)
CS + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	122.7±7.7
2% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	120.4±4.5
4% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	273.3±7.0
6% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	360.0±3.1
CS + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	163.8±16.0
2% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	306.3±25.3
4% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	210.9±14.2
6% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	246.8±6.4
CS + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	242.6±32.4
2% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	221.1±20.3
4% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	318.3±22.9
6% Crosslinked CS + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	286.4±3.7

ตารางที่ 4.4 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนในเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมแอสซิเตต

ชนิดของเยื่อแผ่น	P (Barrer)
CS + LiOAc 50%	156.0±14.6
2% Crosslinked CS + LiOAc 50%	136.5±1.6
4% Crosslinked CS + LiOAc 50%	172.1±11.2
CS + LiOAc 100%	196.7±16.8
2% Crosslinked CS + LiOAc 100%	215.4±1.7
4% Crosslinked CS + LiOAc 100%	363.6±12.4

#### 4.8 ค่าการนำโปรตอน

จากรูปที่ 4.12 เยื่อแผ่นที่ผ่านการเชื่อมขวางมีค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น โดยในเยื่อแผ่นไคโตซานมีค่าการนำโปรตอนเท่ากับ 0.002 ซีเมนส์/เซนติเมตร หลังการเชื่อมขวางค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้นเป็น 0.024 ซีเมนส์/เซนติเมตร เนื่องจากเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของโปรตอน ซึ่งเคลื่อนที่ในรูปแบบของโปรตอน หรือไฮโดรเนียมไอออนจากตำแหน่งที่เป็นไอออนลบ ไปยังอีกตำแหน่งที่เป็นไอออนลบเช่นเดียวกัน [5] การเชื่อมขวางนี้เป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่เป็นไอออนลบในเยื่อแผ่นทำให้ความหนาแน่นของประจุเพิ่มขึ้น โปรตอนจึงเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้หมู่ซัลเฟตยังเป็นหมู่ที่มีความสามารถในการแตกตัวให้โปรตอนได้ดี (Strong proton donating) [19] ทำให้การเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ่าย เพราะไม่ต้องใช้พลังงานสูงในการสลายพันธะร่วมกับหมู่ซัลเฟต ซึ่งการที่มีอัตราการเคลื่อนที่ช้ากว่าระหว่างเยื่อแผ่นกับโปรตอนทำให้โปรตอนเคลื่อนที่ได้ดี [5] การเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกทำให้ค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่ซัลเฟตเพิ่มขึ้นจากอัตราการเกิดเชื่อมขวางที่มากขึ้น จากรูป แสดงว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมน่าจะเป็นร้อยละ 2 หรือ 4 เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเป็นร้อยละ 6 ค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คือ จาก 0.027 เป็น 0.029 ซีเมนส์/เซนติเมตร

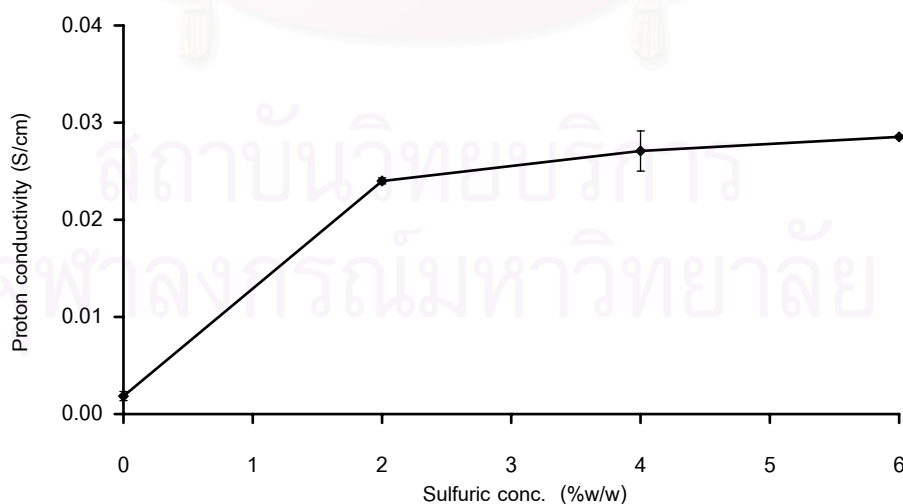
จากรูปที่ 4.13 ในเยื่อแผ่นที่มีการเติมเกลือลิเทียม จะทำให้โครงสร้างของไคโตซานมีความเป็นอสัณฐานเพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ช่วยให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนดีขึ้นผ่านทางรูช่องว่าง และทำลายพันธะของไอออน จึงมีการสร้างช่องว่าง (Free volume) ให้โปรตอนผ่านไปได้ [5] การเพิ่มปริมาณของเกลือลิเทียมในเตรตในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณเกลือลิเทียมในเตรตเท่ากับร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ค่าการนำโปรตอนจะลดลงจาก 0.006 เป็น 0.005 ซีเมนส์/เซนติเมตร ในเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมแอสซีเทต การเพิ่มปริมาณเกลือจากร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าการนำโปรตอนลดลงเช่นกัน แต่ลดลงในปริมาณที่มากกว่าในเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมในเตรต คือ จาก 0.005 เป็น 0.001 ซีเมนส์/เซนติเมตร เนื่องจากปริมาณเกลือที่มากเกินไปทำให้ลิเทียมไปสร้างพันธะกับหมู่อะมิโน จึงเหลือหมู่อะมิโนที่ให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านน้อยลง ดังนั้นปริมาณเกลือลิเทียมที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ทำให้ทราบปริมาณกรดซัลฟิวริก และเกลือลิเทียมที่เหมาะสม ดังนั้นในการโคปเยื่อแผ่นเพื่อให้มีค่าการนำโปรตอนที่ดีขึ้น จึงมีการศึกษา

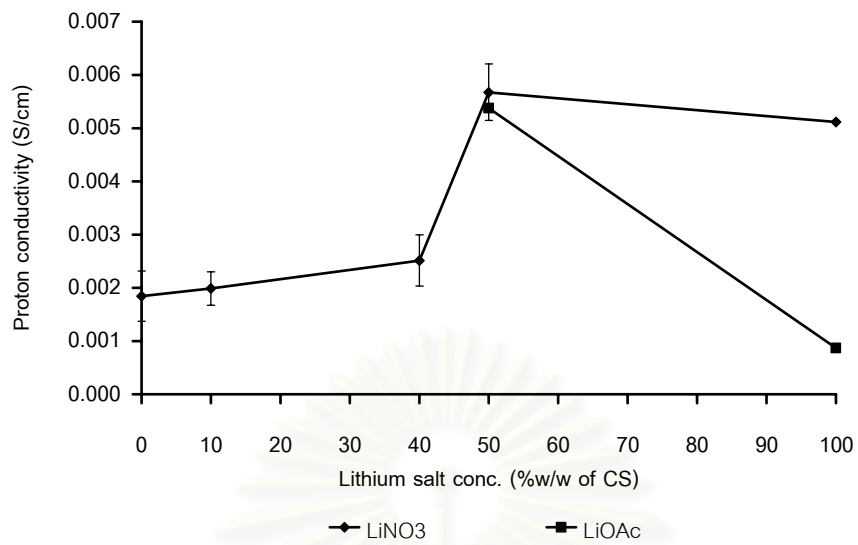
เฉพาะในเยื่อแผ่น 2%crosslinked chitosan, 4 %crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> + EC เท่านั้น

จากรูปที่ 4.14 การโคปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกจะช่วยให้ค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายกรดในเยื่อแผ่นทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ (Liquid like electrolyte) ให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยเยื่อแผ่น 2%crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> + EC ซึ่งมีค่าการนำโปรตอนเท่ากับ 0.024, 0.027, 0.031 และ 0.036 ซีเมนส์/เซนติเมตร หลังการโคปจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.044, 0.058, 0.066 และ 0.062 ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ

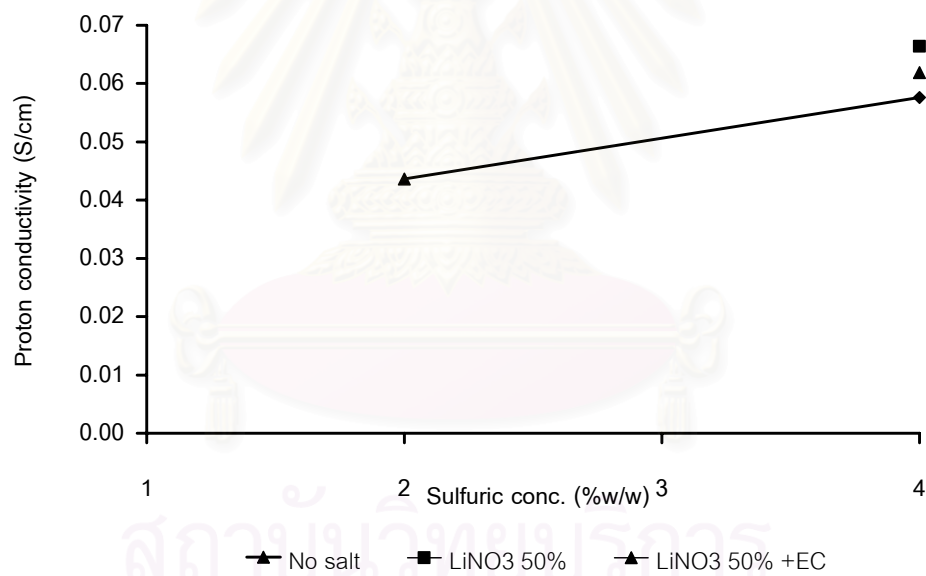
จากรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นต่างๆ ที่ได้ทำการวัดค่าการนำโปรตอน พบว่าในเยื่อแผ่นที่มีการโคปจะให้ค่าการนำโปรตอนสูงที่สุด และทำให้เยื่อแผ่นมีค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น 20 - 40 เท่า เยื่อแผ่นที่มีการเติมเกลือและเชื่อมขวางทั้งที่เติมและไม่เติมเอทิลีนคาร์บอนเพิ่มขึ้น 15 - 20 เท่า เยื่อแผ่นที่มีการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น 10 - 15 เท่า เยื่อแผ่นที่มีการเติมเกลือเพิ่มขึ้น 2 - 6 เท่า เมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นไคโตซาน ดังนั้นเยื่อแผ่นในกลุ่มที่มีการโคปจึงเป็นเยื่อแผ่นที่น่าสนใจในการนำไปใช้ต่อไป ซึ่งเยื่อแผ่นที่มีค่าการนำโปรตอนสูงที่สุด คือ เยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> ที่ผ่านการโคป มีค่าเท่ากับ 0.066 ซีเมนส์/เซนติเมตร ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นทุกชนิดที่เตรียมขึ้นยังมีค่าการนำโปรตอนน้อยกว่า Nafion<sup>®</sup> 115 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.08 ซีเมนส์/เซนติเมตร



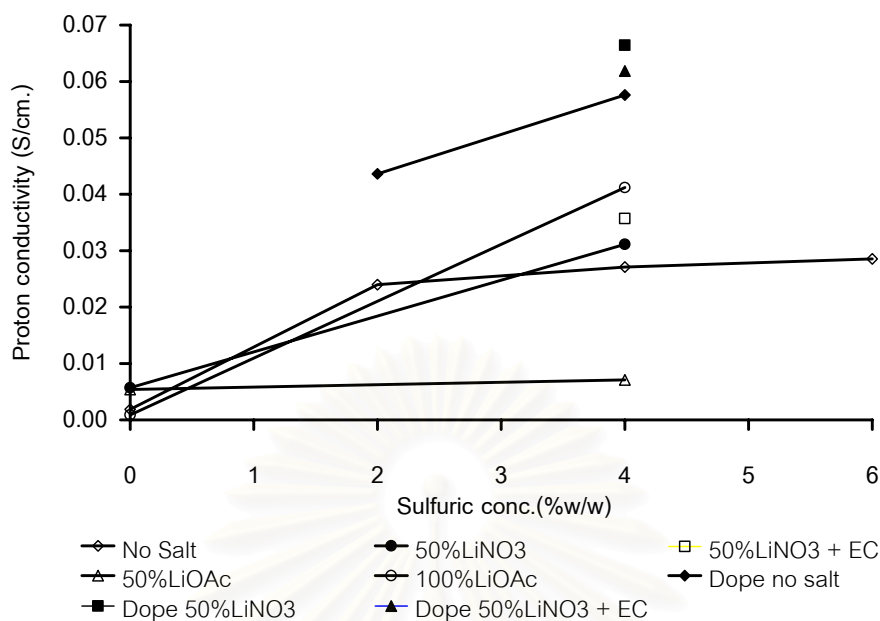
รูปที่ 4.12 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวาง



รูปที่ 4.13 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.14 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่โดปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 %w/w



รูปที่ 4.15 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 พบว่าเยื่อแผ่นไคโตซาน และ 2%crosslinked chitosan ต้องให้ระบบมีความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 96 จึงจะสามารถนำโปรตอนได้ โดยค่าการนำโปรตอนที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 96 เยื่อแผ่นมีค่าการนำโปรตอนเท่ากับ 0.0006 และ 0.0048 ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน เยื่อแผ่นที่เชื่อมขวางนำโปรตอนได้มากกว่า ในเยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan สามารถนำโปรตอนได้ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในระบบต่ำกว่าคือ ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต้อ้อยละ 90 ซึ่งมีค่าการนำโปรตอนเท่ากับ 0.0007 ซีเมนส์/เซนติเมตร ที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 96 ค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นไคโตซาน, 2%crosslinked chitosan และ 4%crosslinked chitosan จะเพิ่มขึ้นเป็น 0.002, 0.023 และ 0.027 ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ

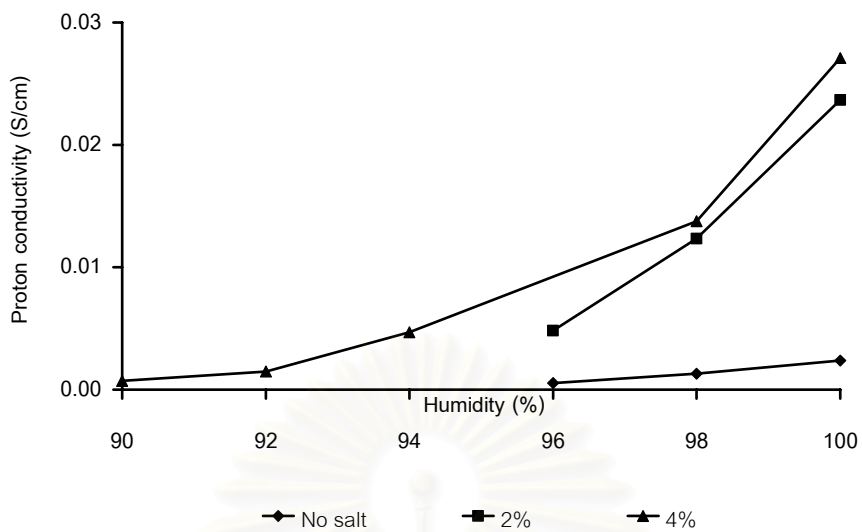
จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตชนิด 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> + EC จะสามารถนำโปรตอนได้ที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่า ความสำคัญของน้ำต่อค่าการนำโปรตอนจะน้อยลงเช่นกัน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของสายโซ่ที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างให้โปรตอนผ่านไปได้ [5] และในเยื่อแผ่นที่เติมสารพลาสติกไซเซอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน ค่าการนำโปรตอนจะมากกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่เติม เช่น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 94 ค่าการ

นำโปรตอนของ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> + EC เท่ากับ 0.0019 และ 0.0105 ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากความยืดหยุ่นในเยื่อแผ่นที่เติมสารพลาสติกไซเซอร์มีมากกว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 94 ค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> + EC จะเพิ่มขึ้นเป็น 0.027 และ 0.036 ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ

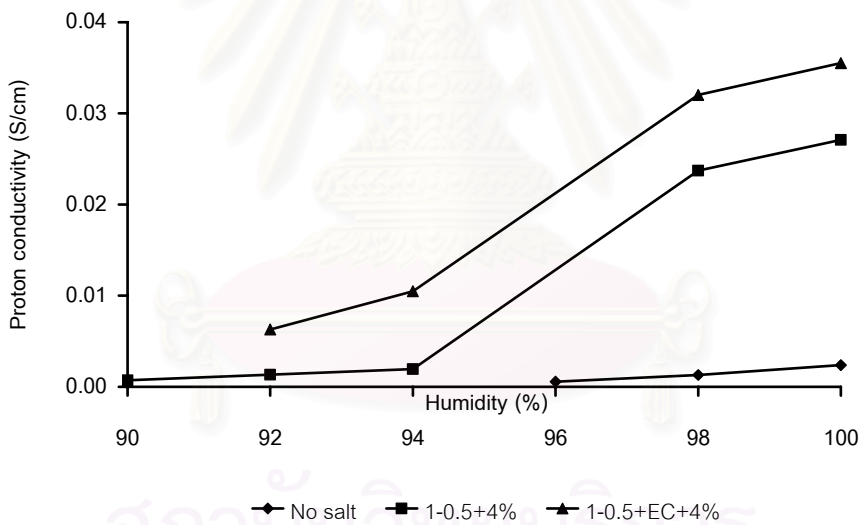
จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าเยื่อแผ่นที่โดปด้วยกรดซัลฟิวริกจะเริ่มสามารถนำโปรตอนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง คือ มากกว่าร้อยละ 75 ซึ่งค่าการนำโปรตอนเริ่มต้นของเยื่อแผ่น 2% crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + EC + 50%LiNO<sub>3</sub> ที่ผ่านการโดปเท่ากับ 0.00005, 0.0006, 0.0006 และ 0.0007 ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ ที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 94 ค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่น 2%crosslinked chitosan, 4%crosslinked chitosan, 4% crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + EC + 50%LiNO<sub>3</sub> ที่ผ่านการโดป จะเพิ่มขึ้นเป็น 0.042, 0.050, 0.065 และ 0.064 ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ

จากการศึกษาผลของความชื้นในระบบของเยื่อแผ่นชนิดต่างๆ แสดงว่า โปรตอนเคลื่อนที่ภายในเยื่อแผ่นในรูปของไฮโดรเนียมไอออน (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) ซึ่งจะสามารถสังเกตได้ว่าเยื่อแผ่นทุกชนิดเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 96 ค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

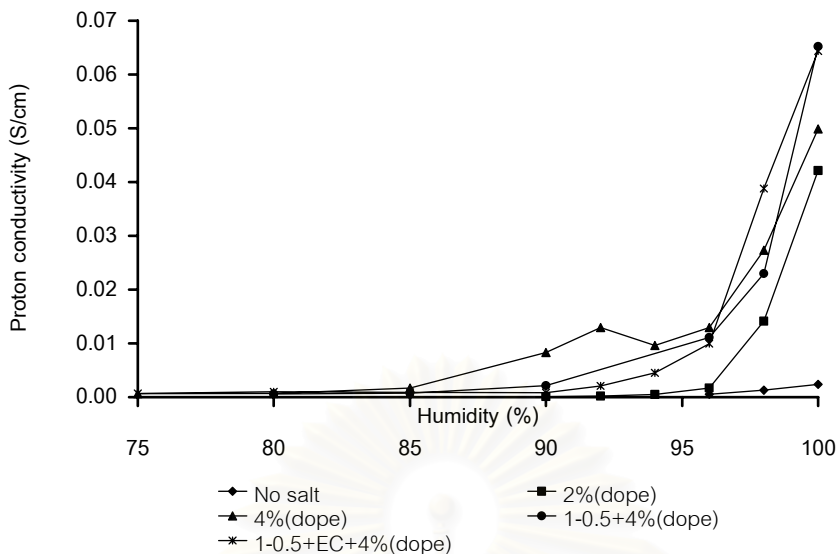
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวางที่ความชื้นต่างๆ



รูปที่ 4.17 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมไนเตรต และเอทิลีนคาร์บอนเนตที่ความชื้นต่างๆ



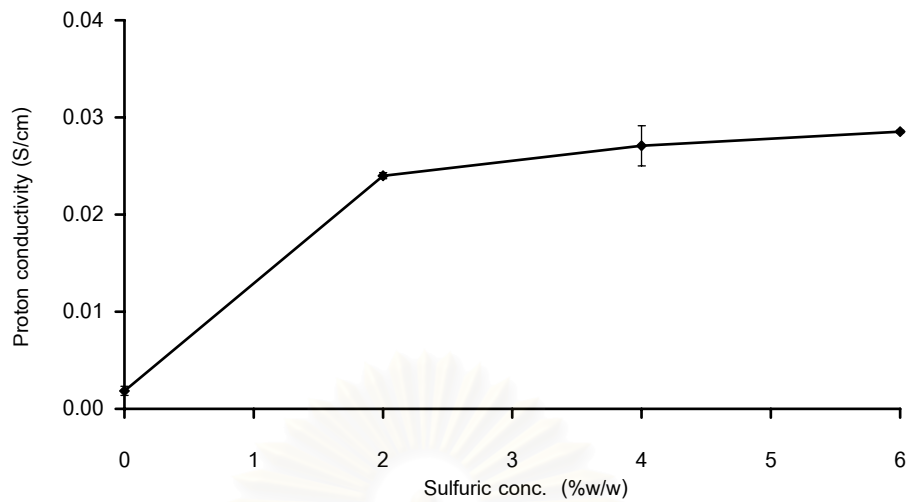
รูปที่ 4.18 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่โดปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 %w/w ที่ความชื้นต่างๆ

## 4.9 กลไกการนำโปรตอน

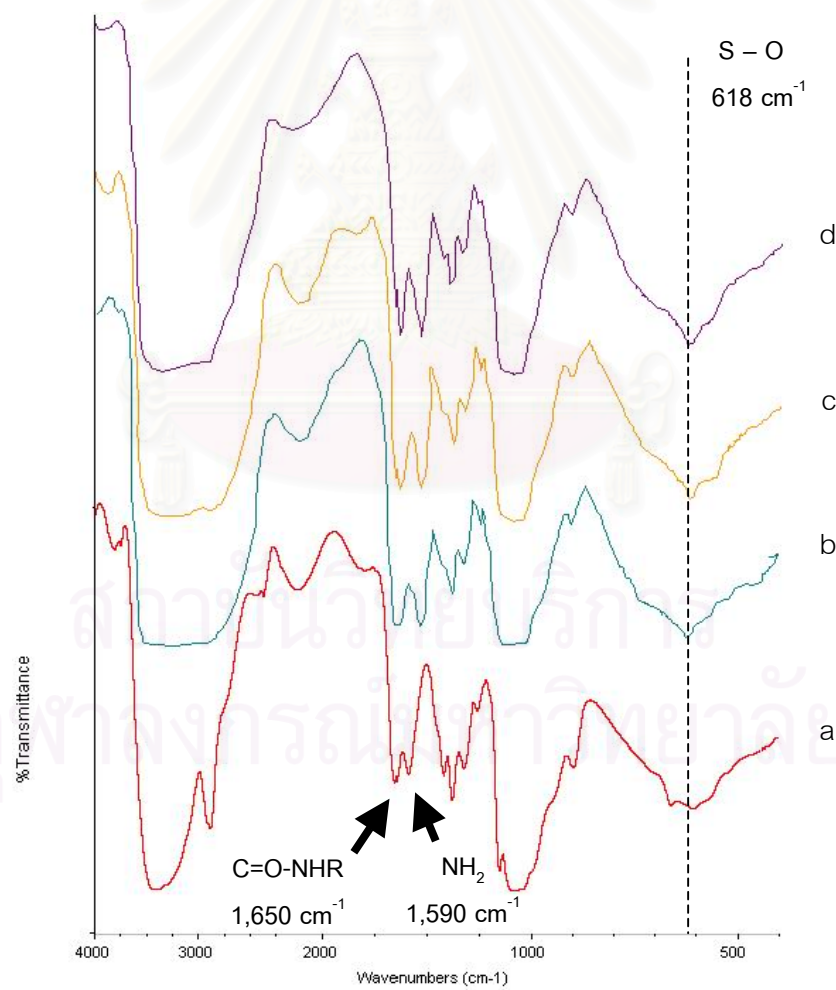
### 4.9.1 เยื่อแผ่นที่เชื่อมขวาง

กลไกการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวาง คาดว่าโปรตอนเคลื่อนที่ในรูปของไฮโดรเนียมผ่านทางหมู่ซัลเฟตที่มีความเป็นลบ ซึ่งยืนยันได้จากรูปที่ 4.19 ค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นการเพิ่มหมู่ซัลเฟตในเยื่อแผ่น และจากผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเยื่อแผ่นโดย FTIR จากรูปที่ 4.20 พบว่าในเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวางมีการเลื่อนของหมู่อะมิโน แสดงว่าเกิดพันธะขึ้นระหว่างหมู่อะมิโนและกรดซัลฟิวริก นอกจากนี้จะปรากฏพันธะ S-O ที่ตำแหน่ง  $618 \text{ cm}^{-1}$  ทำให้ทราบว่าหมู่ฟังก์ชันของซัลเฟตเกิดขึ้นในเยื่อแผ่น โดยการเคลื่อนที่ของไฮโดรเนียมเป็นไปในลักษณะที่เรียกว่า Structure diffusion (Grotthuss mechanism) ซึ่งมีการสร้างและทำลายพันธะไฮโดรเจนในระหว่างการเคลื่อนที่ [20, 21] เนื่องจากหมู่ซัลเฟตได้มาจากกรดแก่ จึงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและยังเป็นหมู่ที่มีความสามารถในการแตกตัวให้โปรตอนได้ดี (Strong proton donating) [19] ทำให้การเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ่าย และการที่หมู่ของซัลเฟตเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของประจุเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของไฮโดรเนียมจึงดีขึ้น เนื่องจากมีตำแหน่งของตัวรับโปรตอน (Proton acceptor) อยู่ใกล้กัน พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างตำแหน่งจึงน้อยลง





รูปที่ 4.19 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวาง

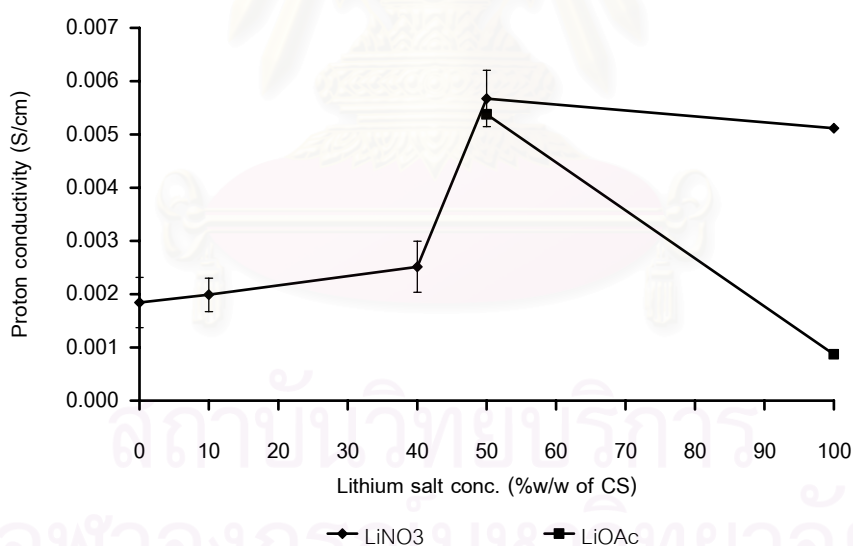


รูปที่ 4.20 FTIR spectra ของเยื่อแผ่น a) uncrosslinked chitosan

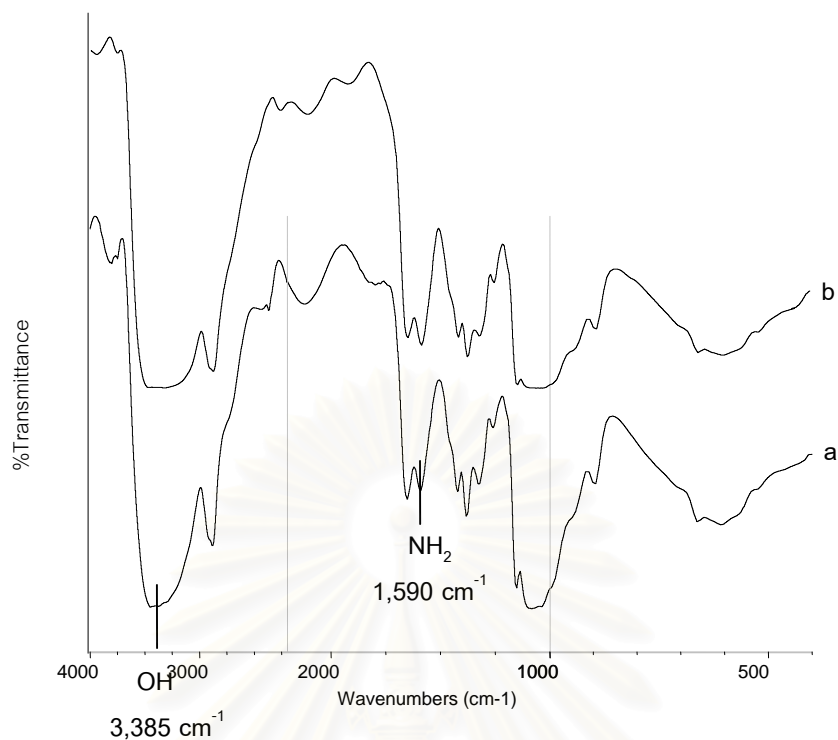
b) 2 %crosslinked chitosan c) 4% crosslinked chitosan d) 6% crosslinked chitosan

#### 4.9.2 เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิต

กลไกการเคลื่อนที่ในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิต คาดว่าไฮโดรเนียมจะเคลื่อนที่ไปตามหมู่ของอะมิโน โดยการสร้างและสลายพันธะไฮโดรเจนกับอะมิโน ซึ่งยืนยันได้จากรูปที่ 4.21 ค่าการนำโปรตอนจะลดลงเมื่อปริมาณเกลือลิเทียมมากกว่าร้อยละ 50 เนื่องจากลิเทียมที่มากเกินไปอาจจะไปสร้างพันธะกับหมู่อะมิโน ซึ่งเป็นหมู่ที่ไฮโดรเนียมเคลื่อนที่ผ่าน และจากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีโดย FTIR จากรูปที่ 4.22 พบว่า ลักษณะแบนด์ของหมู่ไฮดรอกซิลกว้างขึ้นกว่าเดิม แสดงว่าลิเทียมน่าจะเกิดพันธะกับหมู่ของไฮดรอกซิล ในขณะที่หมู่ของอะมิโนไม่มีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะหรือช่วงคลื่น ในเยื่อแผ่นที่มีการเติมเกลือลิเทียม จะทำให้โครงสร้างของไคโตซานมีความเป็นอสัณฐานเพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้นช่วยให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนดีขึ้นผ่านทางช่องว่าง (Free volume) ที่เกิดขึ้น แต่ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตน้อยกว่าในเยื่อแผ่นที่มีการเชื่อมขวาง เนื่องจากหมู่อะมิโนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับโปรตอนมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าหมู่ซัลเฟตซึ่งมาจากกรดที่แรงกว่า



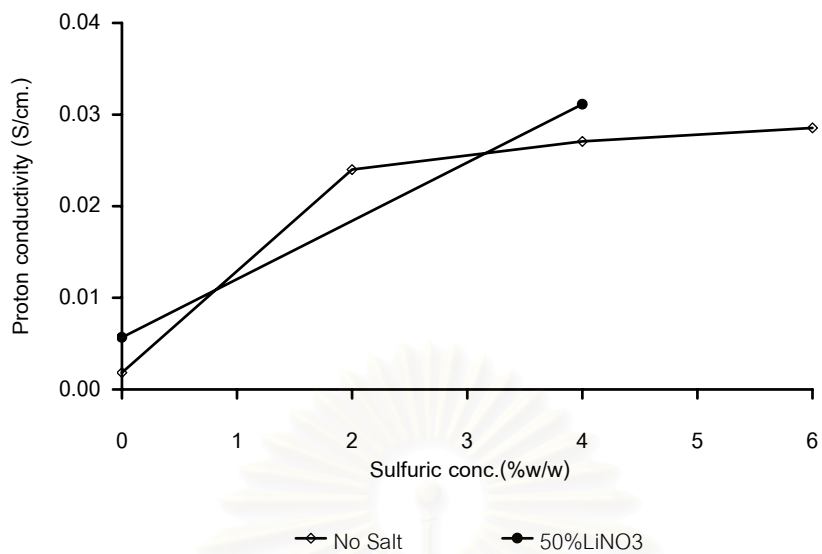
รูปที่ 4.21 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เติมเกลือลิเทียมในปริมาณต่างๆ



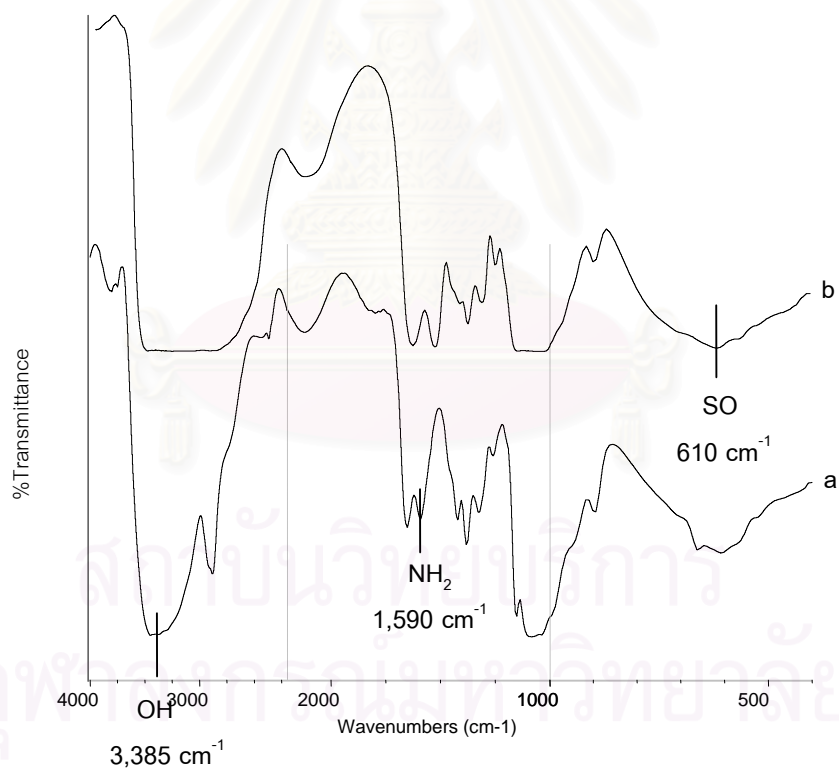
รูปที่ 4.22 FTIR spectra ของเยื่อแผ่น a) chitosan b) chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>

#### 4.9.3 เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง

กลไกการเคลื่อนที่ในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง คาดว่าไฮโดรเนียมเคลื่อนที่ไปตามหมู่ซัลเฟต ซึ่งยืนยันได้จากข้อมูลค่าการนำโปรตอน จากรูปที่ 4.23 พบว่าในเยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าการนำโปรตอนที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.027 และ 0.031 ซีเมนส์/เซนติเมตร ตามลำดับ และจากผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเยื่อแผ่นโดย FTIR จากรูปที่ 4.24 พบว่าในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวางมีการเลื่อนของหมู่อะมิโนจากตำแหน่ง 1,590 ไปเป็น 1,533 cm<sup>-1</sup> แสดงว่าเกิดพันธะขึ้นระหว่างหมู่อะมิโนและกรดซัลฟิวริก นอกจากนี้จะปรากฏพันธะ S-O ที่ตำแหน่ง 610 cm<sup>-1</sup> ทำให้ทราบว่าหมู่ฟังก์ชันของซัลเฟตเกิดขึ้น นอกจากนี้ลักษณะแบนด์ของหมู่ไฮดรอกซิลกว้างขึ้นกว่าเดิม แสดงว่าลิเทียมน่าจะเกิดพันธะกับหมู่ของไฮดรอกซิล และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ซัลเฟตกับอะมิโนที่ไม่ได้ถูกเชื่อมขวางแล้ว พบว่าหมู่ซัลเฟตมีความว่องไวกว่า จึงน่าจะทำหน้าที่เป็นตัวรับโปรตอน



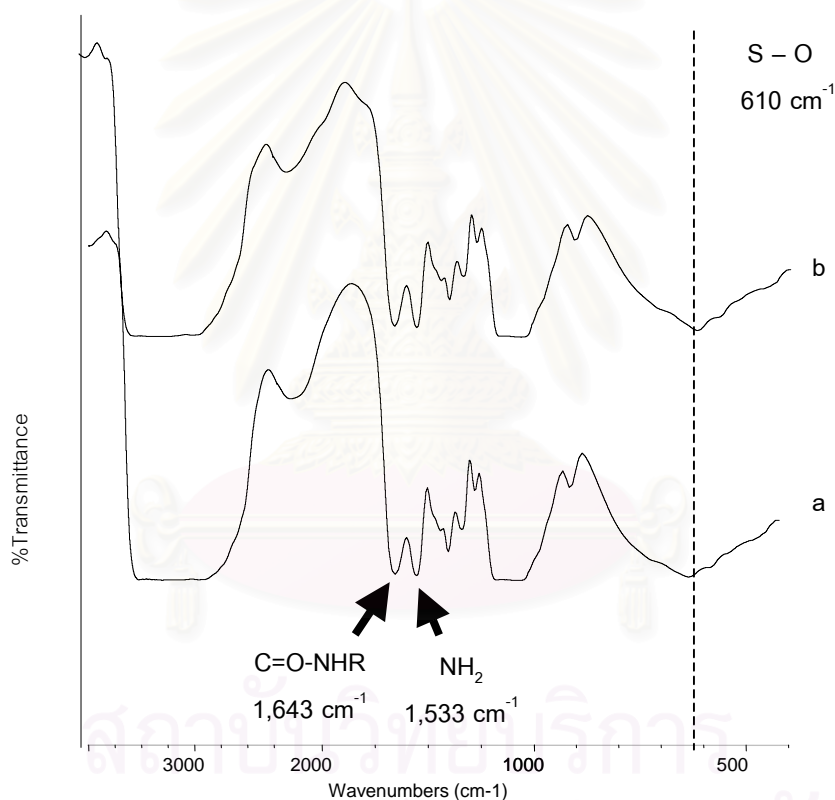
รูปที่ 4.23 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวางและไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง



รูปที่ 4.24 FTIR spectra ของเยื่อแผ่น a) chitosan  
b) 4% crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>

#### 4.9.4 เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวางและเติมสารพลาสติกไซเซอร์

กลไกการเคลื่อนที่ในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง และเติมสารพลาสติกไซเซอร์ การเติมเอทิลีนคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงทำให้ การเคลื่อนที่ของไฮโดรเนียมดีขึ้นผ่านทางช่องว่าง (Free volume) ที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าการนำโปรตอน ของเยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> เมื่อเติมเอทิลีนคาร์บอเนตจะเพิ่มขึ้นจาก 0.031 เป็น 0.036 ซีเมนส์/เซนติเมตร โดยหมู่ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับโปรตอนยังคงเป็นหมู่ซัลเฟต โดยจากรูปที่ 4.25 ลักษณะของ FTIR spectra ของเยื่อแผ่นที่เติมเอทิลีนคาร์บอเนตไม่แตกต่างกับ เยื่อแผ่นที่ไม่ได้เติม แสดงว่าเอทิลีนคาร์บอเนตที่เติมเข้าไปนั้นไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับไคโตซาน แต่ เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างพอลิเมอร์เท่านั้น [17]



รูปที่ 4.25 FTIR spectra ของเยื่อแผ่น a) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>

b) 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> + EC

#### 4.9.5 เยื่อแผ่นที่มีการโดปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก

กลไกการเคลื่อนที่ในเยื่อแผ่นที่มีการโดป เนื่องจากสารละลายกรดทำหน้าที่เป็นสารอเล็กโทรไลต์ให้ไฮโดรเนียมผ่านไปได้ดี

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ชนิดของเยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิง ประกอบด้วย

- เยื่อแผ่นไคโตซานที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง
- เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง
- เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่มีการเติมสารพลาสติไซเซอร์ที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง
- เยื่อแผ่นที่โคปด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

##### 1) สมบัติของไคโตซานที่เตรียม

น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ  $1.6 \times 10^6$  ดัชนี ความหนืดเท่ากับ 3,984 เซนติพอยส์ และร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล เมื่อวัดด้วยเครื่อง NMR และการไทเทรตทางเคมีเท่ากับร้อยละ 94.0 และ 92.3 ตามลำดับ

##### 2) ความสามารถทนต่อแรงดึง

เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นส่วนใหญ่มีความแข็งแรงเชิงกลดีกว่า Nafion® 115 ซึ่งมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงเท่ากับ 43 เมกกะปาสคาล [18] โดยเยื่อแผ่นที่มีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงมากที่สุดคือ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 88.6 เมกกะปาสคาล ผลการเติมเอทิลีนคาร์บอนेटทำให้ความแข็งแรงของเยื่อแผ่นน้อยลง โดยทำให้เยื่อแผ่น 4% crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าลดลงเป็น 47.1 เมกกะปาสคาล

### 3) รั้อยละการบวมตัว

เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นทั้งหมดยังมีค่าการบวมตัวที่มากเกินไป โดยเยื่อแผ่นที่มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด คือ 6%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับรั้อยละ 60.9 ขณะที่เยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับรั้อยละ 64.2 การเติมเอทิลีนคาร์บอนเตตจะทำให้เยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตมีค่าการบวมตัวมากขึ้น โดยทำให้เยื่อแผ่น 6% crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นรั้อยละ 72.0 และ 75.0 ตามลำดับ

### 4) คุณนหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

คุณนหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเยื่อแผ่นไคโตซานที่ไม่เชื่อมขวางเท่ากับ 49.7 องศาเซลเซียส การเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นรั้อยละ 4 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณนหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วไปเป็น 50.0 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟิวริกและหมู่อะมิโน ในเยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> คุณนหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงขึ้นเป็น 51.9 องศาเซลเซียส แสดงว่าเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างไคโตซานและเกลือในเยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> การเติมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไปทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น คุณนหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจึงลดลงเป็น 45.5 องศาเซลเซียส คุณนหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณเกลือลิเทียมไนเตรตมากกว่ารั้อยละ 40 โดยน้ำหนัก แต่ปริมาณเกลือลิเทียมแอสเทตไม่ทำให้คุณนหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแตกต่างกันมากนัก

### 5) ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นมีลักษณะเป็นแบบเนื้อแน่นทั้งในสภาพแห้งและเปียก ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโปรตอนในเยื่อแผ่นไคโตซาน น่าจะผ่านทางช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการขยับตัวของสายโซ่พอลิเมอร์

## 6) ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นมีค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 120.4 – 363.6 บาร์เรอ โดยเยื่อแผ่นส่วนใหญ่มีค่าการซึมผ่านมากกว่าเยื่อแผ่นไคโตซานที่ไม่เชื่อมขวางซึ่งมีค่าเท่ากับ 137 บาร์เรอ เยื่อแผ่นที่มีสมบัติทางกายภาพ และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดี ได้แก่ 4% crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub>, 4%crosslinked chitosan + 100%LiNO<sub>3</sub>, 2%crosslinked chitosan + 50%LiOAc และ 4%crosslinked chitosan + 100%LiOAc มีค่าการซึมผ่านเท่ากับ 181.4, 256.7, 136.5 และ 363.6 บาร์เรอ ตามลำดับ การเติมเอทิลีนคาร์บอนเนตทำให้เยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> และ 4%crosslinked chitosan + 100%LiNO<sub>3</sub> มีค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นเป็น 210.9 และ 318.3 บาร์เรอ ตามลำดับ เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจนต่ำกว่า Nafion<sup>®</sup> 115 ซึ่งค่าเท่ากับ 973 บาร์เรอ แสดงว่าสามารถนำเยื่อแผ่นไคโตซานไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงได้อย่างปลอดภัย

## 7) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่า Nafion<sup>®</sup> 115 ซึ่งค่าเท่ากับ 0.91 มิลลิโมลสมมูลย์/กรัม [1] โดยเยื่อแผ่นที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมากที่สุด คือ 6%crosslinked chitosan + 100%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 6.11 มิลลิโมลสมมูลย์/กรัม ขณะที่เยื่อแผ่น 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 5.85 มิลลิโมลสมมูลย์/กรัม เมื่อเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริก การเติมเกลือลิเทียมไนเตรตให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าการเติมเกลือลิเทียมแอสซิเตต การเติมเอทิลีนคาร์บอนเนตนั้นไม่มีผลต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากสารพลาสติกไซเซอร์ที่เติมเข้าไปนั้น มีผลต่อเยื่อแผ่นในด้านการทำให้สายโซ่ยืดหยุ่นมากขึ้นเท่านั้น



## 8) ค่าการนำโปรตอน

ค่าการนำโปรตอนที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ของเยื่อแผ่นชนิดต่างๆ แสดงได้ดังนี้

Type	LiNO <sub>3</sub> (%w/w of CS)					LiOAc (%w/w of CS)	
	0	10	40	50	100	50	100
Uncrosslinked	0.0018	0.0020	0.0025	0.0057	0.0051	0.0054	0.0009
2%crosslinked	0.0240						
4%crosslinked	0.0271			0.0311		0.0071	0.0412
6%crosslinked	0.0285						
4%crosslinked+EC				0.0357			
Dope	2%crosslinked	0.0436					
	4%crosslinked	0.0576		0.0664			
	4%crosslinked+EC			0.0619			

เยื่อแผ่นที่มีลักษณะเหมาะสมที่สุด คือ 4%crosslinked chitosan + 50%LiNO<sub>3</sub> โดยมีสมบัติต่างๆ ดังนี้

สมบัติ	4%CS+50%LiNO <sub>3</sub>	Nafion <sup>®</sup> 115
ความสามารถทนต่อแรงดึง (MPa)	89	43
ร้อยละการบวมตัว (%)	64	35 <sup>a</sup>
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Meq/g)	5.85	0.91
อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (°C)	52	-
ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน (Barrer)	181	973
ค่าการนำโปรตอนก่อนโด๊ป (S/cm)	0.03	0.08
ค่าการนำโปรตอนก่อนโด๊ป (S/cm)	0.07	

<sup>a</sup> แช่น้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

<sup>b</sup> แช่น้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส

## 9) กลไกการนำโปรตอน

โปรตอนเคลื่อนที่ในรูปแบบของไฮโดรเนียมไอออนไปตามหมู่ของซัลเฟตในเยื่อแผ่นไคโตซานที่เชื่อมขวาง หรือไปตามหมู่ของอะมิโนในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิต การเติมเอทิลีนคาร์บอนเนตเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงเกิดช่องว่าง (Free volume) ให้ไฮโดรเนียมผ่านไปได้มากขึ้น และเยื่อแผ่นที่มีการโคปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายกรดที่เข้าไปแทรกตัวในพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็น Liquid - like electrolyte

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกและการโคปเป็นวิธีการเตรียมเยื่อแผ่นไฮโดรคาร์บอน เพื่อใช้เป็นเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งน่าจะได้ทดสอบกับเยื่อแผ่นอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ต่อไป
2. ควรทดสอบอายุการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงด้วย

## รายการอ้างอิง

1. ชันทอง สุนทรภา. การพัฒนาเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
2. อภิชัย เทอดเทียนวงษ์. เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอนเนตหลอม. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
3. สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง. การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
4. South Dakota School of mines and Technology. Fuel cell Basics : How they work. [Online] Available from: <http://www.fuelcells.org/basics/how.html>. [2004, Jan 22].
5. P. G. Bruce. Solid State Electrochemistry. Cambridge university Press, 1995.
6. รัตเกล้า ภูติวรรณถ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มโคโตนโดยการใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
7. M. Z. A. Yahya, A. K. Arof, Effect of Oleic Acid Plasticizer on Chitosan-lithium acetate Solid Polymer Electrolytes, *European Polymer Journal*, Vol. 39, 2003 :887-902.
8. Y. Wan, K. A. M. Creber, B. Peppley and V. B. Bui, Ionic Conductivity of Chitosan Membrane, *Polymer*, Vol. 44, 2003 :1057-1065.
9. M. Z. A. Yahya, A. K. Arof, Studies on Lithium acetate Doped Chitosan Conducting Polymer System, *European Polymer Journal*, Vol. 38, 2002 : 1191 – 1197.
10. Z. Osman, Z. A. Ibrahim, A. K. Arof, Conductivity Enhancement due to Dissociation in Plasticized Chitosan based Polymer Electrolytes, *Carbohydrate Polymer*, Vol. 40, 2001:167 – 173.
11. N. M. Morni, A. K. Arof, Chitosan – lithium triflate Electrolyte in Secondary Lithium Cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 77, 1999: 42 – 48.
12. N. M. Morni, N. S. Mohamed, A. K. Arof, Silver nitrate Doped Chitosan acetate Films and Electrochemical Cell Performance, *Materials Science and Engineering*, Vol. B45, 1997: 140 – 146.

13. R. H. Y. Subban, A. K. Arof, S. Radhakrishna, Polymer Batteries with Chitosan Electrolyte Mixed with Sodium perchlorate, *Materials Science and Engineering*, Vol. B38, 1996: 156 – 160.
14. N. S. Mohamed, R. H. Y. Subban, A. K. Arof, Polymer Batteries Fabricated from Lithium complexed acetylated chitosan, *Journal of Power Sources*, Vol. 56, 1995: 153 – 156.
15. นันทชัย ศรีนภาวงศ์. การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบร่วมเยื่อแผ่น – ถังโปรยกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
16. ศิวาพร ใจยงค์. ผลจากตัวแปรจากกระบวนการดีอะเซทิลเลชันของไคตินต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไคโตแซนที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติการ<sup>0</sup>เป็นสารช่วยแตกกระจายตัวในยาเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเภสัชอุตสาหกรรม คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
17. เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์. สมบัติของพอลิเมออร์. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
18. Dupont. Nafion<sup>®</sup> fluorinated Polymer Product. U. S. A., 1998. (Mimeographed)
19. R. A. Robinson, R. H. Strokes. Electrolyte Solutions. London: Butterworths, 1959.
20. H. G. Herz, K. D. Kreuer, J. Meier, G. Scharfenberger, M. F. H. Schuster, W. H. Meyer, New Fully Polymeric Proton Solvents with High Proton Mobility, *Electrochimica Acta*, Vol. 48, 2003 :2165-2171.
21. M. Schuster, W. H. Meyer, G. Wegner, H. G. Herz, M. Ise, K. D. Kreuer, J. Meier, Proton Mobility in Oligomer-bound Proton Solvents: Imidazole Immobilization via Flexible Spacers, *Solid State Ionics*, Vol. 145, 2001:85-92.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลการทดลอง

#### 1. การทดลองหาค่าร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิลของโคโคซาน

ตารางที่ ก.1 การหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยการไทเทรตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลาย KHP 0.112 โมล/ลิตร

ครั้งที่	ปริมาตร NaOH (มล.)	ปริมาตร KHP (มล.)	ความเข้มข้น NaOH (โมล/ลิตร)
1	25.4	25	0.1105
2	25.5	25	0.1100
3	25.3	25	0.1109
4	25.5	25	0.1100
เฉลี่ย			0.1104

ตารางที่ ก.2 การไทเทรตสารละลายโคโคซานไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.110 โมล/ลิตร

ตัวอย่างที่	ปริมาตร NaOH (มล.)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	8.0	7.7	8.0	7.9
2	8.7	8.6	8.7	8.7
3	8.1	8.2	8.2	8.2
4	8.5	8.6	8.4	8.5
5	8.5	8.5	8.7	8.6
6	8.5	8.4	8.4	8.4
7	8.5	8.5	9.0	8.7
8	8.9	8.9	8.8	8.9

## 2. สมบัติของไคโตซานที่เตรียมได้

ตารางที่ ก.3 ค่าร้อยละผลได้และการกำจัดหมู่อะเซทิลของไคโตซาน

ครั้งที่	ปริมาณเปลือกกุ้ง (g)	ปริมาณไคติน (g)	ปริมาณไคโตซาน (g)	% yield เทียบกับเปลือกแห้ง	% yield เทียบกับไคติน	%การกำจัดหมู่อะเซทิล
1	100	31.39	19.46	19.46	61.99	86.20
2	50	14.78	11.08	22.16	74.97	94.35
3	100	27.39	21.82	21.82	79.66	89.04
4	50	16.33	11.70	23.40	71.65	92.58
5	100	32.50	22.50	22.50	69.23	93.29
6	100	22.43	16.41	16.41	73.16	91.87
7	50	17.04	13.57	27.14	79.64	94.35
8	50	16.08	12.16	24.32	75.62	96.47
เฉลี่ย				22.15	73.24	92.27
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.20	5.81	3.27

### 3. การทดลองหาค่าความสามารถทนต่อแรงดึง

ตารางที่ ก.4 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเยื่อแผ่น

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (มม)	ความสามารถ ทนต่อแรง ดึง(Mpa)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยง เบนมาตรฐาน
Uncrosslinked chitosan	1	0.015	91.9	88.0	4.4
	2	0.015	88.8		
	3	0.015	83.3		
2% Crosslinked chitosan	1	0.015	86.2	87.7	4.2
	2	0.015	84.6		
	3	0.015	92.5		
4% Crosslinked chitosan	1	0.015	71.8	77.8	6.0
	2	0.015	77.7		
	3	0.015	83.9		
6% Crosslinked chitosan	1	0.015	63.2	69.1	5.9
	2	0.015	75.0		
	3	0.015	69.0		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.013	54.5	58.5	3.9
	2	0.010	62.2		
	3	0.011	58.9		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.014	69.7	69.3	2.8
	2	0.013	66.3		
	3	0.015	71.8		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.014	60.6	62.5	1.7
	2	0.016	63.9		
	3	0.024	63.0		



ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (มม)	ความสามารถ ทนต่อแรง ดึง(Mpa)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยง เบนมาตร ฐาน
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.014	54.5	55.6	2.4
	2	0.013	58.4		
	3	0.012	53.9		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	0.014	90.0	85.9	5.0
	2	0.015	87.3		
	3	0.015	80.3		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	0.017	81.3	84.9	4.9
	2	0.017	83.0		
	3	0.021	90.5		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	0.017	61.6	57.3	4.8
	2	0.017	58.1		
	3	0.017	52.1		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	0.019	52.4	55.8	8.5
	2	0.018	49.5		
	3	0.017	65.5		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	0.011	58.2	64.5	6.6
	2	0.012	71.4		
	3	0.012	63.9		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	0.016	52.6	52.6	0.6
	2	0.018	53.2		
	3	0.022	52.1		

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (มม)	ความสามารถ ทนต่อแรง ดึง(Mpa)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยง เบนมาตร ฐาน
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	0.017	44.0	42.6	1.4
	2	0.017	41.3		
	3	0.020	42.6		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	0.017	37.5	37.0	1.3
	2	0.017	37.9		
	3	0.017	35.4		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	0.017	60.5	60.8	2.3
	2	0.011	63.2		
	3	0.012	58.7		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	0.013	59.4	60.3	0.9
	2	0.023	60.3		
	3	0.023	61.2		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	0.014	58.8	58.3	1.4
	2	0.020	56.8		
	3	0.016	59.4		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	0.020	49.8	49.6	0.7
	2	0.016	50.2		
	3	0.016	48.8		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.015	64.2	64.9	1.7
	2	0.016	63.7		
	3	0.013	66.8		

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (มม)	ความสามารถ ทนต่อแรง ดึง(Mpa)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยง เบนมาตร ฐาน
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.016	87.1	83.0	6.3
	2	0.016	86.2		
	3	0.015	75.7		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.016	87.7	88.6	0.8
	2	0.016	89.1		
	3	0.015	89.0		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.026	63.3	63.4	0.2
	2	0.017	63.2		
	3	0.021	63.5		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.018	52.6	52.1	1.4
	2	0.018	53.2		
	3	0.014	50.5		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.014	79.5	78.7	4.0
	2	0.018	74.4		
	3	0.021	82.3		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.016	85.6	86.7	1.2
	2	0.016	87.9		
	3	0.021	86.5		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.018	60.2	59.0	1.2
	2	0.019	58.8		
	3	0.018	57.9		

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (มม)	ความสามารถ ทนต่อแรง ดึง(Mpa)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยง เบนมาตร ฐาน
chitosan + LiOAc 50%	1	0.022	78.0	78.7	1.9
	2	0.017	80.9		
	3	0.017	77.3		
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	1	0.024	96.7	82.6	14.6
	2	0.018	67.7		
	3	0.018	83.5		
4% Crosslinked chitosan + LiOAc50%	1	0.018	81.2	78.2	7.8
	2	0.014	84.1		
	3	0.017	69.4		
chitosan + LiOAc 100%	1	0.018	65.2	61.8	3.3
	2	0.015	58.6		
	3	0.014	61.7		
2% Crosslinked chitosan + LiOAc100%	1	0.017	73.6	70.5	7.7
	2	0.017	76.3		
	3	0.017	61.7		
4% Crosslinked chitosan + LiOAc100%	1	0.016	86.6	86.3	1.2
	2	0.017	87.4		
	3	0.015	85.0		

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (มม)	ความสามารถ ทนต่อแรง ดึง(Mpa)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยง เบนมาตร ฐาน
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.015	67.6	70.8	3.7
	2	0.015	69.9		
	3	0.015	74.8		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% +EC	1	0.017	39.0	37.6	2.0
	2	0.017	38.5		
	3	0.017	35.4		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% +EC	1	0.017	29.2	31.1	1.7
	2	0.017	31.8		
	3	0.017	32.4		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.017	23.8	30.5	5.8
	2	0.017	34.0		
	3	0.019	33.6		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	0.019	59.9	61.5	1.6
	2	0.019	63.2		
	3	0.019	61.6		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	0.020	61.6	54.8	6.9
	2	0.021	55.0		
	3	0.020	47.8		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	0.020	49.7	47.1	4.3
	2	0.020	49.5		
	3	0.020	42.1		

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่าง ที่	ความ หนา (มม)	ความสามารถ ทนต่อแรง ดึง(Mpa)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยง เบนมาตร ฐาน
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	0.020	52.9	46.6	5.5
	2	0.020	42.6		
	3	0.020	44.3		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% +EC	1	0.020	68.2	66.1	4.5
	2	0.020	60.9		
	3	0.020	69.3		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	0.023	62.4	57.6	5.0
	2	0.022	58.0		
	3	0.027	52.3		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	0.020	37.9	36.2	2.9
	2	0.020	32.8		
	3	0.020	37.8		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	0.020	41.2	36.8	3.9
	2	0.020	34.7		
	3	0.020	34.4		

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4. การทดลองหาค่าร้อยละการบวมตัว

ตารางที่ ก.5 น้ำหนักของเยื่อแผ่นขณะแห้งและเปียก

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
Uncrosslinked chitosan	1	0.0160	0.0388
	2	0.0150	0.0359
	3	0.0185	0.0443
2% Crosslinked chitosan	1	0.0104	0.0238
	2	0.0122	0.0285
	3	0.0134	0.0312
4% Crosslinked chitosan	1	0.0327	0.0642
	2	0.0519	0.1006
	3	0.0554	0.1054
6% Crosslinked chitosan	1	0.0331	0.0594
	2	0.0372	0.0647
	3	0.0341	0.0601
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.0205	0.0418
	2	0.0216	0.0432
	3	0.0224	0.0451
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.0356	0.0637
	2	0.0133	0.0239
	3	0.0243	0.0435
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.0181	0.0291
	2	0.0170	0.0280
	3	0.0195	0.0320

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.0210	0.0332
	2	0.0211	0.0345
	3	0.0241	0.0387
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	0.0288	0.0560
	2	0.0235	0.0434
	3	0.0246	0.0465
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	0.0270	0.0464
	2	0.0218	0.0382
	3	0.0204	0.0354
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	0.0251	0.0419
	2	0.0221	0.0382
	3	0.0263	0.0446
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	0.0189	0.0329
	2	0.0198	0.0326
	3	0.0217	0.0354
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	0.0368	0.0716
	2	0.0210	0.0403
	3	0.0250	0.0476
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	0.0271	0.0461
	2	0.0289	0.0512
	3	0.0265	0.0458



ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	0.0160	0.0270
	2	0.0240	0.0420
	3	0.0230	0.0390
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	0.0185	0.0315
	2	0.0194	0.0342
	3	0.0213	0.0358
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	0.0188	0.0343
	2	0.0255	0.0461
	3	0.0247	0.0443
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	0.0154	0.0261
	2	0.0161	0.0285
	3	0.0186	0.0321
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	0.0146	0.0245
	2	0.0130	0.0221
	3	0.0164	0.0278
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	0.0229	0.0382
	2	0.0230	0.0398
	3	0.0241	0.0407
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.0284	0.0486
	2	0.0188	0.0327
	3	0.0213	0.0378

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.0234	0.0385
	2	0.0216	0.0346
	3	0.0207	0.0338
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.0207	0.0334
	2	0.0181	0.0303
	3	0.0191	0.0313
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.0193	0.0316
	2	0.0254	0.0403
	3	0.0227	0.0364
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.0298	0.0536
	2	0.0405	0.0739
	3	0.0346	0.0628
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.0290	0.0512
	2	0.0309	0.0536
	3	0.0312	0.0556
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.0221	0.0383
	2	0.0237	0.0405
	3	0.0246	0.0426
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.0258	0.0443
	2	0.0230	0.0386
	3	0.0243	0.0408

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
chitosan + LiOAc 50%	1	0.0160	0.028
	2	0.0200	0.036
	3	0.0200	0.036
2% Crosslinked chitosan + LOAc 50%	1	0.0210	0.035
	2	0.0160	0.028
	3	0.0200	0.034
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	1	0.0180	0.029
	2	0.0200	0.033
	3	0.0190	0.031
chitosan + LiOAc 100%	1	0.0240	0.047
	2	0.0180	0.035
	3	0.0180	0.036
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	1	0.0230	0.042
	2	0.0240	0.048
	3	0.0240	0.045
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	1	0.0230	0.037
	2	0.0220	0.036
	3	0.0210	0.034

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.0472	0.0964
	2	0.0314	0.0594
	3	0.0453	0.0892
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.0285	0.0525
	2	0.0225	0.0429
	3	0.0237	0.0443
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.0387	0.0676
	2	0.0380	0.0645
	3	0.0364	0.0625
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.0402	0.0688
	2	0.0380	0.0631
	3	0.0426	0.0721
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	0.0150	0.0284
	2	0.0290	0.0563
	3	0.0260	0.0510
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	0.0387	0.0695
	2	0.0485	0.0843
	3	0.0421	0.0752
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	0.0191	0.0329
	2	0.0302	0.0542
	3	0.0263	0.0456

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	0.0239	0.0404
	2	0.0260	0.0444
	3	0.0243	0.0428
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	0.0385	0.0720
	2	0.0320	0.0610
	3	0.0363	0.0685
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	0.0238	0.0413
	2	0.0230	0.0402
	3	0.0204	0.0368
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	0.0387	0.0661
	2	0.0320	0.0553
	3	0.0338	0.0596
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	0.0173	0.0293
	2	0.0161	0.0274
	3	0.0186	0.0314

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 ร้อยละการบวมตัว

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	ร้อยละการบวมตัว	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Uncrosslinked chitosan	1	142.5	140.4	1.8
	2	139.3		
	3	139.5		
2% Crosslinked chitosan	1	128.8	132.0	2.9
	2	134.4		
	3	132.8		
4% Crosslinked chitosan	1	96.3	93.5	3.1
	2	93.8		
	3	90.3		
6% Crosslinked chitosan	1	79.5	76.5	2.8
	2	73.9		
	3	76.2		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	103.9	101.7	2.0
	2	100.0		
	3	101.3		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	78.9	79.2	0.4
	2	79.7		
	3	79.0		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	60.8	63.2	2.1
	2	64.7		
	3	64.1		

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	ร้อยละการบวมตัว	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	58.1	60.7	2.7
	2	63.5		
	3	60.6		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	94.4	89.4	4.9
	2	84.7		
	3	89.0		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	71.9	73.5	1.7
	2	75.2		
	3	73.5		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	66.9	69.8	3.0
	2	72.9		
	3	69.6		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	74.1	67.3	5.9
	2	64.6		
	3	63.1		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	94.6	92.3	2.1
	2	91.9		
	3	90.4		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	70.1	73.4	3.6
	2	77.2		
	3	72.8		

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	ร้อยละ การบวมตัว	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	68.8	71.1	3.4
	2	75.0		
	3	69.6		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1	70.3	71.5	4.3
	2	76.3		
	3	68.1		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	82.4	80.9	1.5
	2	80.8		
	3	79.4		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	69.5	73.0	3.8
	2	77.0		
	3	72.6		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	67.8	69.1	1.2
	2	70.0		
	3	69.5		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	66.8	69.6	3.2
	2	73.0		
	3	68.9		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	71.1	74.2	3.2
	2	73.9		
	3	77.5		



ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	ร้อยละ การบวมตัว	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	64.5	62.7	2.2
	2	60.2		
	3	63.3		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	61.4	64.2	3.0
	2	67.4		
	3	63.9		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	63.7	60.9	2.6
	2	58.7		
	3	60.4		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	79.9	81.3	1.3
	2	82.5		
	3	81.5		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	76.6	76.1	2.4
	2	73.5		
	3	78.2		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	73.3	72.5	1.4
	2	70.9		
	3	73.2		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	71.7	69.1	2.2
	2	67.8		
	3	67.9		

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	ร้อยละ การบวมตัว	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
chitosan + LiOAc 50%	1	100.0	104.4	19.1
	2	108.9		
	3	136.6		
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	1	92.1	99.2	12.3
	2	92.1		
	3	113.3		
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	1	83.1	79.5	3.2
	2	78.9		
	3	76.7		
chitosan + LiOAc 100%	1	107.7	109.6	3.6
	2	113.7		
	3	107.4		
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	1	81.9	83.8	1.0
	2	83.3		
	3	86.1		
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	1	74.0	76.4	2.6
	2	79.2		
	3	76.0		

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	ร้อยละการบวมตัว	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	104.2	96.8	7.5
	2	89.2		
	3	96.9		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	84.2	87.3	3.2
	2	90.7		
	3	86.9		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	74.7	72.0	2.5
	2	69.7		
	3	71.7		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	71.1	68.8	2.6
	2	66.1		
	3	69.2		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	89.3	93.2	3.5
	2	94.1		
	3	96.2		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	79.6	77.3	3.1
	2	73.8		
	3	78.6		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	72.3	75.0	3.9
	2	79.5		
	3	73.4		

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	ร้อยละการบวมตัว	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	69.0	72.0	3.7
	2	70.8		
	3	76.1		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	87.0	88.8	1.8
	2	90.6		
	3	88.7		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	73.5	76.2	3.7
	2	74.8		
	3	80.4		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	70.8	73.3	2.8
	2	72.8		
	3	76.3		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	1	69.4	69.5	0.7
	2	70.2		
	3	68.8		

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5. ค่าการแลกเปลี่ยนไอออน

ตารางที่ ก.7 น้ำหนักแห้งของเยื่อแผ่นที่นำมาหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดของเยื่อแผ่น	น้ำหนักแห้ง (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
Uncrosslinked chitosan	0.0200	0.0197	0.0195
2% Crosslinked chitosan	0.0201	0.0200	0.0201
4% Crosslinked chitosan	0.0197	0.0197	0.0197
6% Crosslinked chitosan	0.0195	0.0195	0.0195
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	0.0193	0.0209	0.0200
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	0.0193	0.0196	0.0208
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	0.0211	0.0201	0.0202
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	0.0191	0.0204	0.0204
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	0.0196	0.0217	0.0193
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	0.0198	0.0204	0.0198
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	0.0200	0.0200	0.0207
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	0.0203	0.0198	0.0185
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	0.0196	0.0196	0.0201
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	0.0207	0.0207	0.0200
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	0.0190	0.0190	0.0192
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	0.0200	0.0193	0.0194
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	0.0197	0.0193	0.0199
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	0.0212	0.0195	0.0199
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	0.0199	0.0193	0.0195
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	0.0194	0.0191	0.0189

ตารางที่ ก.7 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	น้ำหนักแห้ง (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.0197	0.0200	0.0200
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.0200	0.0200	0.0195
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.0198	0.0200	0.0196
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.0204	0.0201	0.0198
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	0.0197	0.0200	0.0200
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	0.0204	0.0198	0.0205
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	0.0196	0.0198	0.0205
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	0.0198	0.0198	0.0198
chitosan + LiOAc 50%	0.021	0.0213	0.0204
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	0.0207	0.0228	0.0215
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	0.0197	0.0226	0.0195
chitosan + LiOAc 100%	0.0255	0.0194	0.0212
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	0.0204	0.0218	0.0216
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	0.0202	0.0204	0.0217
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	0.0198	0.0198	0.0198
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	0.0197	0.0200	0.0200
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	0.0200	0.0200	0.0200
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	0.0204	0.0200	0.0200
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	0.0200	0.0198	0.0198
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	0.0205	0.0203	0.0204
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	0.0196	0.0194	0.0190

ตารางที่ ก.7 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	น้ำหนักแห้ง (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	0.0196	0.0196	0.0196
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	0.0200	0.0198	0.0201
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	0.0204	0.0198	0.0198
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	0.0204	0.0198	0.0198
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	0.0204	0.0198	0.0198

ตารางที่ ก.8 ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.005 นอร์มอล ที่ใช้ในการไทเทรตกับ  
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.005 นอร์มอล เพื่อหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดของเยื่อแผ่น	ปริมาตร HCl (มล)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
Uncrosslinked chitosan	6.00	6.10	6.05
2% Crosslinked chitosan	1.55	2.20	1.45
4% Crosslinked chitosan	1.70	1.80	1.80
6% Crosslinked chitosan	0.85	1.15	1.35
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	6.00	6.00	6.00
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1.70	1.60	1.00
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1.20	0.70	0.85
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1.25	1.00	0.85
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	6.15	5.70	6.05
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1.75	1.15	1.10

ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ปริมาณ HCl		
	(มล)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	0.95	1.10	1.20
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	0.70	0.65	0.55
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	5.55	5.45	5.65
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1.05	0.95	1.20
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1.60	1.45	1.50
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	1.00	1.20	1.30
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	5.40	5.60	5.50
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1.20	0.95	1.30
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1.10	1.35	1.20
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1.15	1.25	0.90
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	4.85	5.50	6.00
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.80	0.70	0.75
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.75	0.80	0.65
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.55	0.60	0.45
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	4.85	5.75	4.40
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	0.65	0.90	0.50
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	0.60	0.65	0.90
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	0.35	0.30	0.30
chitosan + LiOAc 50%	4.40	4.40	3.60
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	1.10	1.65	1.10
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	0.70	0.60	0.85



ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ปริมาณ HCl (มล)		
	ตัวอย่างที่	ตัวอย่างที่	ตัวอย่างที่
	1	2	3
chitosan + LiOAc 100%	2.65	4.50	3.95
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	1.25	1.35	1.30
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	1.30	1.05	1.20
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	5.75	6.00	6.35
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1.05	1.05	1.20
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	0.75	0.80	0.80
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	0.35	0.35	0.30
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	4.75	4.80	4.80
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	0.95	0.95	0.95
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	0.85	0.70	0.60
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	0.55	0.55	0.45
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	4.60	4.20	4.45
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	0.65	0.55	0.55
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	0.60	0.55	0.50
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	0.30	0.30	0.30

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่น

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (meq/g)				ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	
Uncrosslinked chitosan	2.50	2.47	2.53	2.50	0.03
2% Crosslinked chitosan	5.25	4.88	5.32	5.15	0.24
4% Crosslinked chitosan	5.27	5.20	5.20	5.22	0.04
6% Crosslinked chitosan	5.87	5.62	5.49	5.66	0.19
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	2.59	2.39	2.5	2.49	0.10
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	5.38	5.36	5.41	5.38	0.03
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	5.21	5.78	5.66	5.55	0.30
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	5.73	5.51	5.61	5.62	0.11
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	2.46	2.48	2.57	2.50	0.06
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	5.21	5.42	5.62	5.42	0.21
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	5.66	5.56	5.31	5.51	0.18
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	5.73	5.90	6.39	6.01	0.34
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	2.84	2.93	2.71	2.83	0.11
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	5.40	5.46	5.50	5.45	0.05
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	5.53	5.63	5.53	5.56	0.06
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 20%	5.63	5.70	5.61	5.65	0.05
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	2.92	2.85	2.83	2.87	0.05
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	5.19	5.79	5.46	5.48	0.30
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	5.59	5.60	5.64	5.61	0.03
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	5.70	5.73	6.02	5.82	0.18

ตารางที่ ก.9 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถ ในการแลกเปลี่ยนไอออน (meq/g)				ส่วนเบี่ยง เบนมาตรฐาน ฐาน
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย	
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	3.27	2.98	2.38	2.88	0.45
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	5.75	5.81	5.93	5.83	0.09
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	5.84	5.75	5.96	5.85	0.11
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	5.79	5.85	6.03	5.89	0.12
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	3.27	2.66	3.5	3.14	0.43
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	5.73	5.74	5.79	5.75	0.03
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	5.99	5.9	5.55	5.81	0.23
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	6.09	6.12	6.12	6.11	0.02
chitosan + LiOAc 50%	3.33	3.29	3.92	3.51	0.35
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	5.37	4.58	5.17	5.04	0.41
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	5.90	5.19	5.87	5.65	0.40
chitosan + LiOAc 100%	3.60	3.54	3.57	3.57	0.03
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	5.36	4.95	5.03	5.11	0.22
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	5.38	5.48	5.06	5.31	0.22
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	2.68	2.53	2.30	2.50	0.19
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	5.68	5.59	5.50	5.59	0.09
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	5.78	5.75	5.75	5.76	0.02
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	5.91	6.03	6.06	6.00	0.08
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	3.28	3.28	3.28	3.28	0.00
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	5.52	5.57	5.55	5.55	0.03
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	5.84	5.99	6.18	6.00	0.17

ตารางที่ ก.9 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความสามารถ ในการแลกเปลี่ยนไอออน (meq/g)				ส่วนเบี่ยง เบนมาตรฐาน ฐาน
	ตัวอย่าง ที่ 1	ตัวอย่าง ที่ 2	ตัวอย่าง ที่ 3	เฉลี่ย	
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	6.03	6.03	6.09	6.05	0.03
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	3.38	3.66	3.45	3.50	0.15
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	5.73	5.97	5.97	5.89	0.14
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	5.76	5.97	6.00	5.91	0.13
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	5.94	6.12	6.12	6.06	0.10

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

ตารางที่ ก.10 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

ชนิดของเยื่อแผ่น	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
Uncrosslinked chitosan	49.71
2% Crosslinked chitosan	45.50
4% Crosslinked chitosan	50.04
6% Crosslinked chitosan	50.82
chitosan + $\text{LiNO}_3$ 5%	46.29
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 5%	59.69
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 5%	60.88
6% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 5%	49.14
chitosan + $\text{LiNO}_3$ 10%	46.23
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 10%	46.81
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 10%	46.60
6% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 10%	46.25
chitosan + $\text{LiNO}_3$ 20%	49.43
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 20%	46.97
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 20%	44.32
6% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 20%	47.83
chitosan + $\text{LiNO}_3$ 40%	48.69
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 40%	52.52
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 40%	51.71
6% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 40%	44.03
chitosan + $\text{LiNO}_3$ 50%	53.20
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 50%	50.86
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 50%	51.87

ตารางที่ ก.10 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	T <sub>g</sub> (°C)
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	50.76
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	66.80
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	62.34
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	57.33
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	55.85
chitosan + LiOAc 50%	55.97
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	54.51
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	54.99
chitosan + LiOAc 100%	55.94
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	58.09
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	56.79
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	53.10
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	52.16
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	52.45
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	51.80
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	53.31
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	54.02
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	45.48
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	51.86
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	54.38
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	50.09
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	53.10
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100% + EC	53.97

## 7. ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

ตารางที่ ก.11 ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่าง ที่	อัตรา ไหล (Sccs)	ความ หนา (มม)	P ( $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}$ / $(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$ )	P (Barrer)	เฉลี่ย	ส่วน เบี่ยง เบน มาตรฐาน
Uncrosslinked chitosan	1	0.0075	0.0014	1.27E-08	126.5	137.0	14.8
	2	0.0080	0.0016	1.48E-08	147.5		
2% Crosslinked chitosan	1	0.0097	0.0016	1.82E-08	182.0	191.7	13.7
	2	0.0093	0.0018	2.01E-08	201.4		
4% Crosslinked chitosan	1	0.0077	0.0015	1.35E-08	135.4	128.1	10.3
	2	0.0073	0.0014	1.21E-08	120.8		
6% Crosslinked chitosan	1	0.0057	0.0018	1.20E-08	120.1	127.1	10.0
	2	0.0063	0.0018	1.34E-08	134.2		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.0120	0.0020	2.82E-08	282.5	302.4	28.1
	2	0.0128	0.0021	3.22E-08	322.2		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.0085	0.0028	2.77E-08	276.8	292.5	22.2
	2	0.0103	0.0025	3.08E-08	308.1		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.0045	0.0022	1.17E-08	116.5	131.5	21.2
	2	0.0053	0.0023	1.46E-08	146.5		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 5%	1	0.0105	0.0023	2.80E-08	280.1	276.0	5.8
	2	0.0110	0.0021	2.72E-08	271.9		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	1	0.0070	0.0029	2.36E-08	236.2	240.4	6.0
	2	0.0072	0.0029	2.45E-08	244.6		

ตารางที่ ก.11 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	อัตราไหล (Sccs)	ความหนา (มม)	P ( $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$ )	P (Barrer)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 10%	1	0.0095	0.0020	2.24E-08	223.6	216.2	10.5
	2	0.0093	0.0019	2.09E-08	208.7		
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 10%	1	0.0098	0.0015	1.77E-08	177.5	180.5	4.4
	2	0.0090	0.0017	1.84E-08	183.6		
6% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 10%	1	0.0065	0.0021	1.63E-08	163.2	170.9	10.9
	2	0.0070	0.0022	1.79E-08	178.5		
chitosan + $\text{LiNO}_3$ 20%	1	0.0068	0.0023	1.85E-08	185.0	182.5	3.5
	2	0.0090	0.0017	1.80E-08	180.1		
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 20%	1	0.0095	0.0020	2.20E-08	219.9	224.5	6.5
	2	0.0080	0.0024	2.29E-08	229.1		
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 20%	1	0.0045	0.0025	1.31E-08	130.7	127.1	5.0
	2	0.0050	0.0021	1.24E-08	123.6		
6% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 20%	1	0.0075	0.0018	1.62E-08	161.8	171.0	12.9
	2	0.0085	0.0018	1.80E-08	180.1		
chitosan + $\text{LiNO}_3$ 40%	1	0.0072	0.0022	1.86E-08	185.6	200.5	21.1
	2	0.0090	0.0020	2.15E-08	215.4		
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 40%	1	0.0063	0.0022	1.62E-08	161.5	159.8	2.4
	2	0.0065	0.0021	1.58E-08	158.1		
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 40%	1	0.0087	0.0017	1.70E-08	170.0	166.1	5.6
	2	0.0062	0.0022	1.62E-08	162.1		



ตารางที่ ก.11 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	อัตราไหล (Sccs)	ความหนา (มม)	P ( $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$ )	P (Barrer)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	1	0.0098	0.0024	2.78E-08	277.8	260.7	24.1
	2	0.0090	0.0023	2.44E-08	243.6		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.0080	0.0019	1.76E-08	175.8	170.6	7.3
	2	0.0077	0.0018	1.65E-08	165.4		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.0082	0.0019	1.79E-08	179.4	181.5	3.0
	2	0.0087	0.0018	1.84E-08	183.6		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.0068	0.0021	1.72E-08	171.6	181.4	13.9
	2	0.0075	0.0022	1.91E-08	191.3		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	1	0.0077	0.0023	2.05E-08	204.5	201.1	4.8
	2	0.0080	0.0021	1.98E-08	197.7		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.0058	0.0018	1.21E-08	121.3	129.6	11.7
	2	0.0062	0.0019	1.38E-08	137.9		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.0063	0.0019	1.39E-08	139.2	143.7	6.5
	2	0.0070	0.0018	1.48E-08	148.3		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.0092	0.0023	2.52E-08	251.7	256.7	7.0
	2	0.0097	0.0023	2.62E-08	261.7		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	1	0.0053	0.0022	1.38E-08	138.1	137.9	0.2
	2	0.0082	0.0014	1.38E-08	137.8		
chitosan + LiOAc 50%	1	0.0088	0.0016	1.66E-08	166.4	156.0	14.6
	2	0.0075	0.0017	1.46E-08	145.7		

ตารางที่ ก.11 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	อัตราไหล (Sccs)	ความหนา (มม)	P ( $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$ )	P (Barrer)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	1	0.0070	0.0017	1.38E-08	137.6	136.5	1.6
	2	0.0050	0.0023	1.35E-08	135.4		
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 50%	1	0.0052	0.0027	1.64E-08	164.2	172.1	11.2
	2	0.0057	0.0027	1.80E-08	180.1		
chitosan + LiOAc 100%	1	0.0100	0.00157	1.85E-08	184.8	196.7	16.8
	2	0.0082	0.00217	2.09E-08	208.6		
2% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	1	0.0093	0.0020	2.14E-08	214.2	215.4	1.7
	2	0.0080	0.0023	2.17E-08	216.6		
4% Crosslinked chitosan + LiOAc 100%	1	0.0112	0.0027	3.55E-08	354.9	363.6	12.4
	2	0.0122	0.0026	3.72E-08	372.3		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.0065	0.0015	1.17E-08	117.3	122.7	7.7
	2	0.0047	0.0023	1.28E-08	128.2		
2% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.0047	0.0021	1.17E-08	117.2	120.4	4.5
	2	0.0045	0.0023	1.24E-08	123.6		
4% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.0095	0.0024	2.68E-08	268.4	273.3	7.0
	2	0.0093	0.0025	2.78E-08	278.3		
6% Crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10% + EC	1	0.0127	0.0024	3.58E-08	357.8	360.0	3.1
	2	0.0130	0.0024	3.62E-08	362.1		
chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	1	0.0088	0.0015	1.52E-08	152.5	163.8	16.0
	2	0.0078	0.0019	1.75E-08	175.2		

ตารางที่ ก.11 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ตัวอย่างที่	อัตราไหล (Sccs)	ความหนา (มม)	P ( $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$ )	P (Barrer)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 50% + EC	1	0.0105	0.0023	2.88E-8	288.4	306.3	25.3
	2	0.0093	0.0025	2.75E-8	274.6		
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 50% + EC	1	0.0080	0.0021	2.01E-8	200.9	210.9	14.2
	2	0.0087	0.0022	2.21E-8	221.0		
6% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 50% + EC	1	0.0103	0.0021	2.51E-8	251.4	246.8	6.4
	2	0.0095	0.0022	2.42E-8	242.3		
chitosan + $\text{LiNO}_3$ 100% + EC	1	0.0093	0.0020	2.20E-8	219.7	242.6	32.4
	2	0.0097	0.0023	2.65E-8	265.5		
2% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 100% + EC	1	0.0100	0.0020	2.35E-8	235.4	221.1	20.3
	2	0.0103	0.0017	2.07E-8	206.8		
4% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 100% + EC	1	0.0092	0.0028	3.02E-8	302.1	318.3	22.9
	2	0.0092	0.0031	3.34E-8	334.5		
6% Crosslinked chitosan + $\text{LiNO}_3$ 100% + EC	1	0.0103	0.0023	2.84E-8	283.8	286.4	3.7
	2	0.0087	0.0028	2.89E-8	289.0		

### 8. ค่าการนำโปรตอน

ตารางที่ ก.12 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่เชื่อมขวาง

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความหนาเยื่อแผ่น (cm)	ความต้านทาน (ohm)	ค่าการนำโปรตอน (S/cm)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
uncrosslinked chitosan	0.0018	164,000	0.00169	0.00184	0.00047
	0.0019	180,000	0.00146		
	0.0019	111,000	0.00237		
2% Crosslinked chitosan	0.0016	13,000	0.02404	0.02401	0.00032
	0.0017	12,100	0.02431		
	0.0016	13,200	0.02367		
4% Crosslinked chitosan	0.0017	10,100	0.02912	0.02707	0.00206
	0.0016	12,500	0.02500		
	0.0015	12,300	0.02710		
6% Crosslinked chitosan	0.0019	9,250	0.02845	0.02854	0.00013
	0.0020	8,730	0.02864		

ตารางที่ ก.13 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิต

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความหนาเยื่อแผ่น (cm)	ความต้านทาน (ohm)	ค่าการนำโปรตอน (S/cm)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
uncrosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 10%	0.0019	149,000	0.00177	0.00199	0.00031
	0.0017	133,000	0.00221		
uncrosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 40%	0.0019	121,000	0.00217	0.00251	0.00048
	0.0020	87,600	0.00285		
Uncrosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.0017	55,500	0.00530	0.00568	0.00053
	0.0018	45,900	0.00605		
Uncrosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 100%	0.0018	54,355	0.00511	0.00512	0.00001
	0.0019	51,398	0.00512		

ตารางที่ ก.14 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง (LiNO<sub>3</sub>) และเติมสารพลาสติไซเซอร์

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความหนาเยื่อแผ่น (cm)	ความต้านทาน (ohm)	ค่าการนำโปรตอน (S/cm)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
4% crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.0020	7,130	0.03506	0.03113	0.00398
	0.0019	8,430	0.03122		
	0.0019	9,710	0.02710		
4%crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	0.0016	8,980	0.03480	0.03572	0.00104
	0.0016	8,480	0.03685		
	0.0017	8,280	0.03552		

ตารางที่ ก.15 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นไคโตซานคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง (LiOAc)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความหนาเยื่อแผ่น (cm)	ความต้านทาน (ohm)	ค่าการนำโปรตอน (S/cm)
Uncrosslinked chitosan + LiOAc 50%	0.0027	34,500	0.00538
4% crosslinked chitosan + LiOAc 50%	0.0024	29,200	0.00714
Uncrosslinked chitosan + LiOAc100%	0.0016	359,097	0.00087
4% crosslinked chitosan + LiOAc100%	0.0029	4,187	0.04118

ตารางที่ ก.16 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่ได้อุปด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความหนาเยื่อแผ่น (cm)	ความต้านทาน (ohm)	ค่าการนำโปรตอน (S/cm)	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2% crosslinked	0.0024	4,760	0.04377	0.04360	0.00140
	0.0023	4,840	0.04492		
	0.0023	5,160	0.04213		
4% crosslinked	0.0022	3,440	0.06607	0.05760	0.00808
	0.0023	3,830	0.05676		
	0.0023	4,350	0.04998		
4% crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	0.0023	3,250	0.06689	0.06641	0.00111
	0.0024	3,100	0.06720		
	0.0025	3,070	0.06515		
4% crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	0.0022	3,680	0.06176	0.06189	0.00243
	0.0021	4,000	0.05952		
	0.0022	3,530	0.06438		

ตารางที่ ก.17 ค่าการนำโปรตอนที่ความชื้นต่างๆ

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความชื้น (%)	ความหนา เยื่อแผ่น (cm)	ความต้านทาน (ohm)	ค่าการนำโปรตอน (S/cm)
uncrosslinked chitosan	96	0.0019	476,000	0.0006
	98	0.0019	202,000	0.0013
	100	0.0019	111,000	0.0024
2% Crosslinked chitosan	96	0.0016	64,600	0.0048
	98	0.0016	25,300	0.0124
	100	0.0016	13,200	0.0237
4% Crosslinked chitosan	90	0.0015	462,000	0.0007
	92	0.0015	225,000	0.0015
	94	0.0015	70,800	0.0047
	98	0.0015	24,200	0.0138
	100	0.0015	12,300	0.0271
4% crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50%	90	0.0019	377,000	0.0007
	92	0.0019	201,000	0.0013
	94	0.0019	135,000	0.0019
	98	0.0019	11,100	0.0237
	100	0.0019	9,710	0.0271
4% crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% + EC	92	0.0017	46,800	0.0063
	94	0.0017	28,100	0.0105
	98	0.0017	9,190	0.0320
	100	0.0017	8,280	0.0355

ตารางที่ ก.17 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความชื้น (%)	ความหนา เยื่อแผ่น (cm)	ความต้านทาน (ohm)	ค่าการนำ โพรตอน (S/cm)
2% Crosslinked chitosan (dope)	90	0.0023	1,880,000	0.0001
	92	0.0023	1,130,000	0.0002
	94	0.0023	430,000	0.0005
	96	0.0023	128,000	0.0017
	98	0.0023	15,400	0.0141
	100	0.0023	5,160	0.0421
4% Crosslinked chitosan (dope)	75	0.0023	338,817	0.0006
	80	0.0023	319,892	0.0007
	85	0.0023	130,161	0.0017
	90	0.0023	26,238	0.0083
	92	0.0023	16,828	0.0129
	94	0.0023	22,634	0.0096
	96	0.0023	16,828	0.0129
	98	0.0023	7,957	0.0273
4% crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% (dope)	80	0.0025	331,754	0.0006
	85	0.0025	274,312	0.0007
	90	0.0025	94,005	0.0021
	96	0.0025	18,000	0.0111
	98	0.0025	8,697	0.0230
	100	0.0025	3,066	0.0652



ตารางที่ ก.17 (ต่อ)

ชนิดของเยื่อแผ่น	ความชื้น (%)	ความหนา เยื่อแผ่น (cm)	ความต้านทาน (ohm)	ค่าการนำ โพรตอน (S/cm)
4% crosslinked chitosan + LiNO <sub>3</sub> 50% (dope)	75	0.0022	316,000	0.0007
	80	0.0022	228,000	0.0010
	85	0.0022	253,000	0.0009
	90	0.0022	268,000	0.0009
	92	0.0022	110,000	0.0021
	94	0.0022	50,400	0.0045
	96	0.0022	22,800	0.0100
	98	0.0022	5,860	0.0388
	100	0.0022	3,530	0.0644

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### 1. ร้อยละการกำจัดหมู่อะเซทิล

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างที่ 1

น้ำหนักของไคโตซานไฮดรอกไซด์	=	1	กรัม
ปริมาตรสารละลายไคโตซานไฮโดรคลอไรด์	=	250	มิลลิลิตร
ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.110 นอร์มอล	=	7.90	มิลลิลิตร
ไคโตซานไฮโดรคลอไรด์ 1 โมล	=	NaOH 1 โมล	
มอนอเมอร์ที่มีหมู่ $\text{-NHCOCH}_3$ 1 โมล	=	203.19296	กรัม

$$\begin{aligned} \text{The amount of monomer having } \text{-NH}_2 \text{ group} &= \frac{5 \times [\text{NaOH}] \times V_{\text{NaOH}}}{1000} \\ &= \frac{5 \times 0.110 \times 7.90}{1000} = 0.004345 \text{ โมล} \\ &= 0.004345 \times 197.61672 = 0.858645 \\ &\text{กรัม} \end{aligned}$$

The amount monomer having  $\text{-NHCOCH}_3$  group =

The weight of sample - The amount of monomer having  $\text{-NH}_2$  group

$$\begin{aligned} &\frac{203.19296}{203.19296} \\ &= \frac{1 - 0.858645}{203.19296} = 0.000696 \text{ โมล} \end{aligned}$$

The degree of deacetylation =  $\frac{\text{The amount of monomer having } \text{-NH}_2 \text{ group} \times 100}{\text{The total amount of monomer}}$

The amount monomer =  $0.004345 + 0.000696 = 0.005041$  โมล

The degree of deacetylation =  $\frac{0.004345 \times 100}{0.005041} = 86.20$  เปอร์เซ็นต์

## 2. ร้อยละการบวมตัว

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.5 และตารางที่ ก.6 เยื่อแผ่นโคโตะซานที่ไม่เชื่อมขวาง ของตัวอย่างที่ 1

น้ำหนักเยื่อแผ่นแห้ง	=	0.0160	กรัม
น้ำหนักเยื่อแผ่นเปียก	=	0.0388	กรัม

$$\begin{aligned} \% \text{Swelling} &= \frac{(\text{Weight}_{\text{wet}} - \text{Weight}_{\text{dry}})}{\text{Weight}_{\text{dry}}} \times 100 \\ &= \frac{(0.0388 - 0.0160) \times 100}{0.0160} = 142.5 \end{aligned}$$

## 3. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.8 และ ตารางที่ ก.9 เยื่อแผ่นโคโตะซานที่ไม่เชื่อมขวาง ของตัวอย่างที่ 1

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	0.005	นอร์มอล
ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	=	0.005	นอร์มอล
ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	=	25	มิลลิลิตร
ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	=	6.0	มิลลิลิตร
ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ดูต่อมาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	=	10	มิลลิลิตร
น้ำหนักของเยื่อแผ่น	=	0.02	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)

$V_3$  = ปริมาตรของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่ดูต่อมาไทเทรตกับ  
 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)  
 $m$  = น้ำหนักของเยื่อแผ่น (กรัม)

$$\text{Ion exchange capacity} = \frac{\left(0.005(25) - \left(\frac{25}{10}\right) \times 0.005(6.0)\right)}{0.02} = 2.50 \text{ meq/g}$$

#### 4. ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.12 เยื่อแผ่นไคโตซานที่ไม่เชื่อมขวาง  
 ของตัวอย่างที่ 1

อัตราการไหลผ่านเยื่อ	=	0.0075	Sccs
ความดันต่าง	=	105.6	cmHg
ความหนาของเยื่อแผ่น	=	0.0014	cm
พื้นที่ของเยื่อแผ่น	=	8.0457	cm <sup>2</sup>

$$P = \frac{QL}{\Delta PA}$$

$P$  = ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน (cm<sup>3</sup>(STP)\*cm)/(s\*cm<sup>2</sup>\*cmHg)

$Q$  = อัตราการไหลผ่านเยื่อแผ่น (Sccs)

$L$  = ความหนาของเยื่อแผ่น (cm)

$\Delta P$  = ความดันต่าง (cmHg)

$A$  = พื้นที่ของเยื่อแผ่น (cm<sup>2</sup>)

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{0.0075 \times 0.0014}{105.6 \times 8.0457} = 1.27 \times 10^{-8} \\
 &= \frac{\text{(cm}^3\text{(STP)*cm)/(s*cm}^2\text{*cmHg)}}{\text{cmHg}} \\
 &= 126.53 \text{ Barrer}
 \end{aligned}$$

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

### 5. ค่าการนำโปรตอน

จากข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.13 เยื่อแผ่นไคโตซานที่ไม่เชื่อมขวาง  
ของตัวอย่างที่ 1

ความหนาของเยื่อแผ่น = 0.0018 เซนติเมตร

ความกว้างของเยื่อแผ่น = 1 เซนติเมตร

ระยะห่างระหว่างลวดแพลตินัม = 0.5 เซนติเมตร

The area of membrane = Membrane thickness X Membrane wide  
= 0.0018 x 1 = 0.0018 cm<sup>2</sup>

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

$\sigma$  = ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)

R = ความต้านทาน (โอห์ม)

L = ระยะห่างระหว่างลวดแพลตินัม (เซนติเมตร)

A = พื้นที่หน้าตัดของเยื่อแผ่น (ตารางเซนติเมตร)

$$\sigma = \frac{1}{164000} \left( \frac{0.5}{0.0018} \right) = 0.0017 \text{ ซีเมนส์/เซนติเมตร}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอัญชลี อินตรา เกิดเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม พุทธศักราช 2521 จบการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรมในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิคในปี 2544 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย