



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
.....วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี).....
ปริญญา

.....วิศวกรรมเคมี..... สาขา
.....วิศวกรรมเคมี..... ภาควิชา

เรื่อง การสังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ซีโอไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

Synthesis of Nafion/Zeolite Composite Membranes for Fuel Cell

นามผู้วิจัย นางสาวเสาวรส สังสุทริวงศา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงคาฉุยฉาย, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วินัย เลียงเจริญสิทธิ์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรารัตน์ มุ่งเจริญ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 28 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2549
1

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ ซีโอไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

Synthesis of Nafion/Zeolite Composite Membranes for Fuel Cell

โดย

นางสาวเสาวรส สังสุทธีวงศา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-1025-4

เสาวรส สังสุทวิชงศา 2549: การสังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ซีโอไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ปรินญาวิวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ไพศาล คงคาอุยฉาย, Ph.D. 114 หน้า
ISBN 974-16-1025-4

การสังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ซีโอไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเติมในสารละลายแนฟฟิออน 117 โดยซีโอไลต์ที่ใช้มีอยู่ 3 ชนิด คือ ชนิด ZSM-5, Mordenite และ Sodalite Octahydrate สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวและเถ้าแกลบเป็นวัตถุดิบด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ซึ่งก่อนนำไปใช้ซีโอไลต์ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปโปรตอนโดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับแอมโมเนียมไนเตรด โดยอัตราส่วนของซีโอไลต์ที่ใช้ในการเตรียมเยื่อแผ่นคือ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก เฉพาะเยื่อแผ่นที่ผสม ZSM-5 เตรียมที่อัตราส่วน 5, 10, 15, 25, 35 และ 45% โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบมีค่าอยู่ในช่วง 1.2-1.6 ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากในแต่ละชนิด ค่าการดูดซับน้ำมีค่ามากขึ้นเมื่อเติมซีโอไลต์มากขึ้นโดยเยื่อแผ่นที่ผสม Mordenite ที่ 15% มีค่าการดูดซับน้ำสูงสุดเท่ากับ 86.66% ส่วนค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้องของเยื่อแผ่นเชิงประกอบมีค่าต่ำกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนและที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสูงขึ้นด้วย สำหรับค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้องภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% พบว่าเยื่อแผ่นที่เติมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (1 atm) มีค่าการนำโปรตอนดีที่สุดและมีค่าสูงกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ (0.098 S/cm) โดยมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน 25% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.173 S/cm และเมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง 30°C ถึง 100°C พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการนำโปรตอนจะสูงขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิระหว่าง 85-90°C หลังจากนั้นมีค่าก็ลดลง โดยเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก 0.179 S/cm ที่ 90 °C เป็น 0.056 S/cm ที่ 100 °C ขณะที่เยื่อแผ่นที่ผสม ZSM-5 (1 atm) และ Mordenite มีค่า 0.243 S/cm และ 0.185 S/cm ที่ 90 °C ลดลงเป็น 0.199 S/cm และ 0.152 S/cm ที่ 100 °C ซึ่งเยื่อแผ่นที่ผสม ZSM-5 (5 atm) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.408 S/cm ที่ 85 °C แล้วลดลงเป็น 0.199 S/cm ที่ 100 °C โดยเยื่อแผ่นที่ผสม Sodalite Octahydrate มีค่าการนำโปรตอนต่ำที่สุดและค่าจะลดลงเร็วกว่าชนิดอื่นๆ คือ 0.090 S/cm ที่ 70 °C และลงเหลือ 0.013 S/cm ที่ 100 °C จากผลที่ได้แสดงว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์จะรักษาค่าการนำโปรตอนได้ดีกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ผสมซีโอไลต์

เสาวรส สังสุทวิชงศา
ลายมือชื่อนิติศ


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

28 / 111 / 41

Saovaros Sungsutivongsa 2006: Synthesis of Nafion/ Zeolite Composite Membranes for Fuel Cell.
Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of
Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Paisan Kongkachuichay, Ph.D.
114 pages.
ISBN 974-16-1025-4

The objective of this thesis was to synthesize nafion/zeolite composite membrane for fuel cell by adding zeolite into nafion 117 polymer solution in order to improve the performance at high temperature. Three kinds of zeolites, ZSM-5, mordenite and sodalite octahydrate, were selected. They were synthesized by a hydrothermal process using china clay and rice husk ash as raw materials. The composite nafion/zeolite membranes were fabricated by adding zeolite into nafion with the amount of 5, 10 and 15 % weight. However, only for nafion/ZSM-5 the amount up to 45 % weight was added. The obtained composite membranes were evaluated the following properties: zeolite particle distribution, ion exchange capacity, water uptake, hydrogen permeation, and proton conductivity. The results showed that zeolite particle was distributed uniformly when was added with amount up to 10 %. Above 10 % it started to agglomerate. Its ion exchange capacity was in the range of 1.2-1.6 and it was not related directly to added zeolite type and amount. While its water uptake was increased with increasing amount of zeolite added. Among the fabricated membranes, nafion/mordenite (15 %) showed the highest water uptake at 86.66 %. For hydrogen permeation all composite membranes exhibited lower values than that of nafion membrane. At room temperature and 99.9 % relative humidity nafion/ZSM-5 (25 %) yielded the highest proton conductivity of 0.173 S/cm that was 1.8 times of that of nafion membrane. At elevated temperature of 30-100 °C the proton conductivity of each membrane was increased and reached the maximum value at 85-90 °C, then it dropped drastically especially nafion membrane (from 0.179 S/cm at 90 °C to 0.056 S/cm at 100 °C). For nafion/ ZSM-5 and nafion/mordenite the conductivities were dropped from 0.243 S/cm and 0.185 S/cm at 90 °C to 0.199 S/cm and 0.152 S/cm at 100 °C, respectively. The nafion/sodalite octahydrate revealed the lowest proton conductivity of 0.090 S/cm at 70 °C and 0.013 S/cm at 100 °C. Conclusively, the nafion membrane can be improved its properties especially proton conductivity by adding selected zeolites.

Saovaros Sungsutivongsa

Student's signature



Thesis Advisor's Signature

28 / Feb / 06

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ไพศาล คงคาอุยชัย ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาชี้แนะและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล กรรมการวิชาเอก รศ.ดร. วินัย เลียงเจริญสิทธิ์ กรรมการวิชาการและ รศ.ดร.วิเชียร กิจปรีชาวนิช ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาสละเวลาในการตรวจแก้ไขและให้คำชี้แนะเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงเงินทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษา และวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2546) ทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท จากบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2547) และทุนอุดหนุนโครงการวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ซึ่งประกอบด้วยเครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy, Scanning Electron Microscope, X-ray Fluorescence Spectroscopy, Instron Mechanical Testing, Proton conductivity Measurement Set และ Single Fuel Cell Set ได้รับความอนุเคราะห์จากหลายหน่วยงาน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำนักงานปรมาณูแห่งชาติ บางเขน และรศ.ดร. ชันทอง สุนทรภา ณาจารย์รวมถึงเจ้าหน้าที่และนิสิตของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นอกจากผู้มีอุปการคุณที่ได้กล่าวมาแล้วก็ยังคงลืมไม่ได้สำหรับการสนับสนุนด้านทุนการศึกษาจากคุณพ่อและคุณแม่ กำลังใจที่ดีเยี่ยมจากพี่น้องและบุคคลในครอบครัว ความช่วยเหลือจากเพื่อนๆ ทุกคน

เสาวรส สังสุทธีวงศา

กุมภาพันธ์ 2549

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง	4
วิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิง	6
การจำแนกเซลล์เชื้อเพลิง	7
PEMFC	12
วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์เยื่อแผ่น	20
การพัฒนาเยื่อแผ่นในอนาคต	30
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	45
สารเคมีที่ใช้	45
เครื่องมือและอุปกรณ์	46
วิธีดำเนินงานวิจัย	50
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	57
สรุปผลการทดลอง	78
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	93
ภาคผนวก ค	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด	10
2 ลักษณะการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทที่ได้มีการใช้งานแล้ว	11
3 เปรียบเทียบ โครงสร้างและสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของเยื่อแผ่น และประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นแต่ละชนิด	21
4 ชนิดและความหนาของเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ใช้ในปัจจุบัน	23
5 ตัวอย่างของเยื่อแผ่นเชิงประกอบกรด-เบส	29
6 โคออดิเนตพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวทำละลายของแข็งในพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์	31
7 น้ำหนักแห้งของเยื่อแผ่นและปริมาตรของ HCl 0.005 โมลาร์ ที่ใช้ในการ ไตเตรทกับ NaOH 0.005 โมลาร์ และค่าการแลกเปลี่ยนไอออน	65
8 คำนวณน้ำหนักที่แตกต่างกันระหว่างเยื่อแผ่นแห้งกับเยื่อแผ่นเปียก และค่า ความสามารถในการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่นแต่ละชนิด	67
9 ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน (Barer) ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน	69
10 ค่าการนำโปรตอนโดยเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9%	70
11 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ 15% ซีโอไลต์ เทียบกับเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 ที่อุณหภูมิ 30-100°C	75
 ตารางผนวกที่	
ก1 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ เริ่มต้น 99.9%	96
ก2 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 30-100 °C และความชื้นสัมพัทธ์ เริ่มต้น 99.9%	106
ก3 ค่าการซึมผ่านของก๊าซ ไฮโดรเจน ของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ ZSM-5 (1atm) ที่อุณหภูมิ 27 °C	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค4 ค่าการซึมผ่านของก๊าซ ไฮโดรเจน ของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ ZSM-5 (1 atm) ที่อุณหภูมิ 50 °C	110
ค5 ค่าการซึมผ่านของก๊าซ ไฮโดรเจน ของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ ZSM-5 (1atm) ที่อุณหภูมิ 60 °C	111
ค6 ค่าการซึมผ่านของก๊าซ ไฮโดรเจน ของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ ZSM-5 (1atm) ที่อุณหภูมิ 70 °C	112
ค7 ค่าการซึมผ่านของก๊าซ ไฮโดรเจน ของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ ZSM-5 (1atm) ที่อุณหภูมิ 80 °C	113

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ทิศทางการไหลของเซลล์เชื้อเพลิงและออกซิเจนที่รวมทั้งผลผลิตที่เกิดจากเซลล์เชื้อเพลิง	4
2	ภาพตัดขวางแสดงการทำงานของ PEMFC	12
3	ส่วนประกอบของ PEMFC ในแต่ละชั้น	14
4	โครงสร้างโมเลกุลของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน ที่ผลิตโดยบริษัท DuPont กับเยื่อแผ่นฟลูออโรซัลโฟเนต ไอโอโนเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical	19
5	แผนผังชนิดของวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์เยื่อแผ่น	20
6	โครงสร้างทางเคมีของแนฟฟิออน	23
7	(a) โครงสร้างภายในของแนฟฟิออน (b) แบบจำลองโครงข่ายคริสตอล	26
8	ตัวอย่างโครงสร้างของ H/C พอลิเมอร์ (a) FEB main (b) sulfonate polystyrene Side-chain (c) poly (butadiene styrene)	27
9	โครงสร้างของสารตั้งต้น (a) tetraaminobiphenyl, (b) diphenylisophthalate และ (c) poly[2,21-(<i>m</i> -phenylene)-5,51 bibenzimidazole]	28
10	โครงสร้างพอลิเมอร์ที่เป็นเบส (a-d) และกรก (e-f)	30
11	การโคออดิเนตไอออนบวกโดย a) crown ethers b) bicyclic creptands	33
12	เยื่อแผ่นนำโปรตอนชนิด Benzyl sulfonic acid siloxane	34
13	เครื่องปฏิบัติการความดัน (Autoclave)	46
14	แผ่นกระจกที่ใช้ในการขึ้นรูปเยื่อแผ่น	47
15	ชุดอุปกรณ์ recast เยื่อแผ่นที่ทำจากเทฟลอน	47
16	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	48
17	X-ray Diffraction	48
18	ชุดทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ	49
19	การวัดค่าการนำโปรตอนโดยวิธี Four probe method	49
20	แผนภาพการเตรียมเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ซีโอไลต์	52
21	XRD pattern ของซีโอไลต์ชนิด Mordenite	58

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
22 XRD pattern ของซีโอไลต์ชนิด Sodalite Octahydrate	58
23 ภาพ SEM ของซีโอไลต์ชนิด (ก) Sodalite Octahydrate (ข) Mordenite	59
24 XRD pattern ของซีโอไลต์ชนิด ก. ZSM-5 มาตรฐาน ข. ZSM-5 (1 atm) ค. ZSM-5 (3 atm) และ ง. ZSM-5 (5 atm)	60
25 ภาพ SEM ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ก. ZSM-5 (1 atm) ข. ZSM-5 (3 atm) และ ค. ZSM-5 (5 atm)	61
26 ภาพ SEM แสดงลักษณะการกระจายตัวของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วน 5 10 และ 15% ที่ผสมในเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117	62
27 ภาพ SEM/EDS แสดงการกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่น แนฟฟิออน /ZSM-5 (1 atm) ปริมาณ 5, 10, 15 และ 25% โดยน้ำหนัก	63
28 ภาพ SEM/EDS แสดงการกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่น แนฟฟิออน /ZSM-5 (5 atm) ปริมาณ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก	63
29 ภาพ SEM/EDS แสดงการกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่น แนฟฟิออน /Mordenite ปริมาณ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก	64
30 ภาพ SEM/EDS แสดงการกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่น แนฟฟิออน /Sodalite ปริมาณ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก	64
31 ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5, Mordenite และ Sodalite Octahydrate	66
32 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5, Mordenite และ Sodalite Octahydrate	68
33 ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน ของเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม ZSM-5 (1 atm) ในปริมาณต่างกันเปรียบที่อุณหภูมิต่างกัน	70
34 ผลของปริมาณซีโอไลต์ที่มีต่อค่าการนำโปรตอน	73
35 ผลของปริมาณซีโอไลต์ชนิด ZSM-5(1atm) ที่มีต่อค่าการนำโปรตอน	74

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
36	ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 เทียบกับเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ซีโอไลต์ที่อัตราส่วน 15% ที่อุณหภูมิ 30 -100 °C
76	
ภาพผนวกที่	
1	XRD pattern มาตรฐานของ Mordenite
94	
2	XRD pattern มาตรฐานของ Sodalite Octahydrate
94	

การสังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ ซีโอไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

Synthesis of Nafion/Zelite Composite Membranes for Fuel Cell

คำนำ

เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) เป็นแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าแบบใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์แทนที่เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบอื่นๆ (Jacoby, 1999 และ Patil and Zegers, 1994) โดยมีข้อดีที่ไม่สร้างมลพิษและมีประสิทธิภาพสูง เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายแบบ เช่น แบบคาร์บอนेटหลอมเหลว (molten carbonate fuel cell, MCFCs) แบบออกไซด์ของแข็ง (solid oxide fuel cell, SOFCs) แบบใช้เมทานอลโดยตรง (direct methanol fuel cell, DMFCs) และแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเยื่อแผ่นพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ (proton-exchange membrane or polymer electrolyte membrane cell, PEMFCs) (Bloman and Mugerwa, 1993, Kordesh and Simarder, 1996 และ Kwak et al., 2003) เซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFCs ได้รับความสนใจมากกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากการทำงานภายใต้อุณหภูมิและความดันไม่สูงมากนัก (50-80 °C, 1-3 atm) ใช้แพลตตินัม (Pt) ปริมาณน้อย มีอายุการใช้งานนานและคงทน ชิ้นส่วนทั้งหมดของเซลล์ทำจากของแข็ง ส่วนที่บอบบางที่สุดคือ ชุดขั้วไฟฟ้าเยื่อแผ่น (membrane-electrode assembly, MEA) ที่จะประกอบด้วยชั้นกระจายก๊าซ (gas diffusion layers) ทำหน้าที่ลำเลียงก๊าซและน้ำ ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (ส่วนใหญ่ใช้แพลตตินัมเคลือบบนคาร์บอน) และแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEM) ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากพอลิเมอร์ชนิดกรดเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิก (perfluorosulfonic acid) ชนิดที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ แนฟฟิออน (Nafion[®]) (Thampan et al., 2001)

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญที่สุดของ PEMFCs คือความสามารถในการนำโปรตอนของ PEM ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในเยื่อแผ่น ดังนั้นอุณหภูมิการทำงานจึงถูกควบคุมให้ไม่เกิน 80 °C เพื่อป้องกันแผ่นเยื่อแห้ง นอกจากนั้นที่อุณหภูมิต่ำระดับนี้ขั้วแพลตตินัม (ขั้วบวก) ยังถูกทำให้เสื่อมสภาพ (poisoning) โดย CO ที่ปนเปื้อนมาจากการป้อนก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหรือแอลกอฮอล์ ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวจะได้ CO เป็นสารผลิตภัณฑ์ควบคู่ด้วย วิธีการแก้ไขปัญหานี้วิธีหนึ่ง คือ การปรับปรุงคุณสมบัติของแผ่นเยื่อให้สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น (สูงกว่า 100°C) โดยที่ไม่ต้องคอยเพิ่มความชื้นให้กับระบบ จะช่วยให้แพลตตินัมทำงานได้ดีขึ้นมีผลให้การแตกตัวของก๊าซไฮโดรเจนดีขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น

ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น มีผลทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวของก๊าซไฮโดรเจนเป็นโปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอนดีขึ้น การปรับปรุงดังกล่าวทำได้โดยใช้เยื่อแผ่นเชิงประกอบ (composite membrane) ที่ได้จากการเติมสารประกอบบางชนิดลงในแนฟฟิออน

จากสภาพปัญหาและแนวทางแก้ไขดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะสังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบโดยใช้แนฟฟิออนเป็นตัวหลักและใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเติม โดยหวังที่จะช่วยเพิ่มค่าการนำโปรตอน จากความสามารถในการให้โปรตอนของซีโอไลต์และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยไม่ต้องเพิ่มความชื้น เพราะซีโอไลต์มีความสามารถจับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ และทำให้เยื่อแผ่นมีความคงทนและแข็งแรงมากขึ้น

วัตถุประสงค์

1. พัฒนาเทคนิคในการสังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ซีโอไลต์ เพื่อใช้เป็นเยื่อแผ่นอิเล็กโตรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิง
2. เปรียบเทียบคุณสมบัติของเยื่อแผ่นเชิงประกอบที่สังเคราะห์ขึ้นกับเยื่อแผ่นแนฟฟิออน

ขอบเขตการศึกษา

1. ใช้ซีโอไลต์ชนิด Sodalite Octahydrate, Mordenite และ ZSM-5 ที่สังเคราะห์โดยใช้วัตถุดิบราคาถูกในประเทศคือ ดินขาว (china clay) และแกลบจากการสีข้าว เป็นวัตถุดิบหลัก
2. จำแนกชนิดของซีโอไลต์ที่ได้ด้วย X-ray Diffractometer (XRD) วิเคราะห์รูปร่างและขนาดของผลึกด้วย Electron Scanning Microscope (SEM)
3. สังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ซีโอไลต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้ perfluorosulfonylfluoride copolymer resin เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับซีโอไลต์ที่เตรียมได้

4. ศึกษาว่าชนิด ขนาดผลึก และปริมาณของซีโอไลต์ที่เติมจะมีผลอย่างไรต่อความสามารถในการนำโปรตอนของเยื่อแผ่น

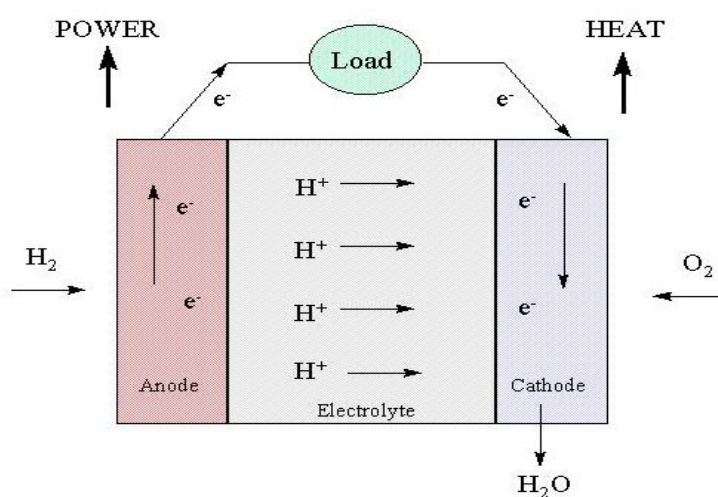
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับ แร่ดินขาวและแกลบ
2. ได้เทคนิคการสังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ ซีโอไลต์ ที่คาดว่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออน
3. เป็นการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชนิด Fossil Fuel รวมถึงเป็นการลดมลพิษที่เกิดจากการใช้เซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวด้วย

ตรวจเอกสาร

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) หมายถึง อุปกรณ์ทางไฟฟ้าเคมีที่จะเปลี่ยนพลังงานเคมีที่เกิดขึ้นโดยตรงของปฏิกิริยาเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยโครงสร้างพื้นฐานจะประกอบด้วยอิเล็กโตรไลต์ที่ต่อเชื่อมกับแอโนดและแคโทดที่มีรูพรุนจุ่มอยู่ในสารอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งอาจอยู่ในสภาพของเหลวหรือของแข็ง โดยทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ที่ได้ โปรตอน และอิเล็กตรอนแสดงดังภาพที่ 1 แก๊สเชื้อเพลิงไฮโดรเจน (H_2) ถูกป้อนเข้าด้านแอโนด (ซ้าย) ส่วนตัวออกซิแดนท์ (Oxidant) จะถูกป้อนด้านแคโทด (ขวา) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วและเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้นมาซึ่งจะได้น้ำเป็นผลผลิตของปฏิกิริยา โดยพลังงานที่ได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถใช้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์คล้ายกับแบตเตอรี่ซึ่งเป็นเซลล์ที่สร้างพลังงานไฟฟ้าได้เหมือนกันเพียงแต่แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่แน่นอนและทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุและตัวจ่ายประจุ ในการใช้งานจึงต้องทำการใส่กระแสก่อนนำไปใช้งานและต้องใส่กระแสไฟใหม่เมื่อหมดแรงดัน แต่เซลล์ไฟฟ้าเป็นระบบต่อเนื่องสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตลอดเวลาที่มีการไหลเชื้อเพลิงและออกซิแดนท์เข้าไปในเซลล์



ภาพที่ 1 ทิศทางการไหลของเซลล์เชื้อเพลิงและออกซิแดนท์
รวมทั้งผลผลิตที่เกิดขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิง

ก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมและสามารถผลิตได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและจะมีความหนาแน่นทางไฟฟ้าสูงเมื่อเก็บในสภาพแวดล้อมปิด เช่น ในอวกาศ ส่วนตัวออกซิเจนที่นิยมคือ ออกซิเจน เพราะสามารถหาทั่วไปในอากาศและสามารถเก็บรักษาได้ง่ายในสภาพปิดเช่นกัน โดยที่ขั้วแอโนดจะมีการไหลของก๊าซไฮโดรเจน และเมื่อก๊าซไฮโดรเจนสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาจะแตกตัวให้โปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ดังสมการ (1)



ที่ขั้วแคโทดมีการไหลของออกซิเจน ที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิแดนท์ ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (รับอิเล็กตรอน) ซึ่งก๊าซออกซิเจนที่สัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาจะแตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอมเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนโปรตอนและอิเล็กตรอนเพื่อสร้างเป็นโมเลกุลของน้ำดังสมการ (2)



ธรรมชาติของผิวสัมผัสจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเซลล์ที่ใช้ของเหลวเป็นอิเล็กโทรไลต์ จากปฏิกิริยาสามารถเกิดพลังงานโดยไม่ต้องมีการเผาไหม้ทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงไม่ก่อมลภาวะ ทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ 1-3 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ใช้ในรถยนต์นั้นสามารถเก็บบรรจุอยู่ในภาชนะโดยตรง โดยการอัดให้อยู่ในสถานะของเหลวหรือเก็บไว้ในสภาพของสารประกอบโลหะไฮไดรด์ หรือในสภาพของผสมระหว่างเมทานอลกับไอน้ำโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาให้ก๊าซผสมของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วแยกเอาเฉพาะก๊าซไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะยุ่งยากแต่เมทานอลก็เป็นของเหลวที่สามารถขนส่งและเก็บรักษาได้ง่ายกว่าก๊าซไฮโดรเจน

แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ผลิตขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานเสรีกิบส์ (Gibb's free energy) ของเชื้อเพลิง ค่าแอกติวิตี (Activities) ของสารตั้งต้น ตลอดจนกระแสไฟฟ้าที่ถูกดึงออกมา จากปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นจะก่อให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง แต่การประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่จำเป็นต้องการแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสลับ (Alternating current power

หรือ AC) ดังนั้นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรงจึงต้องถูกนำมาเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เครื่องผกผันหรืออินเวอร์เตอร์ (Inverter) ก่อนใช้งาน (อภิชัย, 2543)

1. ลักษณะเด่นของ เซลล์เชื้อเพลิง

- 1) ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรง
- 2) ไม่มีการเคลื่อนที่ของส่วนที่ผลิตพลังงานจึงไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวน
- 3) มีความสามารถสูงที่อุณหภูมิต่ำ
- 4) มีความสามารถในการทรงตัวอยู่ได้ (sitting)
- 5) เป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่มีความยืดหยุ่นสูง
- 6) ให้ประสิทธิภาพสูง

2. วิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิง (<http://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/origins.htm>)

ในปี ค.ศ. 1839 Christian รายงานครั้งแรกว่าปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยใช้กรดซัลฟิวริกและลวดแพลตตินัม Sir William Grove รายงานในอีก 1 เดือนถัดมาถึงแบตเตอรี่ที่ใช้แพลตตินัมและสังกะสี เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกและไนตริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งถือว่าเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเครื่องแรกในโลก หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ในปี ค.ศ. 1889 Mond และ Carl Langer ได้อธิบายการทดลองของการใช้ก๊าซไฮโดรเจน และออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้กระแสไฟฟ้า 6 amps/ ft^2 ที่ 0.73 โวลต์ ซึ่งใช้แผ่นอิเล็กโทรดบางๆ ของแพลตตินัม และได้อธิบายความยากในการใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว

ในปี ค.ศ. 1893 Friedrich ได้ทดลองต่อองค์ประกอบที่ต่างกันของเซลล์เชื้อเพลิง คือ อิเล็กโทรด อิเล็กโทรไลต์ ตัวออกซิแดนท์ ตัวรับอิเล็กตรอน ขั้วแคโทดและแอโนด ซึ่งจะมีการทำงานเหมือนแบตเตอรี่ โดยก๊าซจะเกิดที่ตำแหน่งสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ยังไม่สามารถที่จะอธิบายได้มากนักแต่ก็เป็นประโยชน์สำหรับการวิจัยของเซลล์เชื้อเพลิง ต่อมา

ในปี ค.ศ. 1896 William วิศวกรไฟฟ้าและนักเคมีได้กลายbecomeเป็นนักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อเสียงจากการที่เขาสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงจากถ่านหิน เรียกว่า คาร์บอนแบตเตอรี่ซึ่งอากาศจะ

ถูกอัดเข้าไปในอัลคาไลน์อิเล็กโทรไลต์เพื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอิเล็กโทรดซึ่งจัดว่าเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่มีประสิทธิภาพถึง 82 %

ในช่วงปี ค.ศ. 1873 Emit นักศึกษาของ Braunschweig และ Zurich ชาวสวิสเซอร์แลนด์ ร่วมกับนักวิจัยเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ระหว่าง 1-2 ศตวรรษ รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้อุณหภูมิสูง พวกที่ใช้โลหะเงินหลอมเหลวเป็น อิเล็กโทรไลต์ และที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ของแข็งจำพวกถ่านหิน และโลหะออกไซด์

ในปี 1939 Francis ได้สร้างเซลล์ที่ใช้ไนเกิลควอเตอร์ซ์ เป็นอิเล็กโทรดและใช้งานภายใต้ความดันสูง 3000 psi ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 งานของ Bacon ได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถใช้ใน Royal Navy Submarines และในปี 1958 ได้แสดงตัวอย่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ที่ใช้อิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว สำหรับ Britain's National Research Development Corporation

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นได้จากประสิทธิภาพทางเคมี โดยอาศัยหลักการทางเทอร์โมไดนามิก ไม่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle) ที่เป็นตัวควบคุมประสิทธิภาพการทำงานในเครื่องกำเนิดพลังงานจากความร้อน เช่น ระบบกังหันก๊าซ และเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง ประสิทธิภาพการทำงานจึงสูงถึง 85 % ในทางทฤษฎี ทั้งนี้เชื้อเพลิงที่นำมาใช้จะต้องนำมาคิดหาค่าประสิทธิภาพที่แท้จริงด้วยหากต้องมีการแปรสภาพก่อนการใช้งาน

3. การจำแนกเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ ระบบที่มีส่วนของรีฟอร์มเมอร์ (Reformer) อยู่ภายนอกและภายใน กรณีที่อยู่ภายนอกจะแยกส่วนของรีฟอร์มเมอร์ซึ่งทำหน้าที่ผลิตก๊าซ ไฮโดรเจน ป้อนสู่เซลล์เชื้อเพลิงและตัวเซลล์เชื้อเพลิงออกจากกันอย่างชัดเจน กรณีที่อยู่ภายในจะไม่มีส่วนของรีฟอร์มเมอร์ให้เห็นแต่จะมีส่วนที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนอยู่ในตัวโดยสมบูรณ์ทำให้มีการซ่อมบำรุงสูง เหมาะกับการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง

การจำแนกประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงที่ง่ายที่สุด คือ การจัดแบ่งตามประเภทของสารอิเล็กโทรไลต์เป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ คือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline fuel cells) เซลล์เชื้อเพลิง

แบบกรด (Acid fuel cells) เซลล์เชื้อเพลิงแบบสารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นเกลือหลอมเหลว (Molten salt electrolyte fuel cells) เซลล์เชื้อเพลิงแบบใช้พอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ (Polymer Membrane Fuel Cell: PMFC) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cells) (อภิชัย, 2543)

1. Alkaline Fuel Cell (AFC) อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เหลว โดยจะต้องใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์และก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์เท่านั้น มีประสิทธิภาพประมาณ 70 % ช่วงอุณหภูมิในการใช้งานอยู่ที่ 150-200°C (300-400°F) จะให้กระแสประมาณ 300 วัตต์ถึง 5 กิโลวัตต์ การใช้งานจำกัดอยู่ในงานทางด้านอวกาศ เช่น ในยานอวกาศอพอลโล อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 60-120 °C ซึ่งจะให้ทั้งน้ำและกระแสไฟฟ้า ในเซลล์ชนิดนี้ OH^- จะเคลื่อนจากแคโทดไปแอโนด โดยที่แอโนดไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับ OH^- ให้น้ำและปล่อยอิเล็กตรอนไปกับกระแสภายนอกไปที่แคโทด โดยอิเล็กตรอนนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำทำให้ได้ OH^- แปรกลับเข้าไปในอิเล็กโทรด

2. Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ สามารถทนต่อก๊าซเจือปนได้มากกว่าแบบ AFC แต่ก็ยังใช้เชื้อเพลิงและออกซิแดนซ์ชนิดเดียวกัน อุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 150-200 °C (300-400°F) หลักการทำงานของไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนผ่าน อิเล็กโทรไลต์จากด้านแอโนดไปด้านแคโทด อิเล็กตรอนเกิดด้านแอโนดจะเคลื่อนผ่านกระแสภายนอกไปด้านแคโทด เมื่ออิเล็กตรอนรวมกันไฮโดรเจนไอออนและออกซิเจนก็จะเกิดเป็นน้ำ และมีแพลตตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มความเร็วของปฏิกิริยา ปัญหาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ การกัดกร่อนของกรดที่อุณหภูมิการใช้งาน และการเกิด CO รอบๆ อิเล็กโทรดจะเป็นพิษกับเซลล์ แต่ข้อดีคือ การใช้งานจะอยู่ที่อุณหภูมิ 200 °C ทำให้มี CO ประมาณ 1.5% ในปัจจุบันได้มีการใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว โดยมีขนาดกำลังไฟฟ้า ประมาณ 200 กิโลวัตต์

3. Polymer Membrane Fuel Cell (PMFC) or Polymer electrolyte Fuel Cell (PEFC) เป็นชนิดที่ใช้เยื่อแผ่นพอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับของเหลวอิเล็กโทรไลต์ที่กัดกร่อนเพราะของเหลวชนิดเดียวภายในเซลล์คือ น้ำ เซลล์ชนิดนี้ใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 120 °C ใช้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาเยื่อแผ่นพอลิเมอร์เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้จากเชื้อเพลิงเมทานอล โดยไม่ต้องเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนก่อน จึงเรียกเซลล์เชื้อเพลิงชนิดใหม่นี้ว่า เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เมทานอลโดยตรง (Direct Methanol Fuel Cell) เพราะอุณหภูมิการใช้งานค่อนข้างต่ำจึงใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อยกว่าประเภทอื่น บริษัทรถยนต์ต่าง ตระหนักถึง

ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ จึงได้มีการพัฒนา PMFC เพื่อใช้ในรถยนต์สำหรับอนาคตซึ่งได้เริ่มทำมาหลายปีแล้ว คาดว่าในอนาคตอันใกล้นี้ จะมีรถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ ทั้งในรูปแบบของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และรถโดยสารขนาดใหญ่ บริษัทที่มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ ได้แก่ โตโยต้า ฟอร์ด บีเอ็ม ฮอนด้า นิสสัน และมาสด้า

4. Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) อิเล็กโตรไลต์ที่ใช้เป็นพวกเกลือคาร์บอเนต หลอมเหลวของโซเดียม และโปแตสเซียมในเซรามิกเมตริกซ์ของลิเทียมอลูมินेट โดยอุณหภูมิที่ใช้ทำงานอยู่ที่ประมาณ 650°C ($\sim 1200^{\circ}\text{F}$) เมื่อเกลือหลอมเหลวจะนำคาร์บอเนตไอออนจากแคโทดไปที่แอโนด โดยที่แอโนดไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับไอออนเกิดน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และอิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนผ่านวงจรภายนอกไปที่ แคโทด เมื่อออกซิเจนจากอากาศและคาร์บอนไดออกไซด์มารวมกันที่แคโทดก็จะเกิดปฏิกิริยาได้คาร์บอเนตไอออน เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิสูงในการใช้งานดังนั้นปัญหาจากการกักความร้อนจึงมีความสำคัญมาก และที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง สารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ มีประสิทธิภาพประมาณ 60-80% เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้นิยมใช้กับโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเมกะวัตต์จึงจะเหมาะสมกับประสิทธิภาพการทำงานเนื่องจากระบบที่ใช้ค่อนข้างซับซ้อน

5. Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารเซรามิกเป็นอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งสารที่ใช้มากคือ สารประกอบของเซอร์โคเนีย โดยใช้งานที่อุณหภูมิ $650-1000^{\circ}\text{C}$ ขึ้นอยู่กับการออกแบบและสารที่ใช้เป็นอิเล็กโตรไลต์ เช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว สารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ และออกซิเจนในอากาศนำมาใช้เป็นออกซิแดนท์ ได้ เซลล์เชื้อเพลิงแบบ PMFC นั้นเป็นประเภทที่ถูกเลือกใช้ในยานยนต์ส่วนใหญ่ มีเพียง BMW เท่านั้นที่ต้องการใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (SOFC) มาใช้เป็นระบบจ่ายไฟโดยไม่ได้ใช้ในการขับเคลื่อน โดยรวมแล้วได้มีการพัฒนาให้สามารถใช้เป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าทั้งขนาดเล็กภายในครัวเรือน 1-2 kW โดยบริษัท Sulzer Hexis สวิตเซอร์แลนด์ หรือบริษัท Ceramic Fuel Cells Limited ของออสเตรเลียที่มีขนาดหลายสิบกิโลวัตต์ขึ้นไป เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าในชุมชนเช่น ของ บริษัท Siemens Westinghouse ของสหรัฐอเมริกา มีแนวโน้มการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เพื่อเป็นโรงไฟฟ้าขนาดย่อม ในช่วงหลักร้อยกิโลวัตต์ ถึงเมกะวัตต์ โดยในอนาคตจะพัฒนาให้ทำงานร่วมกับการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันก๊าซ หรือกังหันไอน้ำด้วยความร้อนที่เหลือจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์

จากลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกันของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดทั้ง อิเล็กโตรไลต์ อุณหภูมิในการใช้งาน ประจุตัวนำ ตัวเร่งปฏิกิริยา และผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาของเซลล์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
อิเล็กโตรไลต์	Ion Exchange Membrane	Mobilized or Immobilized Potassium Hydroxide	Immobilized Liquid Phosphoric Acid	Immobilized Liquid Molten Carbonate	Ceramic
Operating Temperature	80°C	65-220°C	205°C	650°C	600-1000°C
Charge Carrier	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁻	O ⁻
External Reformer for CH ₄ (below)	yes	yes	yes	no	no
Prime cell Components	Carbon-based	Carbon-based	Graphite-based	Stainless-based	Ceramic
catalyst	Platinum	Platinum	Platinum	Nickel	Gaseous Product
Product water management	Evaporative	Evaporative	Evaporative	Gaseous Product	Gaseous Product
Product Heat Management	Process Gas+ Independent cooling Medium	Process Gas+ electrolyte Circulation	Process Gas+ Independent cooling Medium	International Reforming + Process Gas	International Reforming + Process Gas

ที่มา: จาก Fuel Cell Handbook 6th edition (National Energy Technology Laboratory)

เซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตขึ้นมามีอยู่มากมายหลายประเภท แต่ที่รับการพัฒนามาจนถึงระดับผลิตในชั้นอุตสาหกรรมมีอยู่เพียง 3 ประเภท ได้แก่

- 1) เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารอิเล็กโตรไลต์เป็นกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) ซึ่งมีการทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C
- 2) เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารอิเล็กโตรไลต์เป็นเกลือคาร์บอเนต (Carbonate salt) ซึ่งมีการทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 650 °C
- 3) เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารอิเล็กโตรไลต์เป็นออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide) ซึ่งมีการทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 650 °C

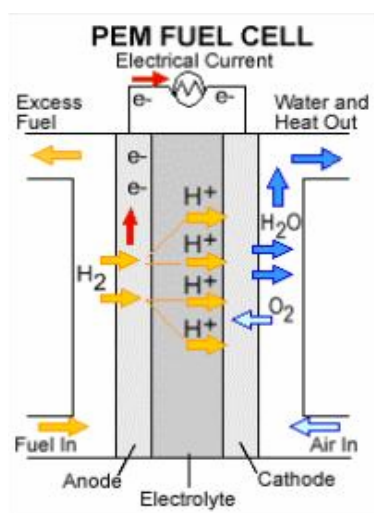
จากความแตกต่างของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดจึงมีการใช้งานที่หลากหลายขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงานแต่ละประเภท โดยลักษณะการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทที่ได้มีการใช้งานแล้วสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทที่ได้มีการใช้งานแล้ว

Type	Capacity	Application
AFC	1.5 kW	Apollo Program
	12 kW	Space Shuttle Orbiter
PAFC	200 kW	Power Plant (40,000 hours at 40%LHV electric eff., 80% cogeneration)
	11 MW	Power Plant
PEMFC	1 kW	Gemini Program
	200 kW	Transport bus in Canada
	250 kW	Power Plant
	2 MW	Power Plant (8 stacks of 125 kW each, 58 %LHV electric eff.)
	< 24 W	Mobile applications (mobile phone, laptop computer, PDA)
MCFC	2 MW	Power Plant (44% LHV eff.)
SOFC	100 kW	Power Plant (4000 hours at 45%LHV electric eff.)
	220 kW	Power Plant (combined cycle with micro turbine generator 75kW, 55%
	(180kW)	eff.)

PEMFC

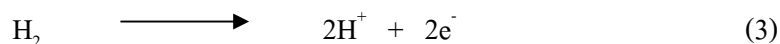
PEMFC เป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบหนึ่งที่กำลังพัฒนาขึ้นในรูปแบบที่ใช้เยื่อแผ่นพอลิเมอร์ของแข็งเป็นอิเล็กโทรไลต์ (Solid Polymer electrolyte membrane fuel cell) ซึ่งจะใช้งานเหมือนเซลล์ไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์แทนที่น้ำมันเชื้อเพลิง และในอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างอื่น โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะอาศัยเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนคือก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนจากอากาศเป็นแหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี ที่เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของก๊าซไฮโดรเจน ได้เป็นโปรตอนไหลผ่านแผ่นพอลิเมอร์และอิเล็กตรอนไหลผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอก ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนก็ไหลไปรวมกับก๊าซออกซิเจนโมเลกุลที่แตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอมแล้วโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาทำจากแพลตตินัม ก็จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันจนได้น้ำบริสุทธิ์ออกมา (ดังภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 ภาพตัดขวางแสดงการทำงานของ PEMFC

เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งประกอบด้วยเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ในที่นี้เยื่อแผ่นจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอน เยื่อแผ่นดังกล่าวจะถูกประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่มีความพรุนตัวและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลตตินัมเกาะอยู่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งนี้ต้องใช้ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนที่มีความชื้น (Humidified gases) ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขั้วอิเล็กโทรด มีดังนี้

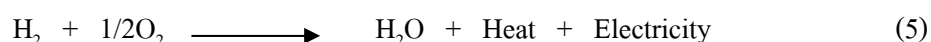
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด : ไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์แล้วเกิดเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (3)



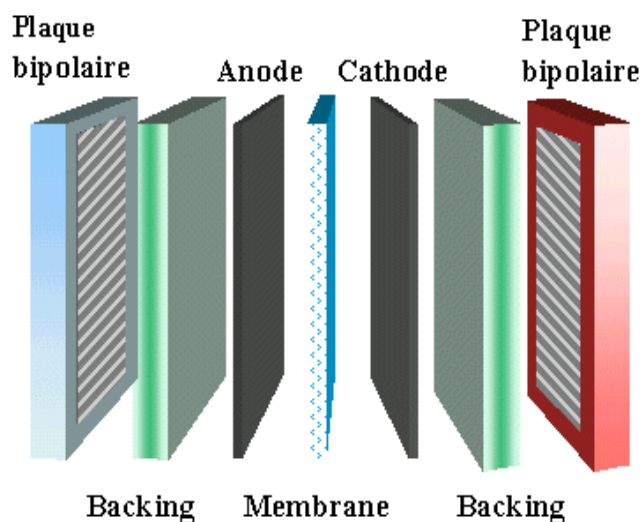
ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด : โปรตอนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดจะเกิดการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นมาที่ขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ (4)



ปฏิกิริยาสุทธิของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งแสดงดังสมการที่ (5) โดยน้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกดึงออกจากเซลล์มากับก๊าซทางขั้วแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น



แรงดันไฟฟ้าที่ได้ต่อหนึ่งเซลล์มีค่าประมาณหนึ่งโวลต์และได้กระแสออกมามากถึงหลายสิบแอมแปร์ ซึ่งถ้านำมาต่ออนุกรมกัน (Fuel Cell Stack) หลายๆ เซลล์ก็จะได้แรงดันไฟฟ้าเป็น 12 โวลต์เหมือนกับแบตเตอรี่ได้ แต่การที่เซลล์ไฟฟ้าแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือเยื่อแผ่นพอลิเมอร์อีเล็กโตรไลต์ (proton-exchange membrane or polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFCs) (Bloman and Mugerwa, 1993; Kordesh and Simarder, 1996 และ Kwak et al., 2003) ได้รับความสนใจมากกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากจะทำงานภายใต้อุณหภูมิและความดันไม่สูงมากนัก (50-80 °C, 1-3 atm) ใช้แพลตตินัมปริมาณน้อยมีอายุการใช้งานนานและคงทน เพราะชิ้นส่วนทั้งหมดของเซลล์ทำจากของแข็ง ใน PEMFC จะประกอบกันเป็นชั้นแสดงดังภาพที่ 3 จะมีองค์ประกอบดังนี้



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของ PEMFC ในแต่ละชั้น

1. Proton-conducting membrane (อีเล็กโตรไลต์) หรือแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEM) ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากพอลิเมอร์ ชนิดกรดเพอร์ฟลูออโรซัลโฟนิก (perfluorosulfonic acid) ตัวที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ แนฟฟิออน (Nafion[®]) (Thampan et al., 2001) มีความหนาอยู่ระหว่าง 0.05-0.2 มิลลิเมตร โดยโครงสร้างของ Nafion จะประกอบด้วยอะตอมของ C, F, O, S และ H จัดเรียงกันในรูปแบบของพอลิเมอร์ที่จะทำหน้าที่ดูดซับ H^+ จากไฮโดรเจนที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ เยื่อเพลิงด้านแอโนดจะเปลี่ยนเป็นโปรตอนและอีเล็กตรอนโดยที่โปรตอนจะเคลื่อนไปด้านแคโทด ขณะที่อีเล็กตรอนจะเคลื่อนออกไปยังกระแสภายนอกไปด้านแคโทดและให้พลังงานออกมา ส่วนออกซิเจนจะเข้ามาทำปฏิกิริยากับอากาศจะทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงด้านแคโทดซึ่งจะรวมตัวกับโปรตอนและอีเล็กตรอน กลายเป็นน้ำ

2. แอโนดและแคโทดทำจากกราฟต์เคลือบหรือแผ่นกราฟต์ซึ่งป้องกันปฏิกิริยากับน้ำ โดยใช้ hydrophobic Teflon มีแพลตฟอร์มทำหน้าที่เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยากับอีเล็กโตรไลต์ โดยส่วนของอีเล็กโตรไลต์ของ แคโทด และ แอโนด จะเรียกว่า membrane electrode assembly (MEA) โดยขนาดของ MEA จะหนาน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นส่วนที่บอบบางที่สุดจะอยู่ในสนามของแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ด้าน (แอโนดและแคโทดกราฟต์เพลท) โดยจะทำหน้าเหมือนถุงหุ้มที่มีช่องว่างให้อีเล็กโตรดและอีเล็กตรอนผ่าน และจะมีชั้นของ bipolar plate ปิดทับอีกทั้ง 2 ข้าง เรียกว่า ชั้นกระจายก๊าซ (gas diffusion layers) ทำหน้าที่ลำเลียงก๊าซและน้ำ

3. Gas-diffusion electrode จะประกอบด้วยแผ่น ตัวเร่งปฏิกิริยา บางๆ ของแพลตตินัมหรือแพลตตินัมนัลลอคย์บนคาร์บอนหนา 0.01-0.05 มิลลิเมตร และมี hydrophobic backing หนา 0.1-0.4 มิลลิเมตร ของคาร์บอนเคลือบอยู่ และแผ่น carbon backing จะมีรูสำหรับส่งผ่านเชื้อเพลิง (ก๊าซไฮโดรเจน) และตัวออกซิเจน (ออกซิเจน) และน้ำที่เกิดขึ้น รวมทั้งปล่อยความร้อนที่เกิดขึ้นออกจากระบบโดยแผ่นเยื่อชนิดนี้จะมีข้อจำกัดคือถ้าแผ่นเยื่อแห้งจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ จึงต้องเก็บน้ำไว้ในเซลล์เพราะความร้อนจะทำให้เกิดการถ่ายโอนโปรตอนได้ดี

อิเล็กโตรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งจะไม่ใช้อิเล็กโตรไลต์ที่เป็นของเหลว แต่เป็นเยื่อแผ่นที่เหมือนพลาสติกที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่สามารถนำไอออนของไฮโดรเจนได้ดี เยื่อแผ่นที่เคยนำมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็งมีอยู่มากมายรวมทั้งพอลิเมอร์ที่ทำมาจาสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น Cross-linked polystyrene-divinylbenzene sulfonic acids และ Sulfonated phenolformaldehyde เป็นต้น โดยทั่วไปเยื่อแผ่นดังกล่าวข้างต้นจะมีฤทธิ์เป็นกรด เนื่องจากมีกลุ่มกรดซัลโฟนิคที่อยู่ในเนื้อเมทริกซ์ สำหรับเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ของแข็งที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะมีลักษณะเป็นเจลซึ่งต้องมีโมเลกุลของน้ำและโปรตอนอยู่จึงจะเกิดการนำไอออนได้ อัตราส่วนระหว่างโมเลกุลของน้ำต่อโปรตอน เพื่อให้เกิดการนำไอออนได้ดีที่สุด คือประมาณ 3 ต่อ 1 ดังนั้นค่าการนำไอออนของพอลิเมอร์ดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับค่าความดันของน้ำที่ตำแหน่งนั้นๆ (หรืออีกนัยหนึ่งก็คือขึ้นอยู่กับอุณหภูมินั่นเอง) โดยภาพรวมสามารถพิจารณาว่าเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ของแข็งส่วนใหญ่เป็นอิเล็กโตรไลต์กรดที่ซึ่งไอออนลบจะถูกยึดไว้โดยโครงสร้างพอลิเมอร์ สำหรับเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นกรดซึ่งถูกใช้เป็นตัวนำอิเล็กโตรไลต์จะต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้

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

โดยเยื่อแผ่นที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEMFC คือ Perfluorinate Membrane (Nafion) ที่สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 50-90 °C (Blomen and Mugerwa, 1993; Srinivasan, Dave et al., 1993 and EG&G services 2000) ซึ่งเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการใช้งานค่อนข้างจำกัดเนื่องมาจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีการสูญเสียน้ำมากขึ้นทำให้ค่าการนำโปรตอนลดลง และยังขึ้นอยู่กับสมบัติของเยื่อแผ่นแต่ละชนิดอีกด้วย ในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (polymer glass transition) สำหรับแนฟฟิออนจะอยู่ที่ประมาณ 110°C จะส่งผลให้โครงสร้างของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป ความเสถียรของเยื่อแผ่นลดลง ประสิทธิภาพการใช้งานที่ลดลงและทำให้อายุการใช้งานลดลงด้วย (Yeo and Eisenberg, 1997; Hinatsu Mizuhata et al., 1994 and Zook and Leddy, 1996) และอาจทำให้เกิด pinhole (รูรั่ว) ซึ่งทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่เข้ามาเกิดปฏิกิริยาไม่เต็มที่ (Adjamian et al., 2002) ในการเพิ่มอุณหภูมิในการใช้งานนอกจากจะเป็นการลดความเป็นพิษเนื่องจากก๊าซปนเปื้อน CO ที่ได้มาจากระบบการรีฟอร์มมิ่งที่เกิดจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนมาเป็นเชื้อเพลิงในเซลล์ไฟฟ้าแบบ PEMFC (Yang et al., 2001) และการเพิ่มอุณหภูมิในการใช้งานยังช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (electrode kinetic rate of oxygen reduction) (Mukerjee and Srinivasan, 1993)

การเติมสารประกอบอนินทรีย์ลงในเยื่อแผ่นพอลิเมอร์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะสามารถเพิ่มสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ จำพวกความยืดหยุ่น การนำโปรตอน อัตราการซึมผ่านของตัวทำละลาย ความแข็งแรง การดูดซึมน้ำและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ทำให้สามารถใช้งานได้ดีในเซลล์ไฟฟ้า ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเยื่อแผ่นเชิงประกอบที่ใช้สำหรับ PEMFC (Malhotra and Datta, 1997; Mauritz, 1998; Grot and Rajendran, 1999; Choi et al., 2000; Adjemian et al., 2000; Mauritz and Payne, 2000; Murphy and Cisar, 2000; Wainright et al., 2001; Lee et al., 2002; Nishikawa et al., 2002) (ซึ่งสมบัติ hydration ของเยื่อแผ่นเป็นสมบัติหลักที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการทำงานของเยื่อแผ่น โดยเยื่อแผ่นเชิงประกอบจะทำให้สามารถใช้งานที่ความชื้นต่ำหรือมีความต้องการความชื้นลดลงนั่นเอง (Yang et al., 2003))

1. วิวัฒนาการของ PEMFC

เทคโนโลยีเกี่ยวกับ PEM ที่ใช้ในการสร้างกระแสไฟฟ้า เริ่มก่อนปี ค.ศ. 1960s Thomas ในราวปี ค.ศ. 1965 Griubb และ Leonard Niedrach สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สำเร็จโดยได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กที่ใช้ในงานของกองทัพเรือและกองทัพบกของสหรัฐอเมริกา ซึ่งเซลล์

เชื้อเพลิงที่ใช้คือ ไฮโดรเจนที่ได้จากการผสมน้ำและลิเทียมไฮไดรด์ และถูกใช้ในองค์การนาซาของเยอรมนี โดยก่อนหน้านี้ได้ใช้เป็นแบตเตอรี่สำหรับให้พลังงานในยานอวกาศของสถานีอวกาศของสหรัฐด้วย

ในปี ค.ศ. 1975 กองทัพอากาศสหรัฐได้พัฒนาเทคโนโลยี PEM water electrolysis และกองทัพอากาศก็ได้รับเทคโนโลยีนี้มาใช้ในเรือดำน้ำ ก่อนปี ค.ศ.1980s ส่วนงานอื่นที่ค้นพบในราวปี ค.ศ. 1980s Los Alamos National Lab and Texas A & M University ได้มีการทดลองเกี่ยวกับแนวทางในการลดปริมาณของแพลตตินัมที่ใช้ในเซลล์ ส่วนรายงานวิจัยของ PEMFC เริ่มขึ้นเมื่อปี 1998 และมีการวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะพัฒนา PEM ให้มีราคาถูกลงและมีความคงทนถาวรเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม ในปี 2000 ได้พัฒนาให้มีราคาถูกลงและมีคุณภาพดีขึ้นโดยการทำ Bipolar plate ที่ได้จากวัสดุ polypropylene, epoxy liquid และ crystal polymer และพัฒนา ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบใหม่เพื่อที่จะลด potential ที่มากเกินไปของแคโทดโดยการลด Pt-metal salt ซึ่งต่อมาก็สามารถนำไปใช้ในงานที่หลากหลายมากขึ้น เช่น ในปี 2002 นำไปใช้ในปล่องไฟขนาด 1 kW และในปี 2003 นำไปใช้ในการผลิตพลังงานขนาด 50 W-1 KW

2. การพัฒนาเยื่อแลกเปลี่ยนไอออน

งานพัฒนาเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับเซลล์เชื้อ ได้เริ่มในราวๆปี 1959 โดยบริษัท General Electric (GE) ซึ่งผลิตโดยการควบแน่นกรดฟีนอลซัลโฟนิก (Phenolsulfonic acid) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เยื่อแผ่นนี้จะมีคุณสมบัติเปราะและแตกได้ง่าย เมื่อเยื่อแผ่นแห้ง และถูกไฮโดรไลซ์ได้อย่างรวดเร็วกลายเป็นกรดซัลฟิวริกและมีอายุการใช้งานอยู่ที่ 300-1000 ชั่วโมงและมีความหนาแน่นของกระแส $0.05-0.1 \text{ kWm}^{-2}$ เยื่อแผ่นแบบพอลิเมอร์ของแข็งชุดถัดมาผลิตได้จากการทำซัลโฟเนชันบางส่วน (Partial sulfonation) ของพอลิสไตรีน (Polystyrene) แต่สมบัติของเยื่อแผ่นนี้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เพราะมีอายุการใช้งานสั้น คือ ประมาณ 200 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60°C เยื่อแผ่นชุดต่อมาที่ได้รับการพัฒนา คือ เยื่อแผ่นที่ได้จากการใช้สไตรีนไดไวนิลเบนซีน (Styrene divinylbenzene) ที่เกาะอยู่บนเมทริกซ์ที่ทำมาจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon matrix) ที่เคลือบแล้วตามด้วยการทำซัลโฟเนชัน เตรียมโดยการละลาย polystyrene sulfonic acid ใน ethanol และทำให้เสถียรโดยใช้กลอสโรฟอร์ม ซึ่งเยื่อแผ่นชนิดนี้มีการสูญเสียน้ำลดลงและมีความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้นเป็น $0.4-0.6 \text{ kWm}^{-2}$ เยื่อแผ่นนี้จัดเป็นเยื่อแผ่นชุดแรกที่มีความแข็งแรงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ทั้งในสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งเยื่อแผ่นนี้ได้ถูกนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในยานอวกาศ Gemini 7 ในปี ค.ศ. 1964 แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นนี้สามารถใช้งานได้ยาวนานแค่ 500 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60°C

เพราะเกิดการเสื่อมสภาพของพันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนตรงตำแหน่งอัลฟา ในโครงสร้างของเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ ภายหลังจากการปรับปรุงเยื่อแผ่นให้มีโครงร่างตาข่ายพบว่าเยื่อแผ่นที่ผลิตได้นี้มีอายุการใช้งานนานขึ้นเป็น 1000 ชั่วโมง (สุภาภรณ์, 2543)

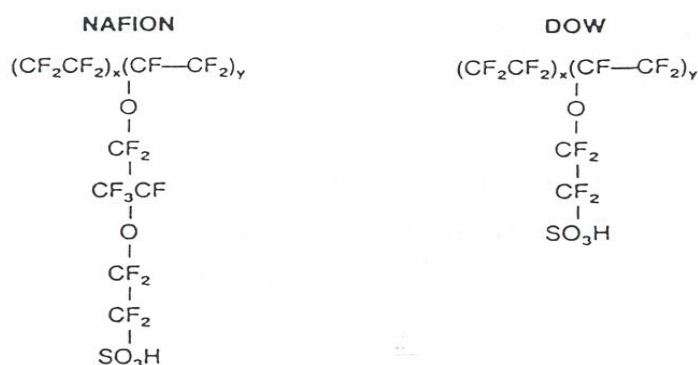
เยื่อแผ่นชุดถัดมา คือ เยื่อแผ่นซึ่งผลิตได้จากโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ของกรด α - β , β trifluorostyrene sulfonic acid เยื่อแผ่นชนิดนี้มีความเสถียรทางเคมีและทางความร้อน แต่ยังมีจุดอ่อนในด้านสมบัติทางกายภาพ ต่อมาเยื่อแผ่นชนิดนี้ได้ถูกปรับปรุงโดยการผสมพอลิเมอร์ที่ผลิตจากกรดเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคเข้ากับพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride) โดยใช้ตัวพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่เป็นไตรเอทิลฟอสเฟต (Triethyl phosphate) เยื่อแผ่นนี้สามารถใช้ได้นาน 2000 ชั่วโมงที่ 80°C

ประมาณปี ค. ศ. 1968 บริษัท DuPont ได้พัฒนาเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน Nafion[®] ได้จากการทำปฏิกิริยาของเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene) กับ SO_3 เพื่อให้ได้ไซคลิกซัลโทน (Cyclic sultone) จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับเฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน-อีพ็อกไซด์ (Hexafluoropropylene epoxide) จำนวน $m+1$ โมเลกุล โดยที่ $m > 1$ ผลึกภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาล้างต้นถูกนำไปให้ความร้อนร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต จะเกิดเป็นซัลโฟนิลฟลูออไรด์ไวนิลอีเทอร์ (Sulfonyl fluoride vinyl ether) จากนั้นนำไปทำโคพอลิเมอร์ไรซ์กับเตตระฟลูออโรเอทิลีน เพื่อให้ได้เรซินซึ่งสามารถขึ้นรูปให้เป็นแผ่นหรือท่อ ขั้นตอนสุดท้าย คือ การนำแผ่นพอลิเมอร์นี้ไปทำไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (Base hydrolysis) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น Nafion[®]

การเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลของพอลิเมอร์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ โดยการฝังตะแกรงที่ทำมาจากพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoro ethylene, PTFE) ลงในเยื่อแผ่นหรือการใช้ตัวรองรับมาหนุนด้านหลังของเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นที่มีแผ่นรองรับ (Supported Nafion[®] membrane) จะสามารถทนความแตกต่างของความดันได้มากกว่า 70 บรรยากาศ และสามารถทำงานที่ความดันสูงถึง 200 บรรยากาศ เยื่อแผ่น Nafion[®] ทั้งภาวะแห้งและเปียกจะมีความเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชันภายใต้ช่วงอุณหภูมิ $25 - 150^{\circ}\text{C}$ สมบัติการนำไอออนของเยื่อแผ่นที่มีน้ำหนักเทียบเท่า 1100 จนถึง 1500 จะมีค่าสูง

บริษัท Dow Chemical ได้พัฒนาเยื่อแผ่นชนิดใหม่แต่ยังคงจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ของเปอร์ฟลูออริเนต ไอโอโนเมอร์ (Perfluorinated ionomers) วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาเยื่อแผ่นแบบใหม่ คือ การผลิตเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับอุตสาหกรรมคลอโร-อัลคาไลน์ (Chloro-alkali

industry) ผลการทดสอบพบว่าเยื่อแผ่นชนิดใหม่นี้มีสมรรถนะสูงและทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตดังกล่าวสูงขึ้นกว่าเยื่อแผ่น Nafion® พอลิเมอร์ชนิดใหม่นี้มีโครงสร้างโมเลกุลหลักเหมือนพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน Nafion® แต่สายโซ่โมเลกุลด้านข้าง (Side chain) ซึ่งมีกลุ่มกรดซัลโฟนิกอยู่จะสั้นกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลของเยื่อแผ่น Nafion® ที่ผลิตโดยบริษัท DuPont

กับเยื่อแผ่นฟลูออโรซัลโฟเนตไอโอโนเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical

ที่มา : สุภาภรณ์ (2543)

พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical จะมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนที่คล้ายคลึงกับ Nafion® แต่เยื่อแผ่นชนิดนี้จะมีค่าความรุนแรงของกรด (Acid strength) ที่สูงกว่าและมีค่าน้ำหนักเทียบเท่าต่ำกว่า แม้ว่าเยื่อแผ่นของ Dow จะมีค่าน้ำหนักเทียบเท่าที่ต่ำกว่า แต่ค่าความแข็งแรงเชิงกลของเยื่อแผ่นกลับมีค่าสูง และไม่เกิดการเห็งอย่างรุนแรง ในขณะที่ถ้าเป็น Nafion® ที่มีค่าน้ำหนักเทียบเท่าที่เท่ากันแล้ว Nafion® จะเกิดเป็นพอลิเมอร์เจล (Gelled polymer) ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเชิงกลต่ำ พอลิเมอร์ของ Dow จะดูค่าน้ำหนักน้อยกว่า Nafion® ถึง 50 เท่า แต่จะสามารถนำไอออนได้ดีเท่ากับ Nafion® โดยมีค่าการแพร่ซึมผ่านได้ของก๊าซ (Permeability) ต่ำ พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Dow จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่สูงกว่า 165°C เมื่อเทียบกับที่ 110°C ของ Nafion® ดังนั้นเยื่อแผ่นที่ผลิตโดยบริษัท Dow จะสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า ($>100^\circ\text{C}$)

3. สมบัติของเยื่อแผ่นในเซลล์เชื้อเพลิง

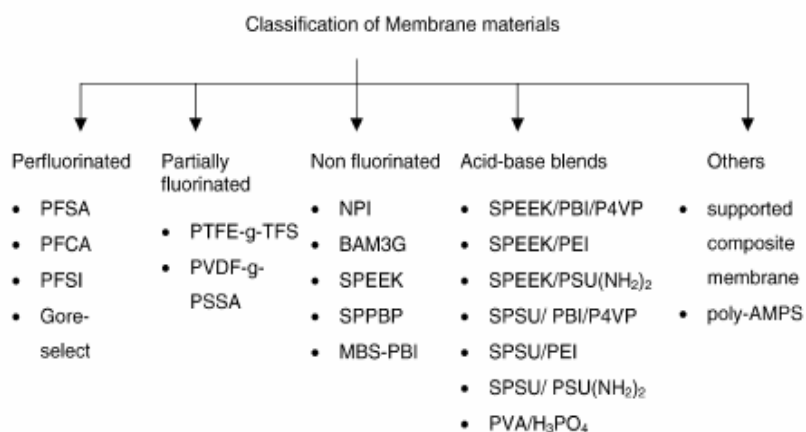
คุณสมบัติที่สำคัญของเยื่อแผ่นที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่

- มีการนำกระแสสูง เพื่อให้ได้กระแสสูงจะต้องมีความต้านทานต่ำ
- มีความแข็งแรงและมีความเสถียรสูง
- มีความเสถียรทางเคมีและไฟฟ้าเคมีภายใต้เงื่อนไขการใช้งาน
- มีการควบคุมความชื้นภายในเซลล์ที่ดี
- มีการรั่วซึมของเชื้อเพลิง ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ต่ำ
- มีความคุ้มค่าในการประยุกต์ใช้งานเมื่อเทียบกับมูลค่าในการผลิต

นอกจากที่เราสนใจด้านการสังเคราะห์พอลิเมอร์เพื่อใช้งานอย่างหลากหลายแล้วยังพบว่าเหตุผลหลักก็เพื่อเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงและการถ่ายโอนซึ่งพบว่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ และพื้นที่ผิวด้วย

วัตถุดิบที่ใช้ในสังเคราะห์เยื่อแผ่น

ภาพที่ 5 เป็นการจำแนกวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์เยื่อแผ่นที่ใช้ใน PEMFC ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 กลุ่ม คือ perfluorinate ionomers, partially fluorinate polymers, non-fluorinate membrane with aromatic backbone, non-fluorinate hydrocarbons and acid-base blends



ภาพที่ 5 แผ่นผังชนิดของวัตถุดิบที่ใช้สังเคราะห์เยื่อแผ่น

ที่มา : Smitha et al. (2005)

ในตารางที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบโครงสร้าง และสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของเยื่อ และประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นแต่ละชนิด จากตารางเราจะสังเกตได้ว่า perfluorinated ionomers จะมีสมบัติที่ดีที่สุด ทำให้มีประยุกต์ใช้งานได้มากที่สุด (Smitha et.al., 2005)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบโครงสร้าง และสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของเยื่อแผ่น และประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นแต่ละชนิด

ชนิด	โครงสร้าง	คุณสมบัติ	ประสิทธิภาพ
Perfluorinated membranes	Fluorinated backbone like PTFE • Fluorocarbon side chain • Ionic clusters consisting of sulfonic acid ions attached to the side chains	• Membranes are strong and stable in both oxidative and reductive environments	• Membrane is durable upto 60,000 h • Proton conductivities in well humidified membranes are 0.2 S/cm at PEMFC operating temperatures • Cell resistance of $0.05\Omega\text{cm}^2$ for 100 μm thick membrane with voltage loss of only 50mV at 1 A/cm ² is achievable
Partially fluorinated membrane	• Fluorocarbon base • Hydrocarbon or aromatic side chain grafted onto the backbone, which can be modified	• Membranes are relatively strong in comparison to pf, but degrade fast	• Less durable than perfluorinated ones • Low performance • On suitable modification, yield membranes with comparable proton conductivities

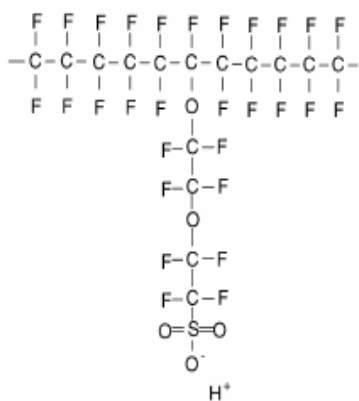
ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชนิด	โครงสร้าง	คุณสมบัติ	ประสิทธิภาพ
Non-fluorinated hydrocarbon membranes	Hydrocarbon base, typically modified with polar groups	- Membranes possess good mechanical strength - Poor chemical and thermal stability	- Poor conductors of protons - Exhibit low durability on account of swelling obtained by incorporation of polar groups into the polymer matrix
Non-fluorinated aromatic membranes	Aromatic base, typically modified with polar/sulfonic acid groups	- Good mechanical strength - Chemically and thermally stable even at elevated temperatures	- Good water absorption - Relatively high proton conductivity is attainable - Conductance of SPPBP at 65 mol% of sulfonation is 10^{-2} S/cm that is retained at temperatures above 100 °C
Acid–base blend membranes	Incorporation of acid component, into an alkaline polymer base	- Stable in oxidizing, reducing and acidic environments - High thermal stability	- Good dimensional stability - Exhibit proton conductivity comparable to Nafion® - Durability of the membranes is still to be proven

1. เยื่อแผ่นแนฟฟิออน

โครงสร้างของแนฟฟิออนจะประกอบด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ polytetrafluoroethylene และส่วนที่ชอบน้ำเป็นสายโซ่ของ perfluorinate vinyl ether โดยส่วนปลายจะเป็นส่วนที่ประกอบด้วยหมู่ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออน (Nikhil et al., 2005) โดยทั่วไปเยื่อแผ่น Nafion® จะทนต่อการกัดเซาะ และตัวออกซิแดนท์ และเยื่อแผ่นนี้จะสามารถนำไอออนไฮโดรเนียม (Hydronium ions) ได้ เมื่อน้ำอยู่ในเยื่อแผ่นประมาณ 20% โดยน้ำหนัก เยื่อแผ่นดังกล่าวสามารถสร้างเป็นแผ่นที่มีความกว้าง 120 เซนติเมตร โดยไม่จำกัดความยาว และมีความหนาเท่ากับ 7 mils (หรือ 175 ไมครอน) ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ขายในท้องตลาด จะมีชื่อเรียกตามหมายเลข เช่น Nafion® 1170 เมื่อเลขสองหลักแรก คือ คำนวณน้ำหนักเทียบเท่าหารด้วย 100 และตัวเลขสองตัวหลัง คือ ความหนาเป็น mils ที่คูณด้วย 10 (หมายเหตุ : น้ำหนักเทียบเท่า คือ อัตราส่วนของน้ำหนักของพอลิเมอร์ต่อจำนวนโมลของกลุ่มซัลโฟนิค)

พอลิเมอร์ที่ใช้จะต้องเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง โดยโครงสร้างของ perfluorinate จะต้องมีส่วน sulfonic acid group ที่นิยมใช้กันจะมาจากบริษัท DuPont ที่มีชื่อทางการค้าว่า Nafion® ซึ่งคล้ายกับพอลิเมอร์ชนิด Flemion® ที่ผลิตจากบริษัท Asahi Glass และ Aciplex-s® ที่ผลิตโดยบริษัท Asahi chemical เมื่อเทียบเยื่อแผ่นทั้ง 3 ชนิดจะพบว่า Nafion® จะมีประสิทธิภาพในการนำโปรตอนดีที่สุดและมีความแข็งแรงสูงสุดด้วยจะมีโครงสร้างดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของ Nafion®

ที่มา : Smitha et al. (2005)

สารละลายแนฟฟิออนที่ใช้ในทางการค้าปัจจุบันจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากัน โดยจะมีแนฟฟิออนผสมอยู่ 5, 10 และ 20% ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ชนิดและความหนาของแนฟฟิออนที่ใช้ในปัจจุบัน

ชนิดของแนฟฟิออนที่ใช้ในปัจจุบัน	ความหนาที่เตรียมได้
NR 111 และ NR 112 (1100 EW)	1 และ 2 มิลลิเมตร
N 112, N 1135, N 115 และ 117	2-7 มิลลิเมตร
N 1035 และ N 105	3.5 และ 5.0 มิลลิเมตร

ที่มา: Banerjee and Curtin (2004)

2. การถ่ายโอนภายในเยื่อแผ่นแนฟฟิออน

ปริมาณน้ำภายในเยื่อแผ่นจะเป็นตัวบ่งชี้สำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อแผ่น Nafion[®] ที่อุณหภูมิการใช้งานมากกว่า 1000 °C การคงอยู่ของน้ำจำนวนโปรตอนและหมู่ซัลเฟต จะอยู่ในสภาพของสารละลายที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการนำโปรตอน

การที่จะเข้าใจการถ่ายโอนของน้ำภายในเซลล์เยื่อแผ่น perfluorosulfonic acid รูปแบบที่ศึกษาและนำไปสนับสนุนการนำโปรตอนไม่เฉพาะเยื่อแผ่นเชิงประกอบ โดยจะขึ้นอยู่กับ กลศาสตร์สถิติ (statistical mechanics) พลศาสตร์ระดับโมเลกุล (molecular dynamic) และปรากฏการณ์ระดับมหภาค (macroscopic phenomena) เพื่อที่จะปรับปรุงให้ใช้ได้กับโครงสร้างระดับจุลภาค รวมถึงการเข้าใจกระบวนการดูดซึมและการนำภายในเยื่อแผ่นในระดับจุลภาค การกระจายที่ไม่สม่ำเสมอของรูพรุนและสนามไฟฟ้า

Gierke and Hsu (1982) กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและการถ่ายโอนสำหรับการบวมตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำภายในรูพรุนภายในเยื่อแผ่น ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภายใต้เงื่อนไขในการทดลองที่แตกต่างกันนำไปสู่ภาพแบบที่ยอมรับและใช้ในการอธิบายสำหรับเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพของโครงสร้างขนาดเล็ก ซึ่งตำแหน่งของการแลกเปลี่ยนไอออนจะแยกออกจาก fluorocarbon backbone ดังนั้นการก่อตัวของรูพรุนจะอยู่ในรูปของคลัสเตอร์ทรงกลม ซึ่งจะเชื่อมกันอยู่ในลักษณะของช่องแคบสั้นๆ จึงเรียกว่า “โครงข่ายคลัสเตอร์” เมื่อเยื่อแผ่นแห้งคลัสเตอร์จะมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง

โดยเฉลี่ย 1.8 nm และประกอบด้วยหมู่ซัลเฟต 26 หมู่อยู่ในผิวของรูพรุน และเมื่อเยื่อแผ่นแห้งจะประกอบด้วยหมู่ซัลเฟตมากถึง 70 หมู่ ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวจะต้องมีการเติมน้ำ 1000 โมเลกุลในแต่ละรูพรุนและการเชื่อมของแต่ละช่องแคบจะห่างกันประมาณ 1 nm ซึ่ง Gierke และ Hsu ได้ใช้ทฤษฎีการซึมผ่านของน้ำอธิบายความสัมพันธ์ของการนำไฟฟ้ากับปริมาณน้ำภายในเยื่อแผ่น ทำให้สามารถหาค่าการนำโปรตอนตอนได้ดังสมการ (6) และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับทางทฤษฎีพบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกัน

$$\text{ค่าการนำโปรตอน, } \sigma = \sigma_0 (C-C_0)^n \quad (6)$$

เมื่อ C = volume fraction of aqueous phase

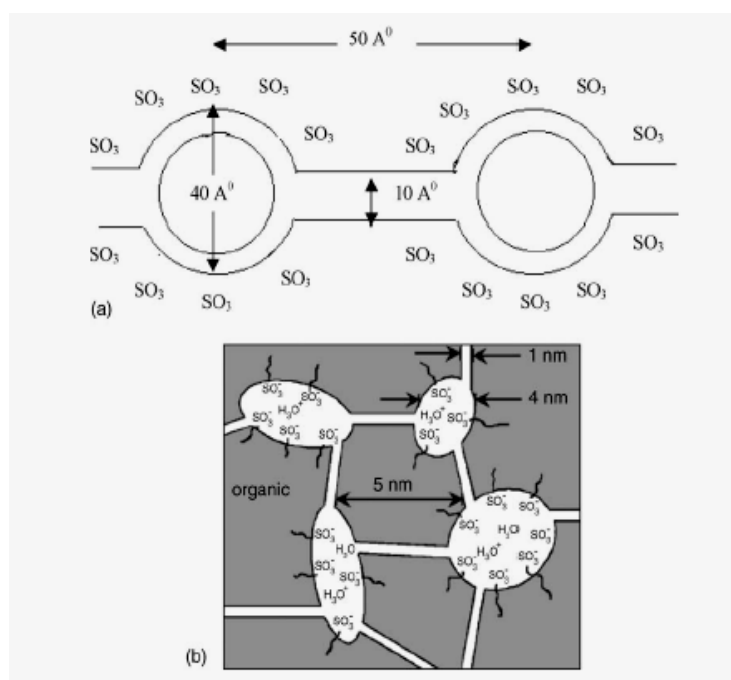
C_0 = ปริมาณน้ำภายในเยื่อแผ่น

n = ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง ถ้าเป็น 3 มิติ $n=1.5$)

σ_0 = ค่าการนำโปรตอนเริ่มต้น

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของโปรตอนโดยน้ำเป็นส่วนประกอบอธิบายโดยใช้ “แบบจำลองโครงข่ายคลัสเตอร์” โดยรูปแบบนี้จะรวมตำแหน่งกลางที่อยู่ระหว่างช่องว่างสุดท้ายกับ sulfonic acid group โดยจะสร้างพันธะไฮดรอกซิลกับ perfluorinated backbone โดยตำแหน่งของไฮดรอกซิลจะอยู่แบบกระจายกระจายในพอลิเมอร์ ซึ่งโปรตอนจะเคลื่อนอยู่ในตำแหน่งนี้ จึงกล่าวได้ว่าตำแหน่งนี้ทำให้มีการเคลื่อนที่ของโปรตอนเกิดขึ้น แผนภาพแสดงคลัสเตอร์และการกระจายตัวของไฮดรอกซิลแสดงดังภาพที่ 7

ทางหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงความต้านทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำ (water drag) คือการทำให้เยื่อแผ่นมีความหนาแน่นขึ้น เพื่อที่จะลดค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นที่ทำให้การนำโปรตอนแย่งนอกจากการลดความหนาของเยื่อแผ่นจะเป็นการเพิ่มค่าการนำโปรตอนแล้วยังลดต้นทุนและทำให้สมบัติการดูดซับน้ำดีขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการที่จะลดความหนา ก็มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความแข็งแรงและการเกิดรั่วซึมของก๊าซเชื้อเพลิง แนวทางการลดความหนาของเยื่อแผ่นให้มีผลกระทบน้อยที่สุด คือการควบคุมตำแหน่งที่เป็นกรดหรือเพิ่มความหนาแน่นของประจุในโครงสร้างของเยื่อแผ่น ดังนั้นจึงต้องมีการใช้วัสดุคิบบที่มีค่าการนำโปรตอนสูงๆ ซึ่งได้จากการสังเคราะห์หรือทำให้อยู่ในสภาพเยื่อแผ่นเชิงประกอบ ตัวอย่างเช่นการสังเคราะห์จาก sulfonate polystyrene หรือ poly(phenylene oxide) ทำการขึ้นแผ่นโดยใช้สารละลายคลอโรฟอร์มและเมทานอล (Smitha et.al., 2005)



ภาพที่ 7 (a) โครงสร้างภายในของเมมฟฟอน (b) แบบจำลองโครงข่ายคลัสเตอร์

ที่มา : Smitha et al. (2005)

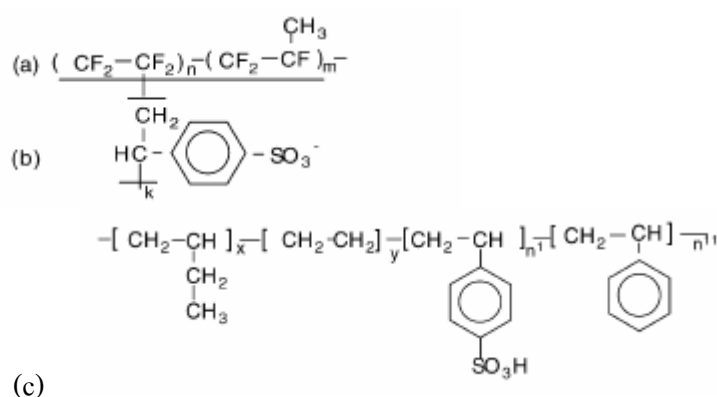
4. ข้อจำกัดของเมมฟฟอน

ข้อเสียของเยื่อแผ่นแบบ Perfluorosulfonic acid (PFSA) คือมีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง ประมาณ 700 US\$/m² ในด้านความปลอดภัยระหว่างการใช้งานจะต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการใช้งาน และอุปกรณ์ช่วยควบคุมอุณหภูมิ ด้านความปลอดภัยจากสารพิษและก๊าซกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 °C ก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง รวมถึงการเสื่อมสลายของผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการหรืออุบัติเหตุจากยานยนต์และข้อจำกัดจากการหมุนเวียนใช้เซลล์เชื้อเพลิง การเสื่อมสลายของเยื่อแผ่นแบบ PFSA ที่อุณหภูมิสูงเป็นปัญหาสำคัญ โดยค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิ 80 °C จะลดลงมากกว่า 10 เท่าเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 60 °C เพราะว่าการถ่ายโอนโปรตอนจะสัมพันธ์กับการสูญเสีย

เมมฟฟอนยังคงเป็นพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEFC และ DMFC แต่อย่างไรก็ตามเชื่อว่าน่าจะมีพอลิเมอร์ชนิดอื่นมาใช้แทนเมมฟฟอนเพื่อกำจัดข้อเสียต่างๆ ของเมมฟฟอน แต่ต้องคำนึงถึงอายุการใช้งานและสมบัติความคงทนด้วยจึงมีผู้ที่จะพัฒนาเยื่อแผ่นจากสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอนทั้งแบบโซ่ตรงและแบบเป็นวงแหวน เป็นต้น

5. เยื่อแผ่นไฮโดรคาร์บอน

ข้อดีของเยื่อแผ่นแบบนี้ คือ มีราคาถูกและสามารถทำให้มีขั้วได้ง่าย ทำให้สามารถดูดน้ำได้ดี ตัวอย่างของเยื่อแผ่นไฮโดรคาร์บอนที่ใช้แทนแนฟฟิออน เช่น Perfluorocarboxylic acid, Bis (perfluoroalkylsulfonyl) Imide, Sulfonated naphthalenic polyimide membrane และ Sulfonated poly (4-phenoxybenzoyl-1,4-phenylene) (SPPBP) เป็นต้น ตัวอย่างโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ตัวอย่างโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ (a) FEP main

(b) sulfonated polystyrene side chain (c) poly (butadiene styrene)

6. เยื่อแผ่นอะโรมาติกพอลิเมอร์

วิธีที่จะเพิ่มความเสถียรของอะโรมาติกพอลิเมอร์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสามารถทำได้โดย

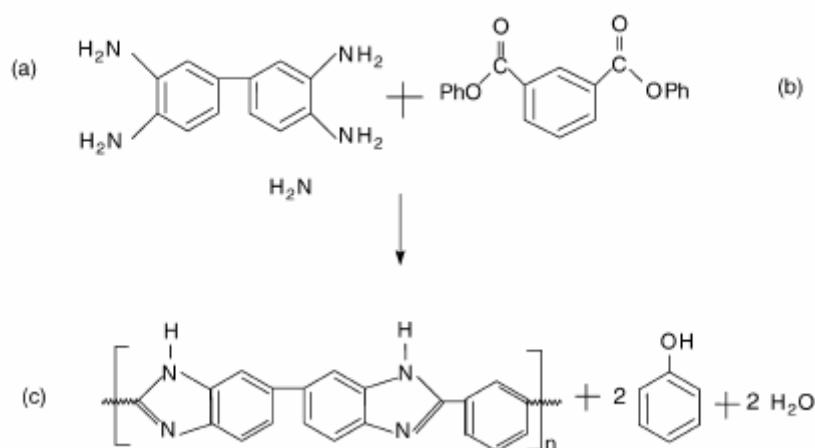
- การรวมเข้าด้วยกันของสายโซ่หลักไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์
- ปรับปรุง bulk group ของพอลิเมอร์ในสายโซ่หลักให้เหมาะสำหรับการนำโปรตอน

Polyarylene ที่อุณหภูมิสูงจะเป็นผลึกพอลิเมอร์ที่ T_g มากกว่า $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ วงแหวนอะโรมาติกสามารถที่จะเกิด electrophilics ได้ดีพอๆ กับ nucleophilic substitution เช่น Polyethersulfonates (PESF), Polyether ketone (PEK) และอื่นๆ จากการศึกษาพบว่า polyether ไม่ควรใช้เพราะว่าหมู่เอสเทอร์จะไม่เสถียรในสารละลายกรดขณะที่ polyaromatics มักจะถูกนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงเพราะมีความเสถียรทางความร้อน ลักษณะพิเศษของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมนอกจากจะทนความร้อนแล้วยังต้องเสถียรกับการเกิดออกซิไดซ์และการรีดิวส์ ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดด้วย ตัวอย่างอะโร

มาดิกพอลิเมอร์ที่มีการปรับปรุงแล้ว เช่น Sulfonated polystyrene, Hydrogenated poly(badiene-styrene) (HPBS), Polystyrene graft polymer, Sulfonate polysulfone เป็นต้น

7. เยื่อแผ่นเชิงประกอบกรด-เบส

เยื่อแผ่นเชิงประกอบกรด-เบส (Acid-base complex, ABC) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับเยื่อแผ่นที่สามารถรักษาค่าการนำโปรตอนได้ดีที่อุณหภูมิสูงโดยปราศจากผลที่เกิดจากการสูญเสีย น้ำ โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเชิงประกอบกรด-เบส ที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง จะเป็นการรวมกันของกรดในพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดการนำโปรตอน เช่น poly (2,2-(*m*-phenylene)-5, 5-benzimidazole) /phosphoric acid (PBI/ H_3PO_4) โดยโครงสร้างของสารตั้งต้น และ PBI แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โครงสร้างของสารตั้งต้น (a) tetraaminobiphenyl, (b) diphenylisophthalate และ (c) poly [2,2'-(*m*-phenylene)-5,5' bibenzimidazole]

ที่มา : Smitha et al. (2005)

Qingfeng et al. ศึกษาลักษณะเฉพาะของกรดฟอสโฟริกที่โดปด้วย PBI ในอัตราส่วนโดยโมลกรดอ่อนต่อจำนวนพอลิเมอร์ สังเกตได้ว่าค่าการนำโปรตอนของกรดฟอสโฟริกจะไม่ขึ้นกับความชื้นเมื่อเทียบกับแนฟฟิออน และขึ้นกับปริมาณการโดป โดยเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้งานกับเยื่อแผ่นกรดฟอสโฟริกที่โดปด้วย PBI จะทำงานที่อุณหภูมิ 190°C ความดัน 1 บรรยากาศ ความหนาแน่น

กำลัง 0.55 W/cm^2 และความหนาแน่นกระแส 1.2 A/cm^2 ลักษณะเฉพาะอื่นที่สำคัญคือค่า electro-osmotic drag coefficient (EODC) ซึ่ง PBI/ H_3PO_4 จะมีค่า EODC เท่ากับ 0 แต่เยื่อแผ่นแนฟฟิออนจะมีค่าเท่ากับ 3.2 ซึ่งค่า EODC มีผลต่อการนำโปรตอนด้วย สำหรับกลไกการเคลื่อนที่ของโปรตอนใน PBI/ H_3PO_4 สามารถอธิบายด้วยกลไกของ Grotthuss คือ การนำโปรตอนของ PBI/ H_3PO_4 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g และความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล โดยพบว่าเมื่อการโคปมากขึ้นจะทำให้ช่องว่างระหว่างคลัสเตอร์ของตำแหน่งของกรดลดลงและมีไฮออนลบครั้งหนึ่งที่สนับสนุนการเคลื่อนที่ของโปรตอน

Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC) ที่ทำการโคปด้วย PBI 500% จะมีค่าความหนาแน่นกำลังสูงสุด 25 W/cm^2 ความหนาแน่นกระแส 700 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิ 150°C มีการซึมผ่านของก๊าซต่ำ เกิดการออกซิไดซ์ที่ดีและมีความเสถียรทางความร้อนที่อุณหภูมิ 200°C อย่างไรก็ตามระบบนี้จะเสถียรในช่วงการทดลอง 200 ชั่วโมงและน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะยังคงอยู่ในเซลล์ทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพของเยื่อแผ่น สรุปได้ว่า PEFC ที่โคปด้วย PBI จะสามารถใช้งานได้ที่มีความชื้นต่ำเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นแนฟฟิออน ตารางที่ 5 แสดงตัวอย่างเยื่อแผ่นเชิงประกอบกรด-เบส และภาพที่ 10 แสดงโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เป็นกรดและเบส

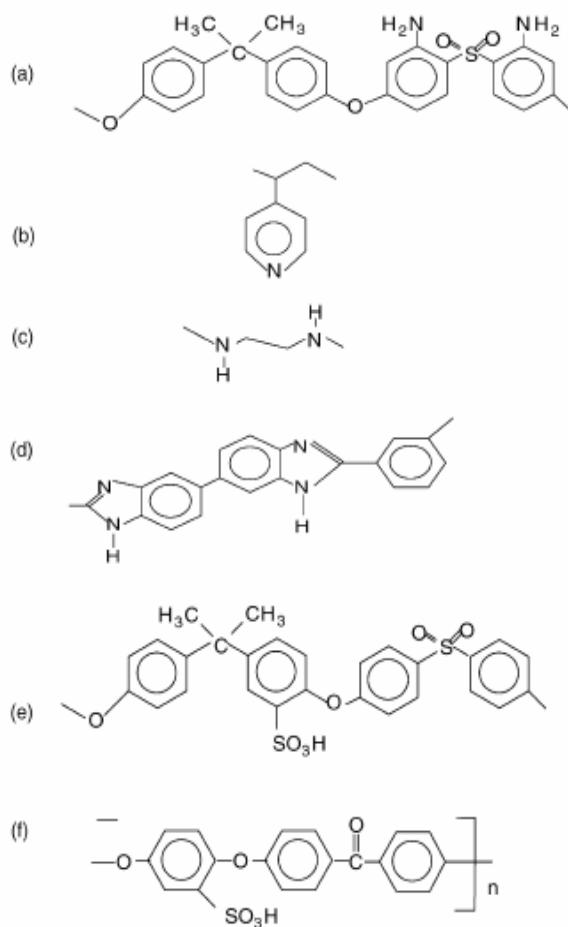
ตารางที่ 5 ตัวอย่างเยื่อแผ่นเชิงประกอบกรด-เบส

Membrane materials	Blend ratio	สมบัติทางกายภาพ
SPEEK ^a /PBI	90/10	ทนอุณหภูมิสูงถึง 350°C
PVA ^b / H_3PO_4	Highly doped	มีความแข็งแรงสูง ทนอุณหภูมิถึง 70°C
PBI/ H_2SO_4	500% doping	มีความแข็งแรงสูง ทนความร้อนได้ดี

เมื่อ a คือ sulfonated polyether ether ketone

b คือ polyvinyl alcohol

ที่มา: Smitha et al. (2005)



ภาพที่ 10 โครงสร้างพอลิเมอร์ที่เป็นเบส (a-d) และกรด (e-f)

ที่มา: Smitha et al. (2005)

การพัฒนาเยื่อแผ่นในอนาคต

งานวิจัยทั่วโลกต่างต้องการที่จะหาพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่เหมาะสมและราคาไม่แพงแทนแนฟฟิออน สำหรับเยื่อแผ่นเชิงประกอบกรด-เบส (ตารางที่ 5) มีข้อดี คือทนอุณหภูมิสูง ทนการกัดกร่อนของกรดเบสในสภาวะแวดล้อมได้ดี อย่างเช่น sulfonated bisphenol-A-polysulfone (SPSU) หรือ sulfonated polyphenylene oxide (SPPO) จะเป็นวัตถุดิบในการทำเยื่อแผ่นเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิง SPSF และ SPPO สามารถที่จะเกิดการเชื่อมขวางแบบพันธะไฮออนิกกับสารพอลิเมอร์หลักจำพวก poly (ethyleneimine) (PEI) หรือ poly (benzimidazole) (PBI)

ได้ดี และจะได้เยื่อแผ่นเชิงประกอบกรด-เบสที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี ทนความร้อนและสารเคมีได้ดีจึงทำให้เกิดการนำโปรตอนที่ดีด้วย

การเชื่อมขวางสามารถทำได้เมื่อพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มทั้งวิธีทางเคมีและรังสี ซึ่งการเชื่อมขวางแบบนี้มีประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีความหนาและมีรูปร่างตามที่ต้องการ Macallum et al. (1984) ได้ทำการเชื่อมขวางโดยใช้รังสี โดยตัวอย่างจะได้รับรังสีแกมมาที่มีความหนาแน่นสูงทำให้พันธะระหว่าง C-H ที่ได้รับรังสีกลายเป็นอนุมูลที่ประกอบด้วยคาร์บอนแล้วเชื่อมสายโซ่ติดกันเป็นโครงร่างตาข่าย ซึ่งในการเชื่อมขวางจะต้องมีปริมาณการเชื่อมขวางที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้โครงสร้างแข็งเกินไปส่งผลให้การเคลื่อนที่ของไอออนลดลง และให้สามารถยืดหยุ่นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพของอิเล็กโทรด

สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วประเภทอีเทอร์มักนิยมใช้เป็นพอลิเมอร์หลักในพอลิเมอร์อีเล็กโตรไลต์ เนื่องจากความสามารถในการละลายไอออนที่ดี การที่สายโซ่มีความยืดหยุ่น มีเสถียรภาพทางเคมีสูง เสถียรภาพทางเคมีเป็นส่วนสำคัญอย่างมากสำหรับแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นพลังงานสูง เพราะที่ขั้วแอโนดและแคโทดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันสูง ตารางที่ 6 แสดงพอลิเมอร์หลักที่นำมาใช้เป็นพอลิเมอร์หลักในพอลิเมอร์อีเล็กโตรไลต์

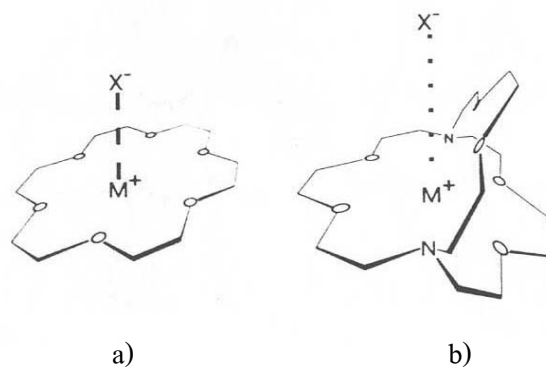
ตารางที่ 6 โคออดิเนตพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวทำละลายของแข็งในพอลิเมอร์อีเล็กโตรไลต์

Name	Monomer unit
Poly(propylene oxide)	$[\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{O}]_n$
Poly(ethylenimine)	$(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH})_n$
Poly(alkylene sulfides)	$[(\text{CH}_2)_p\text{S}]_n$
Poly(ethylene succinate)	$[\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OC}(\text{O})\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C}(\text{O})]_n$
Poly(N-methylaziridine)	$[\text{CH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)]_n$
Poly(epichlorohydrin)	$[\text{OCH}_2\text{CH}(\text{CH}_2\text{Cl})]_n$
Poly(vinyl acetate)	$[\text{CH}_2\text{CH}(\text{OC}(\text{O})\text{CH}_3)]_n$
Poly[bis(methoxyethoxy)phosphazene]	$[\text{NP}(\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_2\text{CH}_3)_2]_n$
Oxymethylene-linked poly(oxyethylene)	$[(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_m\text{CH}_2\text{O}]_n$

การใส่โมเลกุลขนาดเล็กเข้าไปในพอลิเมอร์อีเล็กโตรไลต์สามารถทำให้ค่าการนำไอออนเพิ่มขึ้นอย่างมาก (Abraham and Alamgir, 1990) โครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมตัวทำละลายร่วมที่มีขั้วและสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ในงานวิจัยส่วนใหญ่ มักใช้โมเลกุลที่มีขั้วขนาดเล็ก เช่น โพรพิลีนคาร์บอเนต (Propylene carbonate) ตัวอย่างเช่น พอลิอะคริไนด์ไนไตรล์ (Poly(acrylonitrile)) และพอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (Poly(vinyl pyrrolidone)) เป็นพอลิเมอร์หลักสำหรับโพรพิลีนคาร์บอเนต ซึ่งเมื่อรวมกับเกลือลิเทียมเพอร์คลอเรต (LiClO_4) จะมีค่าการนำไอออนสูงขึ้นมาก คือ 1.7×10^{-3} ที่ 20°C และ 1.1×10^{-3} ที่ -10°C (Abraham and Alamgir, 1990) โมเลกุลขนาดเล็กนี้จะทำหน้าที่ 2 ประการ คือ ทำให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น และช่วยในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ของพอลิเมอร์หลัก รวมทั้งสามารถละลายไอออนบวกได้ (ทำให้ลดอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับไอออน)

การเติมอนุภาคนาขนาดเล็ก (ระดับไมครอน) จำพวกสารประกอบฟอสเฟตของโลหะหมู่ IV เช่น zirconium phosphate (ZrP) และ tinphosphate (SnP) ในพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มการนำโปรตอน การเติมเพื่อที่จะดักตะกอนสารละลาย M(IV) ions ข้อดีคือ กำจัดวัตถุขุ่นในการเตรียมเยื่อแผ่นที่ไม่ละลายและช่วยในการผสมของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในระดับโมเลกุล เพื่อให้มีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นที่มาจากสารอินทรีย์เท่านั้น และจะสังเกตได้ว่าการนำโปรตอนจะเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของโปรตอนบนพื้นผิวของวัตถุขุ่นที่นำโปรตอน ดังนั้นการเติมอนุภาคนาขนาดเล็กจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจึงเป็นการเพิ่มการนำโปรตอนด้วย

การเติมสารคีเลตที่มีโมเลกุลขนาดเล็กในพอลิเมอร์อีเล็กโตรไลต์เพื่อวัตถุประสงค์ดังที่กล่าวมาแล้ว เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) และ ไชคลิกพอลิอีเทอร์ (Cyclic polyether) ซึ่งสารนี้สามารถทำให้เกิดสารเชิงซ้อนที่ดีสำหรับไอออนบวกของโลหะแอลคาไลน์ สารทั้งสองนี้ คือ โมโนไชคลิกคราวน์อีเทอร์ (Monocyclic crown ether) และไบไชคลิกคริปแทนด์ลิแกนด์ (Bicyclic cryptand ligand) ดังแสดงในภาพที่ 11 คราวน์อีเทอร์ไม่สามารถกักไอออนบวกจากไอออนลบได้ แต่สารเชิงซ้อนของคริปแทนด์กับเกลือสามารถกักไอออนลบได้



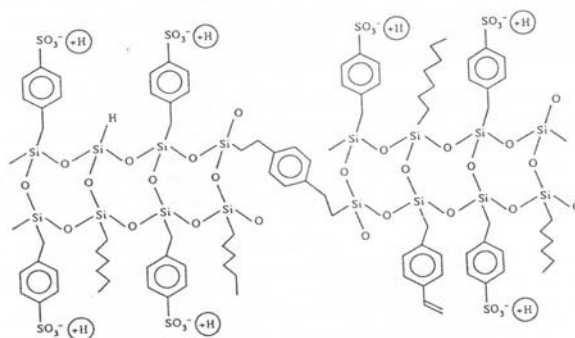
ภาพที่ 11 การโคออดิเนตไอออนบวกโดย a) crown ethers b) bicyclic creptands

เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารอนินทรีย์ซึ่งเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) ซึ่งประกอบด้วย $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ต่อกันเป็นโครงข่าย 3 มิติรูปทรง tetrahedral ภายในโครงข่ายมีน้ำและไอออนบวกของโลหะหมู่ IA และ IIA อยู่ภายในช่องว่าง โครงสร้างของซีโอไลต์มีลักษณะพิเศษ คือ มีช่องเปิดต่อเนื่องขนาดค่อนข้างคงที่และอยู่ในระดับโมเลกุล จึงสามารถนำไปใช้เป็นตัวกรองโมเลกุล (molecular sieve) ได้นอกจากนั้นยังเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยจะมีประจุเป็นลบจากการต่อหน่วยโครงข่ายย่อยของ $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ จึงสามารถจับไอออนบวกไว้ในโครงข่าย ถ้าซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ไอออนบวกจะเป็น Na^+ ซึ่งจะถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกอื่นๆ ได้ (ใช้เป็น ion exchanger) ตัวอย่างเช่น แลกเปลี่ยนกับ H^+ ทำให้ตัวมันมีความเป็นกรดและเป็นแหล่งให้โปรตอนได้ จึงถูกใช้อย่างมากในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับปิโตรเลียมและปิโตรเคมี (Janjic and Scurrall, 2002; Patrigeon et al., 2001; Phu et al., 2001 and Dehertog and Froment, 1999) ค่าความเป็นกรดจะขึ้นกับจำนวน Al อะตอมในโครงข่าย ในโครงการวิจัยที่เสนอจึงมีแนวคิดที่จะเติมซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ ลงในแนฟฟิออน โดยหวังว่าจะช่วยเพิ่มค่าการนำโปรตอนจากความสามารถในการให้โปรตอนของซีโอไลต์และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นโดยไม่ต้องเพิ่มความชื้น เพราะซีโอไลต์มีความสามารถจับน้ำได้ดี และทำให้เยื่อแผ่นมีความคงทนและแข็งแรงมากขึ้น

ตัวนำโปรตอน

ตัวนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพอลิเมอร์อีเล็กโตรไลต์จะมีลักษณะเช่นเดียวกับอีเล็กโตรไลต์ประเภทอื่นๆ คือ มีทั้งในสถานะของเหลวและของแข็ง การนำโปรตอนนั้นมีความแตกต่างจาก

ไอออนอื่นๆ เนื่องจากการมีความเป็นโพลาริซสูง พอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ที่สามารถนำโปรตอนได้ เช่น สารเชิงซ้อนของพอลิเอทิลีนออกไซด์กับกรดฟอสฟอริกที่มีค่าการนำไอออนเท่ากับ 4×10^{-5} S/cm (Donoso et al., 1988) สารเชิงซ้อนของพอลิเอทิลีนไอมีน (Poly(ethylene imines)) ทั้งสายโซ่ตรง และที่มีกิ่งกับกรดฟอสฟอริกหรือซัลฟิวริก (Daniel et al., 1988) สารเชิงซ้อนที่น่าสนใจชนิดหนึ่ง คือ ออโมซิล (Ormosils) ซึ่งได้จากการเปลี่ยนแปลงซิลเลนอิเล็กโตรไลต์ (Silane electrolyte) สารเซรามิกนี้สามารถเตรียมโดยวิธีโซล - เจล (Sol - gel route) ซึ่งมีเสถียรภาพทางเคมีและความร้อน ทำให้สามารถใช้ได้ในเซลล์เชื้อเพลิงเมทานอล เช่นเดียวกับอิเล็กโตรไลต์ที่ผลิตจากเบนซิลซัลโฟนิกแอซิดไซลอกเซน (Benzyl sulfonic siloxane) ดังแสดงในภาพที่ 12 (Goutier และคณะ 1992) ค่าการนำไอออนเท่ากับ 10^{-2} S/cm ที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 12 เยื่อแผ่นนำโปรตอนชนิด Benzyl sulphonic acid siloxane

1. กลไกการนำไอออนในตัวนำโปรตอน (Bruce, 1995)

เนื่องจากการที่โปรตอนมีขนาดเล็กและพลังงานในการเกิดโพลาริซสูง กลไกการนำจึงแตกต่างไปจากไอออนชนิดอื่น (Poulsen, 1989 and Colomaban, 1992) ได้มีการสร้างกลไกหลายแบบเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ เช่น การนำเมื่ออยู่ในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+) และไฮโดรเนียม (H_3O^+) การผ่านของโปรตอนจะมีการเกิดพันธะไฮโดรเจน และการเคลื่อนที่โดยรวมกับโมเลกุลของน้ำที่อยู่ข้างเคียง ทำให้อยู่ในภาพของไฮโดรเนียมไอออน ตัวนำโปรตอนส่วนใหญ่ที่ถูกค้นพบในช่วงแรกจะต้องอยู่ในสภาพที่มีการไฮเดรตหรืออยู่ในเฟสที่ไม่มีความเสถียรทางความร้อน แต่ปัจจุบันนี้ได้มีการค้นพบวัสดุที่สามารถนำโปรตอนได้ที่อุณหภูมิ 500 - 1000 °C ใน Perovskite-like SrCeO_3

โครงสร้างของเบต้าอะลูมินา (β -alumina) และเกลือที่มีลักษณะคล้ายกัน สามารถใช้เตรียมเป็นอนุพันธ์ของไฮโดรเนียมหรือแอมโมเนียม โดยการแลกเปลี่ยนทางไอออน และวัสดุประเภทนี้

บางชนิดสามารถเป็นตัวนำโปรตอนที่ดีที่อุณหภูมิ 200 – 400 °C หรือจนกระทั่งเกิดการแตกสลาย เนื่องจากการสูญเสียน้ำหรือแอมโมเนีย

เมื่อเปรียบเทียบกับไอออนชนิดอื่นแล้วโปรตอนมีลักษณะเฉพาะในการสร้างพันธะ ดังนั้น การเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน ในวัสดุที่นำไอออนแต่ละชนิด ในวัสดุไอออนิก อะตอมของไฮโดรเจน จะสร้างออร์บิทัลของโมเลกุลกับไอออนลบที่มีสถานะเป็นตัวรับทางไฟฟ้าที่เสถียรกว่าระดับพลังงาน $H:1s$ เนื่องจากเป็นไอออนบวกที่เล็กที่สุด โปรตอนจึงมักจะสร้างพันธะร่วมกับไอออนลบ ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดสองตัว อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไอออนลบ (X) หรือไอออนจากไอออนลบ ที่อยู่ใกล้เคียงสองตัว จะถูกทำให้เสถียรด้วยการเคลื่อนที่จากไอออนลบ $X:p^6$ ไปยังที่ว่างของ $H^+:1s$ ซึ่งจะโพลาริซอิเล็กตรอนด้านนอกของไอออนลบที่อยู่ใกล้เคียงใกล้โปรตอน เพื่อลดผลของประจุบวก การเคลื่อนที่ของประจุนี้จะเพิ่มความแข็งแรง แต่ลดความยาวของพันธะ X-H ในกรณีที่ไอออนลบทั้งสองนี้ไม่เหมือนกัน โปรตอนจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่มีความเป็นขั้วที่มากกว่า

พันธะของไฮโดรเจนที่ไม่เหมือนกันมักจะเกิดขึ้นเสมอ แม้ว่าโปรตอนจะสร้างพันธะร่วมกับไอออนลบที่เหมือนกัน แรงผลักรหว่างพันธะระหว่างไอออนลบที่สร้างพันธะร่วมกันทั้งคู่ จะทำให้ไม่มีการแยก X-H-X ที่ใกล้กัน ดังนั้นการแข่งขันระหว่างไอออนลบที่เหมือนกันทั้งสอง เพื่อให้มีพันธะที่สั้นกว่าของ X-H อาจทำให้เกิดตำแหน่งของโปรตอนที่สมดุลระหว่างไอออนลบที่สร้างพันธะร่วม ในไอออนลบที่เป็นออกไซด์ การแยกของ O-H-O จะมากกว่า 2.4 อังสตรอม และพันธะไฮโดรเจนไม่สมมาตรซึ่งคือ O-H--O แม้ว่าการเคลื่อนที่ไปยังไอออนลบหนึ่ง อาจจะเหมือนว่าเท่ากับการเคลื่อนที่ไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง แต่ต้องมีอีกตำแหน่งหนึ่งที่มีค่า ΔH_f มากกว่าอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโปรตอนจากตำแหน่งตรงกลางของพันธะ

แรงผลักรหว่างพันธะพายที่น้อยกว่าระหว่างออร์บิทัล p ของไอออนลบจะทำให้การแยกของพันธะ X-H-X ใกล้กว่า โปรตอนจะสร้างพันธะที่มีความแข็งแรงเท่ากันกับไอออนลบทั้งสอง ซึ่งพันธะไฮโดรเจนที่มีสมมาตร อาจมีมุมของพันธะที่โค้งแตกต่างจาก 180 องศาเพียงเล็กน้อย การโค้งเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนจากสถานะ p ของไอออนลบไปยัง 2p ของ H^+ ซึ่งมีพลังงานสูงกว่า (Portier 1983) การเกิดพันธะไฮโดรเจนที่สมมาตรมักเกิดกับฟลูออไรด์ไอออน (F^-) หรือออกไซด์ไอออนซึ่งเกิดโพลาริซที่แข็งแกร่งกับไอออนบวกข้างเคียง ตัวอย่างเช่น ไดออกซิเนียมไอออน ($O_2H_5^+$) ซึ่งประกอบด้วยน้ำสองโมเลกุลสร้างพันธะไฮโดรเจนที่สมดุล แต่มุมพันธะของ O-H-O จะโค้งไปมากกว่า 6 องศา

การแทนที่ของโปรตอนภายในโครงร่างของพันธะไฮโดรเจนที่สมมาตร จะทำให้เกิดการโพลาไรซ์ที่ต่อเนื่อง (P_s) ในของแข็งเพิ่มขึ้น ลำดับการแทนที่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต เช่น ในวัสดุที่เป็น Ferroelectric การผันกลับของ P_s ไปเป็น $-P_s$ ภายใต้สนามไฟฟ้าจะทำให้เพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าอย่างมาก แต่การเคลื่อนที่นี้จะไม่เป็นการเพิ่มการแพร่ หรือการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของโปรตอน อย่างไรก็ตามโปรตอนจะสามารถสร้างพันธะเดี่ยวที่แข็งแรงกับไอออนลบข้างเคียง การรวมตัวกับไอออนลบข้างเคียงตัวที่สองในพันธะที่สมมาตรอาจทำให้พันธะแตกออกได้ง่าย ตัวอย่างเช่น พันธะของ X-H ที่สั้นกว่าอาจเกิดการเคลื่อนที่จากข้างหนึ่งไปอีกข้างหนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า และอาจเปลี่ยนแปลงทิศทางของพันธะจากสนามไฟฟ้าภายนอก หรือโดยสุ่มเมื่อให้พลังงานความร้อน และเมื่อให้ความร้อนมากขึ้น โมเลกุลอาจเกิดการแตกสลาย ดังนั้นจึงเกิดการหมุนที่อิสระของไอออนลบที่จับกับโปรตอน ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ไอออนลบที่จับกับโปรตอน อาจจะสามารถแพร่ภายในของแข็งในช่วงระยะที่ยาว ซึ่งในการเคลื่อนที่ทั้งหมดนี้ : เคลื่อนจากข้างหนึ่งไปอีกข้างหนึ่ง การจัดรูปใหม่ การแตกสลาย การหมุน หรือการย้ายจะทำให้โปรตอนเคลื่อนที่ร่วมกับไอออนลบ โดยเคลื่อนที่ไปบนไอออนลบ

การเคลื่อนที่แบบย้ายไปบนไอออนอื่นนี้อาจเรียกอย่างง่ายๆ ว่า การเคลื่อนที่แบบมีพาหะ (Vehicular motion) โดยโมเลกุลที่เคลื่อนที่อาจมีประจุบวก เช่น แอมโมเนียม (NH_4^+) หรือไฮโดรเนียม (OH_3^+) ประจุลบ เช่น NH_2^- หรือ OH^- ไม่มีประจุ เช่น NH_3 หรือ H_2O การเคลื่อนย้ายของโมเลกุลที่มีประจุในระยะทางที่มาก จะเป็นการเพิ่มไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีแหล่งที่ให้และรับสปีชีส์ที่เคลื่อนที่ที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองตามลำดับ การเคลื่อนย้ายของโมเลกุลที่ไม่มีประจุเป็นเพียงการเพิ่มฟลักซ์ของมวล ซึ่งสปีชีส์นี้มักจะระเหยที่อุณหภูมิกลางๆ

โปรตอนสามารถแพร่ผ่านระบบที่เป็นพันธะไฮโดรเจนโดย Grotthuss mechanism ซึ่งจะประกอบด้วยการรวมระหว่างการจัดรูปใหม่บนไอออนและการแทนที่ของโปรตอนภายในพันธะไฮโดรเจน ผลจากการเคลื่อนที่นี้จะเป็นการเพิ่มค่ากระแสตัวอย่างเช่นใน Ferroelectric ในการแทนที่หนึ่งครั้งโปรตอนจะถูกกักไม่ให้เคลื่อนย้ายต่อไป ยกเว้นว่าไดโพลของโมเลกุลมีอิสระในการที่จะหมุนภายใต้สนามไฟฟ้าไปยังตำแหน่งใหม่ของพันธะ ซึ่งทำให้เป็นการเริ่มต้นของการแทนที่ของโปรตอนตัวใหม่ การเคลื่อนย้ายพื้นฐานของโปรตอนจะประกอบด้วยสองขั้นตอนที่แตกต่างกัน คือ การแทนที่ภายในพันธะ และการหมุนของไอออนที่จับกับโปรตอน แม้ว่าขั้นตอนการแทนที่จะเกิดขึ้นผ่านช่องทางที่มีการกั้นขวาง ดังนั้นต้องมีพลังงานความร้อนที่จะเอาชนะค่า ΔH_t การแทนที่

ของโปรตอนจึงต้องมีลักษณะการหมุนที่คล้ายกับไอออนที่จะจับด้วย คือ เกิดการแพร่และต้องมีเอนทัลปีของการเคลื่อนที่ (ΔH_m)

ตัวนำโปรตอนที่เป็นสารอนินทรีย์ส่วนมากจะเป็นไฮดรอกไซด์ น้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างจะกระจายอยู่มากทั้งในโครงร่าง และชั้นของสารประกอบ อย่างเช่น ในช่องว่างของออกซิเจนใน Perovskite เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กกว่าออกไซด์ไอออน (ออกซิเจน) น้ำที่อยู่ในช่องว่างอาจจะสูญเสียไปที่อุณหภูมิมากกว่า 100°C ดังนั้นตัวนำโปรตอนจึงมักจะใช้งานที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ชั้นของออกไซด์ที่มีอยู่ในตัวนำโปรตอน จะทำให้ปริมาณน้ำที่อยู่ระหว่างชั้นแตกต่างกัน เช่น กลุ่มที่มีชั้นของไฮดรเจนเป็นเกลือของกรด $[\text{M(IV)}(\text{XO}_4)_2]_n^{2n-}$ ซึ่ง $\text{M(IV)} = \text{Ti, Zr, Hf, Ge, Sn, Pb, Ce หรือ Th}$ และ $\text{X} = \text{P หรือ As}$ (Alberti and Constantino, 1982) เพื่อให้ค่าการนำโปรตอนดีที่อุณหภูมิห้อง (10^{-3} ซีเมนส์/เซนติเมตร) จำเป็นต้องมีโมเลกุลน้ำที่มากกว่าหนึ่งชั้นระหว่างชั้นของออกไซด์ (Casciola et al., 1986) โมเลกุลน้ำที่เหลือนี้อาจจะทำให้สปีชีส์ของไฮโดรเจนออกซิเจนมีอิสระในการหมุน ซึ่งมีความจำเป็นในกลไกแบบ Grotthuss ไฮเดรตยูรานิลฟอสเฟต (Hydrated uranyl phosphate $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{UO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารอีกกลุ่มหนึ่งที่มีชั้นของไฮดรเจน ซึ่งทำให้น้ำโปรตอนได้ดีที่อุณหภูมิห้อง (Shilton and Howe, 1977) แต่จำเป็นต้องมีน้ำในปริมาณมากด้วย กลไกการแพร่ Grotthuss จะเกิดขึ้น เนื่องจากน้ำระหว่างชั้น (Fitch, 1982) กรดแอนติโมนิกเป็นโครงร่างไฮดรเจนที่มีโครงร่างของ $(\text{Sb}_2\text{O}_6)^{2-}$ ของโครงสร้างไพโรโคร (Pyrochlore) $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_6$ ตำแหน่งช่องว่างของ A_2O จะถูกครอบครองด้วย $2\text{H}_3\text{O}^+ + \text{ไฮโดรเจน O}$ (England et al., 1980) ในโครงร่างกรดที่แข็งแรงนี้ โปรตอนอาจเคลื่อนที่ไปด้วยพาหะหรือกลไกแบบ Grotthuss อย่างไรก็ตามไฮดรเจนที่เตรียมขึ้นจะอยู่ในสภาพเปียก และการแพร่ระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นเป็นหลัก ตัวอย่างทั้งหมดนี้เมื่อมีน้ำในปริมาณมาก อาจจะถูกจัดประเภทเป็นอนุภาคที่ถูกไฮดรเจน ตัวอย่างของอนุภาคที่ถูกไฮดรเจน เช่น อนุภาคของออกไซด์ที่โดปด้วยน้ำส่วนเกิน ซึ่งจะมีกระแสเนื่องจากโปรตอนเป็นส่วนมาก เช่นเดียวกันกับการโดป Li ด้วย Al_2O_3 ในเยื่อแผ่นเชิงประกอบ

อนุภาคที่ถูกไฮดรเจนประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ โดยทั่วไป คือ ออกไซด์ที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อของสารละลายของพันธะไฮโดรเจน เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนสามารถแตกสลายได้จากความดัน วัสดุคอมโพสิตเหล่านี้ จึงสามารถทำให้อยู่ในสภาพของแผ่นแน่นที่อุณหภูมิห้องโดยวิธี Cold pressing ไอออนของโลหะที่พื้นผิวของอนุภาคออกไซด์จะรวมตัวกับน้ำ เพื่อที่จะสร้างพันธะร่วมออกซิเจนที่สมบูรณ์ โปรตอนจะรวมกับน้ำเพื่อกระจายตัวไปบนอนุภาคทำให้พื้นผิวเป็นไอออนลบของไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของโปรตอนที่พื้นผิวจะเข้าสู่สมดุลกับเมทริกซ์สารละลาย อนุภาคที่เป็นกรดจะผลักโปรตอนจากพื้นผิวให้เมทริกซ์สารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 ส่วนอนุภาคที่เป็นเบสจะดึงดูด

โปรตอนจากเมทริกซ์ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7 อนุภาคคอลลอยด์จะมีอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรมาก ดังนั้นจึงมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของเมทริกซ์สารละลายได้ดีกว่าอนุภาคนาขนาดเล็ก อนุภาคออกไซด์ที่มีความเป็นกรดมากกว่า และขนาดเล็กกว่า จะมีความเข้มข้นของโปรตอนซึ่งเคลื่อนที่ในเมทริกซ์มากกว่าสำหรับอนุภาคที่มีสัดส่วนใดๆก็ตาม โปรตอนจะเคลื่อนที่ภายในเมทริกซ์สารละลายด้วยกลไกแบบ Grotthuss และค่าโมบิลิตี้ของโปรตอนจะมากเมื่อมีน้ำเคลื่อนที่ โครงสร้างที่เป็นเมทริกซ์สารละลายจะลดลงตามระยะทางจากพื้นผิวในอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นค่าโมบิลิตี้ของโปรตอนจะมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของน้ำในคอมโพสิตมากขึ้น และค่าการนำโปรตอนจะลดลงตามเวลาเมื่ออนุภาคที่ถูกไฮเดรตมีการสูญเสีย น้ำ ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้อุณหภูมิในการทำงานควรมีค่าน้อยกว่า 60°C นอกจากว่าที่อุณหภูมินั้นจะมีความดันไอของน้ำสูง

วิธีโดยทั่วไป ในการวัดค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นจะใช้วิธี AC impedance ด้วยอิเล็กโทรด 2 ตัวเพื่อทำให้เกิดความต้านทานน้อยและความถี่สูง (1-6 kHz) เพื่อให้เพียงพอกับการแยกความต้านทานของผิวหน้า Cahan and Wainright ได้ใช้อิเล็กโทรดเพิ่มเป็น 4 ตัว (four-electrode impedance) สามารถเพิ่มความถี่เป็น 10^5 Hz (Sone et al., 1996)

2. กลไกการเคลื่อนที่ของไอออน

กลไกการเคลื่อนที่ที่ประกอบด้วยกลไก 3 แบบ คือ migration diffusion และ convection กลไกทั้งสามแบบนี้มีความแตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

Transport	Occurs in response to
migration	a gradient of electrical potential
diffusion	a gradient of activity or concentration
convection	a gradient of pressure

ที่มา: Oldman (1994)

Migration เป็นกลไกที่ใช้อธิบายเฉพาะตัวถูกละลายที่เป็นไอออน การเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งแรงนี้จะทำให้ไอออนบวกเคลื่อนที่ลง (เช่น เคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่มีไอออนบวกน้อย) ในขณะที่ไอออนลบจะเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตรงกันข้าม

การ Diffusion ของตัวถูกละลายเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีแอกติวิตี้ที่แตกต่างกัน กลไกนี้จะใช้อธิบายตัวถูกละลายที่เป็นไอออนและเป็นกลาง การเคลื่อนที่แบบนี้แตกต่างจากการเคลื่อนที่แบบอื่นที่ไม่สามารถระบุแรงที่กระทำได้ โดยการเคลื่อนที่ที่เคลื่อนที่จากบริเวณที่มีแอกติวิตี้สูงไปยังบริเวณที่มีแอกติวิตี้ต่ำ

ลักษณะทั่วไปของ Migration และ Diffusion คือ การเคลื่อนที่ผ่านตัวทำละลาย ซึ่งแตกต่างกับการเคลื่อนที่แบบ Convection ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวทำละลาย สารละลายทั้งหมดจะเคลื่อนที่ เนื่องจากความแตกต่างของความดัน โดยมี 2 แบบด้วยกัน คือ Forced convection และ Natural convection ซึ่งแบบแรกเกิดเนื่องจากการกระทำจากภายนอก เช่น การคน การหมุน อิเล็กโทรด Natural convection เกิดเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความเข้มข้นซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเคมี

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภัทรพร (2545) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการสังเคราะห์กับชนิดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเพอร์โลต์และเถ้าแกลบ โดยนำแกลบผ่านกระบวนการทางเคมีด้วย การต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเผาแกลบด้วยเตาเผาภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ได้เถ้าแกลบที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ถึง 99.65 % โดยน้ำหนัก จากนั้นสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเพอร์โลต์และเถ้าแกลบ จะใช้อัตราส่วนโดยจำนวนโมลระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาอยู่ระหว่าง 1 ถึง 40 ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ระหว่าง 1 ถึง 4 นอร์มัล ที่ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 170 และ 140 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลว เท่ากับ 1 ต่อ 15 กรัมต่อมิลลิลิตร และอัตราการให้ความร้อน 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ไฮเดรตและเถ้าแกลบปรับอัตราส่วนโดยจำนวนโมลระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินา จากการทดลองพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วยซีโอไลต์ชนิด Analcime , Na-P1 และ Sodalite Octahydrate โดย Analcime เกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 170 °C และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยจำนวนโมลระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนถึง 3.5 นอร์มัล จะทำให้การเกิดของ Analcime ดีขึ้น Na-P1 เกิดได้ดีที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1 ถึง 2 นอร์มัล และอัตราส่วนโดยจำนวนโมล

ระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาอยู่ระหว่าง 5 ถึง 20 Sodalite Octahydrate เกิดได้ดีที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงถึง 4 นอร์มัล และที่อัตราส่วนโดยจำนวนโมลระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาค่าที่ 1 ถึง 2.5 ซึ่งที่อัตราส่วนโดยจำนวนโมลระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาค่านี้ Sodalite Octahydrate เกิดได้ดีแม้ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2 นอร์มัล

นิรุติ (2546) การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ในการทดลองได้ใช้ดินขาว 4 แบบ คือ (1) ดินขาวที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ (2) ดินขาวที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (3) ดินขาวจากแบบที่ 1 ที่ผ่านการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก และ (4) ดินขาวจากแบบที่ 2 ที่ผ่านการชะล้างด้วยกรดไฮโดรบรอมิก ในกระบวนการสังเคราะห์ได้ใช้ดินขาว 1 กรัม ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา แล้วใส่สารเตตระโพรฟิเลียมโมเนียมโบรไมด์ 0.5 กรัม นำมาทวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน และปรับค่าพีเอชโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร จากนั้นจึงนำเข้าเครื่องปฏิกรณ์ความร้อน พร้อมกับตั้งค่าความดัน และอุณหภูมิตามขอบเขตการศึกษา โดยได้ศึกษาการแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเป็น 30, 50, 70 และ 100 พีเอชเท่ากับ 10-14 ความดันเริ่มต้น 1-5 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 150 และ 160 °C ใช้เวลาในการให้ความร้อนรวม 4 ชั่วโมง ผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 คือ ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเป็น 100 สภาพความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 11 ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 160 °C โดยสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ได้ 100% ผลึกซีโอไลต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 40-586 ตารางเมตรต่อกรัม

Sone et al. (1996) การวัดค่าการนำโปรตอนของแผ่นเยื่อแผ่น Nafion 117 ซึ่งจะถูกวัดภายใต้เงื่อนไขของความชื้นและอุณหภูมิที่ต่างกันโดยใช้เทคนิค Four-electrode ac impedance พบว่าสำหรับแผ่นเยื่อที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีค่าการนำโปรตอนเท่ากับ 7.8×10^{-2} S/cm ที่ความดันและอุณหภูมิบรรยากาศและที่ความชื้น 100% จากนั้นก็นำแผ่นเยื่อที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 21-45 °C มาวัดอีกครั้งพบว่ามีการนำโปรตอนลดลงขณะที่อุณหภูมิ 45-80 °C ค่าการนำโปรตอนกลับมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพราะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความชื้นของแผ่นเยื่อลดลง

Chun et al. (1998) ในการพัฒนาการนำไฟฟ้าของแผ่นเยื่อโพลีเมอร์ในเซลล์เชื้อเพลิง (PEMFC) ปกติอิเล็กโทรดจะถูกนำมา fabricate กับ ตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกระบวนการเตรียมแผ่นเยื่อ

โดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ต่างกัน คือ กระดาษคาร์บอนและแผ่นเคลือบคาร์บอน เป็นอิเล็กโทรดซึ่งทำการ fabricate โดยใช้พันธะแพลตตินัมกับเหล็กของแพลตตินัมเคลือบคาร์บอนอิเล็กโทรดของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเคลือบและหมุนแผ่นฟิล์ม ตัวเร่งปฏิกิริยา/ ไอโอโนเมอร์จะฟอร์มตัวบนแผ่นเชื้อ โดยการเคลือบโดยตรงด้วยเทคนิค printing การวัดประสิทธิภาพกับแผ่น ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เตรียม โดยใช้ electrode single cell ขนาดใหญ่หรือเล็ก พบว่าทั้งกระดาษคาร์บอนและคาร์บอนที่เคลือบเป็นฟิล์มบางๆ ของเยื่อแผ่นอิเล็กโทรดรวมทั้ง electrode assemblies (MEAs) กับ electrode ขนาดเล็กจะมีความหนาแน่นไฟฟ้า 350 และ 650 mA/cm² ที่ 0.6 โวลต์ ส่วนประสิทธิภาพของแผ่นเชื้อ ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบการเคลือบโดยตรงจะ มีพื้นที่ของ MEAs 300 cm² จะมีมากกว่าแบบอื่นๆ เนื่องมาจากสมบัติบางอย่างของฟิล์มบางๆ ของเยื่อแผ่นอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลอง

Alberti et al. (2001) เนื่องจากความคงตัวของแผ่นเยื่อโพลิเมอร์กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนโปรตอนที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักมีความสำคัญสำหรับการพัฒนา methanol PEM fuel cell ประเด็นนี้จึงนำมาใช้ในการศึกษาการนำโปรตอนของแผ่นเยื่อ Nafion 117 และ sulfonate polyether ether ketone (S-PEEK) ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงอุณหภูมิ 80-160 °C โดยจะเตรียมแผ่นเยื่อให้มีความชื้นสูงก่อนจะวัดค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิที่แน่นอน พบว่าความชื้นต่ำกว่า 80 % ที่อุณหภูมิ 160 °C และพบว่า Nafion 117 มีความสามารถในการนำโปรตอนดีกว่า S-PEEK ที่ความชื้นต่ำๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 °C โดยที่อุณหภูมิ 100 °C จะมีความชื้นสัมพัทธ์ 35 % S-PEEK จะมีค่าการนำโปรตอนเท่ากับ 2.48 ซึ่งน้อยกว่า Nafion 117 ประมาณ 30 เท่า ผลของความเป็นกรดและความเป็นผลึกของโพลิเมอร์จะส่งผลกับค่าการนำโปรตอนที่ดี ดังนั้น จึงใช้แผ่นเยื่อ Nafion 117 และ S-PEEK ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักในเซลล์เชื้อเพลิง

Thampan et al. (2001) งานวิจัยนี้จะเกี่ยวกับพัฒนาโครงสร้างและการกำหนดของ ไฮโดรเจน-ออกซิเจน proton-exchange membrane fuel cell (PEM) โดยจะทำการสร้าง membrane reactor ที่ประกอบด้วย 5 ชั้น ด้วยกัน คือ ชั้นแลกเปลี่ยนก๊าซ 2 ชั้น, ชั้น ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชั้น และ ชั้นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน 1 ชั้น โดยอุปกรณ์นี้จะเกิดทั้งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาและปฏิกิริยาการแยกของ ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน เป็น H⁺ และ e⁻

Yan et al. (2002) การวัดสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีเปรียบเทียบกับระหว่างแผ่นเยื่อจาก Nafion 115 และแผ่นเยื่อผสมของ Nafion 115/ Zirconium phosphate (25 wt%) พบว่าแผ่นเยื่อผสม จะมีการดูดน้ำเข้าไปมากกว่าแผ่นเยื่อ Nafion 115 ที่ความชื้นเดียวกัน แต่ค่า proton conductivity ของแผ่นเยื่อผสมมีค่าน้อยกว่า Nafion 115 การวัดค่า X-ray diffraction ในแผ่นเยื่อผสมของ hydrophilic เป็นหลักและพบว่าฟิสิกส์ที่ได้กว้างกว่า Nafion 115 และแผ่นเยื่อผสมจะแสดงโครงสร้าง

ของน้ำน้อยกว่าแม้ว่าค่า proton conductivity ของแผ่นเยื่อผสมจะมากกว่า Nafion 115 จึงกล่าวได้ว่าเมื่อแผ่นเยื่อใช้งานภายใต้ความชื้น และความเป็นผลึกแผ่นเยื่อผสมที่มากกว่าจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

Yang et al. (2002) วิธีใหม่ในการเตรียม self-humidifying membrane ที่ใช้ใน polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) และเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียม การเกิดโมเลกุลน้ำบน Pt particles ที่ติดแน่นอยู่ในแผ่นเยื่อโดยการรวมกันอีกครั้งของ ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน ที่ซึมซาบได้ เป็นสมบัติที่เหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพของ single cell ในการเกิดน้ำขึ้นเองภายในแผ่นเยื่อจะสูงขึ้น กลไกการเกิดน้ำอธิบายจากผลการทดลอง IR-spectrum จะพบ Absorption peak ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติของ OH-stretching bond ซึ่งจะพบเฉพาะในกรณีของแผ่นเยื่อที่สามารถเกิดน้ำขึ้นได้ด้วยตัวเอง วิธีใหม่ในการเตรียม fabricate จะอยู่ในภาพเซนวิสซึ่งประกอบด้วยแผ่นเยื่อ 2 แผ่นที่ทำจาก perfluorosulfonylfluoride copolymer resin และแผ่น Pt อยู่ระหว่างแผ่นเยื่อแล้วเคลือบด้วย sputtering อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดรูพรุนภายในแผ่นเยื่อประมาณ 230 °C

Kwak et al. (2003) งานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์แผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนโดยใช้พอลิเมอร์ (Polymer อิเล็กโตรไลต์ membrane fuel cell, PEMFCs) ซึ่งเตรียมโดยใช้โปรตอนที่ได้จาก mordenite power กับ perfluorosulfonid copolymer resin ที่อุณหภูมิมากกว่า 100°C เพื่อลดปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นพิษกับ Pt ทำให้เสื่อมสภาพเร็วและวัดคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของ PEMFCs จากการวัดค่า tensile strength และค่าการนำโปรตอน พบว่าถ้ามี mordenite มากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าการนำโปรตอนสูงขึ้น เพราะใน mordenite จะมีน้ำช่วยเพิ่มความชื้นให้กับแผ่นเยื่อไม่แห้งเกินไปจากความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่าที่อุณหภูมิน้อยกว่า 130°C และมีปริมาณ mordenite 10% โดยน้ำหนักเป็นองค์ประกอบจะทำให้แผ่นเยื่อที่ได้มี performance ดีสุด

Shao et al. (2003) นำแผ่นเยื่อแผ่น Nafion/ silicon oxide (SiO_2)/ Phosphotungstic acid (PWA) และ Nafion/ silicon oxide มาศึกษาการแลกเปลี่ยนโปรตอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C ซึ่งแผ่นเยื่อแผ่นที่ได้เตรียมจากการ recasting โดยใช้สารละลาย Nafion ผสมกับ SiO_2 และ PWA/ SiO_2 แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของแผ่นเยื่อที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), Thermo gravimetric-DTA (TG-DTA) และ Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy ผลที่เกิดขึ้นพบว่า SiO_2 และ PWA ที่เติมในแนฟฟิออนจะเพิ่มความเป็นผลึกในแผ่นเยื่อและเพิ่มความทนทานต่อการถูกทำลายที่อุณหภูมิสูงขึ้น และพบว่าเยื่อแผ่นเชิงประกอบจะแสดงปริมาณน้ำที่ดูดเข้าไปมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเยื่อแผ่นแนฟฟิออน ส่วน

ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบจะมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นเยื่อแนฟฟิออนที่อุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ 100 % แต่อย่างไรก็ตามจะมีค่ามากกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำๆ เพราะเยื่อแผ่นเชิงประกอบจะสามารถรับความหนาแน่นกระแสได้สูงกว่า (540 และ 320 mA/cm^2) แผ่นเยื่อแนฟฟิออน (95 mA/cm^2) ภายใต้อุณหภูมิ 110°C และที่ความชื้น 100 %

Kim et al. (2004) สังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบ nafion/ zirconium sulphophenylenyl phosphate (ZrSPP) ซึ่งสามารถรักษาค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิสูง โดย ZrSPP จะได้จากการตกตะกอนของปฏิกิริยาระหว่าง Zr^{4+} กับกรด m- sulphophenylenyl phosphate (SPP) ซึ่งมีอัตราส่วนของ P/Zr = 2 พบว่าค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่น nafion/ ZrSPP ที่อัตราส่วน 12.5% โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 0.07 S/cm ที่อุณหภูมิ 140°C

Park et al. (2005) ทำการทดลองสังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบที่ใช้กับเครื่อง direct methanol fuel cells (DMFCs) โดยการเติมสาร calcium hydroxylphosphate (CHP) ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นผลึกในสารละลายแนฟฟิออน พบว่าเยื่อแผ่นที่ได้มีความเป็นผลึกมากขึ้น แต่ค่าการควบแน่น การดูดคายเมทานอลและการเกิดการรั่วซึมของเมทานอลลดลง สรุปได้ว่าเป็นการเพิ่มขึ้นของความเป็นผลึกของเยื่อแผ่นเกิดจากแรง adhesion ของแนฟฟิออนกับ CHP ทำให้ลดการเกิดการรั่วซึมของเมทานอล

Baglio et al. (2005) สังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบโดยใช้ Chabazite และ Clinoptilolite เติมในแนฟฟิออนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในการใช้งานให้กับ Direct Methanol Fuel Cells โดยมีอัตราส่วนในการเติมเป็น 3 และ 6% โดยปริมาตร อุณหภูมิในการใช้งานอยู่ที่ $90-140^\circ\text{C}$ พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 140°C ซึ่งดูจากค่าความต้านทานแสดงว่าเยื่อแผ่นเชิงประกอบมีสมบัติในการรักษาน้ำที่อุณหภูมิสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้เติม Chabazite และ Clinoptilolite

Hogarth et al. (2005) งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาและสรุป รวมทั้งวิจารณ์เกี่ยวกับ non-polymer based high temperature membrane หรือที่เรียกว่า solid acid membrane และเหตุผลที่ต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูง กลไกการเคลื่อนที่ของโปรตอนอิสระ ข้อจำกัดของกระแสไฟ โดยจะพูดถึงพอลิเมอร์ 2 ชนิดเปรียบเทียบกัน คือ sulfonate aromatic polymer เช่น sulfonate polyether ketone (SPEEK) และ perfluorosulfonate acid membrane จำพวกแนฟฟิออนซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการนำโปรตอนใกล้เคียงกันที่ความชื้นสูงๆ แต่ที่ความชื้นต่ำจะมีค่าสภาพการแพร่ต่ำกว่าจึงทำให้ค่าการ

นำโปรตอนต่ำกว่าด้วย โดยค่าการนำโปรตอนของ sulfonate aromatic polymer จะขึ้นอยู่กับที่เกิด sulfonation และเมื่อจำนวนของ sulfonation ลดลงทำให้มีปริมาณน้ำอยู่น้อยค่าการนำโปรตอนมีค่าน้อยกว่า 10^{-2} S/cm ซึ่งทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานในเซลล์ไฟฟ้า

Nikhil et al. (2005) สังเคราะห์เยื่อแผ่นเชิงประกอบ Nafion-MO₂ (M = Zr, Si, Ti) โดยกระบวนการโซลเจล เพื่อที่จะเพิ่มค่าการนำโปรตอนและรักษาความชื้นที่อุณหภูมิสูงความชื้นต่ำ (120°C, 40% ความชื้นสัมพัทธ์) พบว่าการเตรียมเยื่อแผ่นโดยวิธีนี้ได้เยื่อแผ่นที่มีการกระจายตัวของ M ออกซิเจน อย่างสม่ำเสมอมากกว่าวิธี casting โดยที่อุณหภูมิ 90°C และ 120 °C ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่น Nafion/ZrO₂ ที่ได้จากกระบวนการโซลเจลที่อัตราส่วน 10% โดยน้ำหนัก เหนือกว่าที่มีค่ามากกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออน เนื่องจากความเป็นกรดของ Zr มากกว่าเมื่อเทียบกับ Si และ Ti และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย TGA และ DMA พบว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเยื่อแผ่น Nafion-MO₂ จะมีค่ามากกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออน

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

สารเคมีที่ใช้

1. สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมซีโอไลต์ ZSM-5

- 1.1 ดินขาวจากบริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด
- 1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริสุทธิ์ 98 % ผลิตโดยบริษัท MERCK-Schuchardt
- 1.3 เตตระโปรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ($C_{12}H_{28}BrN$) บริสุทธิ์ 98 % ผลิตโดยบริษัท Fluka
- 1.4 ไข่เกลบในการเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ($Na_2Si_3O_7$)

2. สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเยื่อแผ่น

- 2.1 Perfluorosulfonylfluoride copolymer resin (Nafion 117 solution) จากบริษัท Fluka
- 2.2 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
- 2.3 แอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) No.F2E011 ผลิตโดยบริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals Ltd.

3. สารเคมีที่ใช้ในการวัดค่าการซึมผ่านก๊าซ

- ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99 (PRAXAIR)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมซีโอไลต์

- 1.1 เครื่องปฏิกรณ์ความดันใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (ภาพที่ 13)
- 1.2 Zirconia Ball Mill
- 1.3 เครื่องร่อนแยกขนาดซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้
- 1.4 เครื่องวัดความเป็นกรดเบส (pH meter)
- 1.5 เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
- 1.6 เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- 1.7 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Hot air oven)
- 1.8 ก๊าซไนโตรเจนสำหรับปรับความดัน



ภาพที่ 13 เครื่องปฏิกรณ์ความดัน (Autoclave)

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเยื่อแผ่น

2.1 เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก

2.2 เตาอบลมร้อน (Hot air oven)

2.3 แผ่นกระจก (ภาพที่ 14)

2.4 ชุดอุปกรณ์ recast แผ่นเยื่อทำจากเทฟลอน (ภาพที่ 15)



ภาพที่ 14 แผ่นกระจกที่ใช้ในการขึ้นรูปเยื่อแผ่น



ภาพที่ 15 ชุดอุปกรณ์ recast แผ่นเยื่อที่ทำจากเทฟลอน

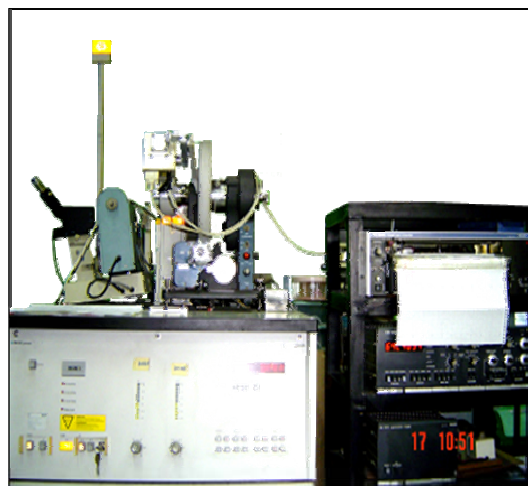
3. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของซีโอไลต์

3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) : ใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างผลึกของซีโอไลต์ (ภาพที่ 16)

3.2 X-ray Diffractometer (XRD) : ใช้จำแนกชนิดของโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ (ภาพที่ 17)



ภาพที่ 16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

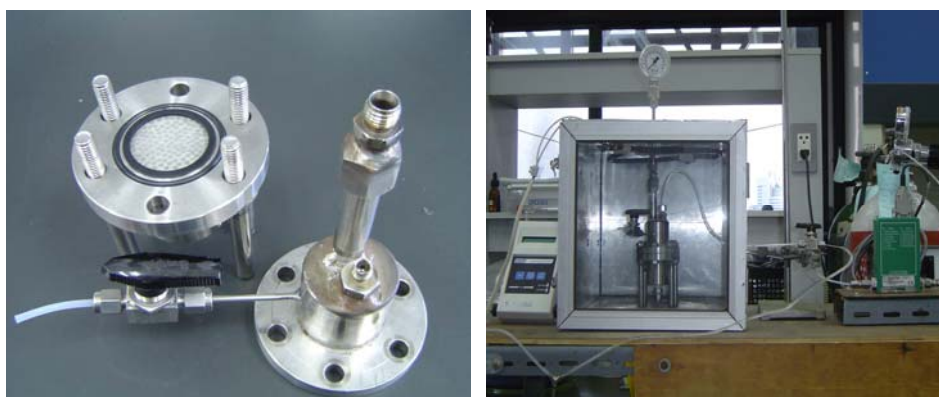


ภาพที่ 17 X-ray Diffraction

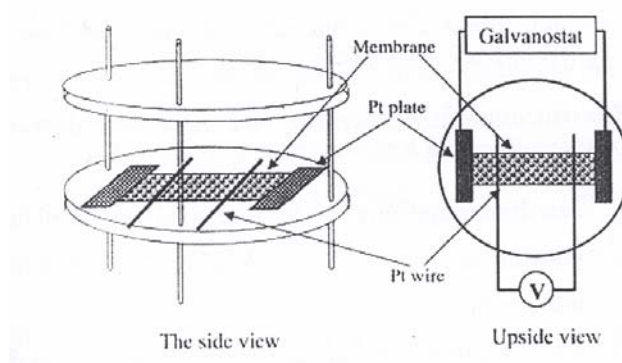
4. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของเยื่อแผ่น

- 4.1 ไมโครมิเตอร์วัดขนาดความหนาของเยื่อแผ่น
- 4.2 เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
- 4.3 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 4.4 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของก๊าซ (ภาพที่ 18)
- 4.5 ชุดทดสอบค่าการนำโปรตอน (Proton Conductivity Measurement Set) (ภาพที่ 19)
- 4.6 Scanning Electron Microscope (SEM) : สังกะการกระจายตัวของซีโอไลต์ในแมทริกซ์

แนฟฟิออน



ภาพที่ 18 ชุดทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ



ภาพที่ 19 การวัดค่าการนำโปรตอนด้วยวิธี Four probe method

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 นำดินขาวไปลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอลล และคัดขนาดอนุภาคด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 mesh ได้ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 74 ไมโครเมตร เก็บในโถดูดความชื้น เพื่อรอการใช้งาน

1.2 เตรียมโซเดียมซิลิเกตจากแคลบโดยนำแคลบไปทำความสะอาดด้วยน้ำแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C นาน 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปต้มกับกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัลที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงล้างน้ำจนเป็นกลางแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะได้แคลบที่ประกอบไปด้วยซิลิกาบริสุทธิ์ 99.7% แล้วนำไปบดผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 °C ก็จะได้สารละลายโซเดียมซิลิเกต

2. การสังเคราะห์ซีโอไลต์

การสังเคราะห์ ZSM-5 เริ่มจากนำดินขาวน้ำหนัก 1 กรัม ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในถ้วยเทฟลอน เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาให้ได้ตามต้องการ (วิธีการคำนวณดังภาคผนวก ก) เติมเตตระโพร-ฟอสเฟตโมเนียมโบรไมด์ 0.5 กรัมผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก ขณะที่กวนอยู่ทำการปรับความเป็นพีเอชของสารละลายให้ได้เท่ากับ 11 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) นำเข้าเครื่องปฏิกรณ์ความดัน ควบคุมความดันเริ่มต้นโดยการอัดก๊าซไนโตรเจนลงในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งค่าความดันที่ใช้ได้แก่ 1, 3 และ 5 บรรยากาศ ให้ความร้อนด้วยอัตรา 1.5 °C/ min จากอุณหภูมิห้องจนถึง 160 °C จากนั้นก็ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (นิรุติ, 2546) จากนั้นทำการแยกผลึกด้วยการกรอง ล้างผลึกที่ได้ด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอการวิเคราะห์

สำหรับ Sodalite Octahydrate และ Mordenite จะสังเคราะห์ในลักษณะเดียวกับ ZSM-5 แต่จะเปลี่ยนอัตราส่วนของ Si/Al และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดย Sodalite Octahydrate จะมี

อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 1-2.5 อุณหภูมิในการสังเคราะห์เท่ากับ 140 °C และMordenite จะมีอัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 30 อุณหภูมิในการสังเคราะห์เท่ากับ 170 °C

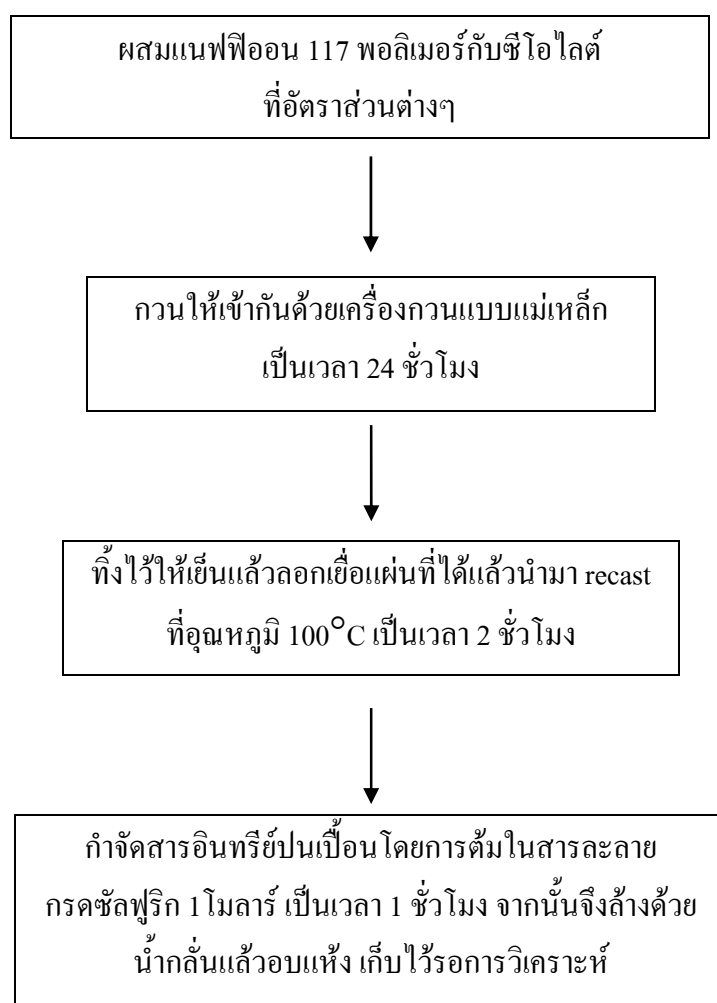
3. วิธีเตรียมเยื่อแผ่น

3.1 เปลี่ยนซีโอไลต์จาก Na-ZSM-5ให้อยู่ในรูป H-ZSM-5โดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับในแอมโมเนียมไนเตรดความเข้มข้น 1 โมลาร์ (แสดงการคำนวณดังภาคผนวก ก) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำมาอบที่ 400°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนแล้วเก็บไว้ใช้ในการทดลองต่อไป ทำเช่นเดียวกันกับซีโอไลต์ชนิด Sodalite Octahydrate และ Mordenite

3.2 ผสมซีโอไลต์กับสารละลายเนฟฟิออน 117 ที่อัตราส่วน 5, 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) ทำการกวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแบบแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงใช้เครื่องโฮโมจิไนเซอร์ช่วยในการกระจายตัวอีกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงเทลงบนแผ่นกระจกที่สะอาดโดยเทลงตรงกลางกระจก (ภาพที่ 14) รอจนกว่าสารจะกระจายตัวทั่วพื้นที่แผ่นกระจกที่ต้องการ แล้วนำไปอบที่ 50°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3 ทิ้งเยื่อแผ่นที่อยู่บนกระจกจนเย็นแล้วทำการลอกออกจากแผ่นกระจกโดยใช้น้ำกลั่นช่วยในการลอก แล้วจึงนำเยื่อแผ่นที่ลอกแล้วไป recast โดยใช้ชุด recast (ภาพที่ 15) ที่ทำจากเทฟลอนโดยจะอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.4 นำเยื่อแผ่นที่ได้ไปกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนด้วยการต้มด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลางจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บเยื่อแผ่นที่ได้ไว้ในโถสุญญากาศขึ้นรอการทดสอบ ขั้นตอนในการเตรียมแสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แผนภาพการเตรียมแผ่นเยื่อแผ่นเนฟฟิออน/ซีโอไลต์

4. การทดสอบคุณสมบัติเยื่อแผ่น

4.1 สันฐานวิทยา

ทำการตรวจสภาพพื้นผิวด้านหน้า และภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.2 การดูดซับน้ำ

ทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่นตามขั้นตอนต่อไปนี้

4.2.1 ชั่งน้ำหนักของเยื่อแผ่นแห้ง ($Weight_{dry}$)

4.2.2 แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.2.3 นำเยื่อแผ่นมาซับน้ำที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นออกให้แห้งด้วยกระดาษซับแล้วชั่งน้ำหนัก อย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในเยื่อแผ่น ($Weight_{wet}$)

4.2.4 นำค่าน้ำหนักของเยื่อแผ่นแห้งและหลังการดูดซับน้ำมาคำนวณค่าร้อยละการดูดซับตามสมการที่ (7)

$$\%Water\ uptake = \frac{(weight_{wet} - weight_{dry})}{weight_{dry}} \times 100 \quad (7)$$

4.3 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

ทำการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นตามขั้นตอนต่อไปนี้

4.3.1 ชั่งเยื่อแผ่นแห้งให้มีน้ำหนักประมาณ 20 มิลลิกรัม

4.3.2 แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.005 นอร์มอล ปริมาตร 2 มิลลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.3.3 คูดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในข้อ 4.3.2 มาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.005 นอร์มอล โดยใช้ฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นอินดิเคเตอร์ซึ่งมีจุดยุติเท่ากับ 7 (สังเกตได้จากเมื่อเติมฟีนอล์ฟทาไลน์ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูและเมื่อทำการไทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริกสีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนและเมื่อเพิ่มปริมาณกรดไฮโดรคลอริกมากขึ้นจนถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสี)

4.3.4 คำนวณค่าความสามารถในแลกเปลี่ยนไอออน ตามสมการที่ (8)

$$Ion\ exchange\ capacity = \frac{\left(N_1 V_1 - \left(\frac{V_1}{V_3} \right) N_2 V_2 \right)}{m} \quad (8)$$

N_1 = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)

N_2 = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล)

V_1 = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)

V_2 = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

V_3 = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ไทเทรต (มิลลิลิตร)

m = น้ำหนักของเยื่อแผ่น (กรัม)

4.4 การทดสอบค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าการซึมผ่านของก๊าซของเยื่อแผ่น โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การวัดโดยใช้ความดันคงที่ และการวัดโดยปริมาตรคงที่ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือในการวัดเป็นแบบความดันคงที่ โดยผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทางด้านบนของเยื่อแผ่น ควบคุมความดันขาเข้าของก๊าซให้คงที่ ส่วนด้านขาออกเปิดสู่บรรยากาศ และทำการวัดอัตราการไหลของก๊าซขาออก เพื่อนำไปหาค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน เครื่องมือมีลักษณะเป็นหน้าแปลน 2 ชิ้น ประกบกัน ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม หน้าแปลนด้านบนเป็นช่องว่างทรงกระบอก ด้านล่างมีฐานรองรับเยื่อแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทรงกระบอก คือ 3.7 เซนติเมตร พื้นที่บริเวณทดสอบก๊าซมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.1 เซนติเมตร มีแหวนแบนและแหวนกลม ทำจากยางอยู่ระหว่างหน้าแปลนทั้งสองสำหรับกันรั่ว ด้านขาเข้ามีเครื่องวัดความดันแล้ว 3 ทางเพื่อเปิดเข้าสู่อุปกรณ์ทดสอบค่าการซึมผ่านของก๊าซหรือเปิดเข้าสู่เครื่องวัดอัตราไหลของก๊าซเพื่อทำ autozero ส่วนหน้าแปลนชิ้นล่างต่อกับเครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซ

การทดสอบหาค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน ในงานวิจัยนี้ดำเนินการที่ความดันขาเข้า 20 psi และอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 °C) มีขั้นตอน ดังนี้

1. ตัดเยื่อแผ่นเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.1 เซนติเมตร และวัดความหนา ของเยื่อแผ่น
2. ประกอบเยื่อแผ่นเข้ากับเครื่องทดสอบ โดยวางบนเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีรูพูน
3. วางแหวนแบนที่ทำจากยางบนเยื่อแผ่นและแหวนยางกลมระหว่างหน้าแปลนทั้งสองเพื่อกันรั่ว

4. ไชสลักเกลียวกับแป้นเกลียวเข้าด้วยกันให้แน่น
5. เปิดก๊าซไฮโดรเจนอัตราการไหลประมาณ 12 Std. cm³/min ผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซเพื่อทำ autozero
6. หมุนวาล์วสามทางเพื่อเปิดก๊าซไฮโดรเจนอัตราการไหลประมาณ 12 Std. cm³/min เข้าสู่ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของก๊าซด้วยความดันและอุณหภูมิคงที่
7. วัดอัตราการไหลของก๊าซขาออก แล้วนำไปหาค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน ตามสมการที่ (9)

$$P = \frac{QL}{A(\Delta P)} \quad (9)$$

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

Q = อัตราการไหลผ่านเยื่อแผ่น (Sccs)

L = ความหนาของเยื่อแผ่น (cm)

ΔP = ความดันตกคร่อม (cmHg)

A = พื้นที่ของเยื่อแผ่น (cm²)

4.5 การวัดค่าการนำโปรตอน

นำเยื่อแผ่นที่เตรียมได้มาวัดค่าการนำโปรตอนด้วยวิธี Four probe method ตามขั้นตอนต่อไปนี้

4.3.1 ตัดเยื่อแผ่นให้มีขนาด 1x4 เซนติเมตร

4.3.2 วางเยื่อแผ่นบนเซลล์วัดค่าการนำโปรตอน โดยวางเยื่อแผ่นตามขวางให้อยู่บนลวดแพลตตินัมทั้งสอง ตามภาพชุดเครื่องมือการวัดค่าการนำโปรตอน วางแผ่นแพลตตินัมที่ขนาด 1x2.5 เซนติเมตรบนปลายทั้งสองข้างของเยื่อแผ่น

4.3.3 ประกอบเซลล์วัดค่าการนำโปรตอนเข้าด้วยกัน ชั้นสกรูทั้ง 4 จุดให้สัมผัสกับแผ่นแพลตตินัมต่อสายไฟที่ขั้วทั้งสองบรรจุเซลล์เข้าสู่ชุดวัดค่าการนำโปรตอนปิดฝาของชุดเครื่องมือและต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดความชื้น

4.3.4 ป้อนก๊าซไฮโดรเจนที่ผ่านระบบควบคุมความชื้นแล้วเข้าสู่ชุดวัดการนำโปรตอน โดยตั้งอุณหภูมิของระบบควบคุมความชื้นให้สูงกว่าอุณหภูมิของชุดการวัดโปรตอน 10°C เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำในทางเดินของก๊าซไฮโดรเจน

4.3.5 ต่อชุดวัดค่าการนำโปรตอนเข้ากับเครื่อง Milliohmmeter (HEWLETT PACKARD 4338A) รอจนความชื้นใน ชุดวัดค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 99.9 จึงเริ่มทำการทดลอง

4.3.6 บันทึกค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นเพื่อนำมาหาค่าการนำโปรตอนตามสมการที่ (10)

4.3.7 นำเยื่อแผ่นมาทำการวัดค่าการนำโปรตอนในช่วงอุณหภูมิ $30-100^{\circ}\text{C}$

$$\sigma = \frac{1}{R} \left(\frac{L}{A} \right) \quad (10)$$

σ = ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)

R = ความต้านทาน (โอห์ม)

L = ระยะห่างระหว่างลวดแพลตตินัม (เซนติเมตร)

A = พื้นที่หน้าตัดของเยื่อแผ่น (ตารางเซนติเมตร)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ภายใต้ด้วยอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100 ความดันเริ่มต้น 1, 3 และ 5 บรรยากาศ pH เท่ากับ 11 อุณหภูมิ 160 °C และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมง เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำการวิเคราะห์ชนิดโครงสร้างผลึกดังนี้

โดยหลักการของการ Diffraction จะใช้รังสีเอ็กซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งสามารถเลี้ยวเบนได้เหมือนกับคลื่นทั่วไป เมื่อรังสีเอ็กซ์ขนานตกกระทบบนระนาบของผลึก การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นทางเดินของรังสีทั้งสองต่างกันเป็นจำนวนเท่ากับความยาวคลื่น เงื่อนไขของการเลี้ยวเบนของรังสีคือ

$$2D \sin \theta = n\lambda \quad (11)$$

เมื่อ D = interplanar spacing

θ = angle between X-ray and crystal planes (degree)

λ = wavelength (Å)

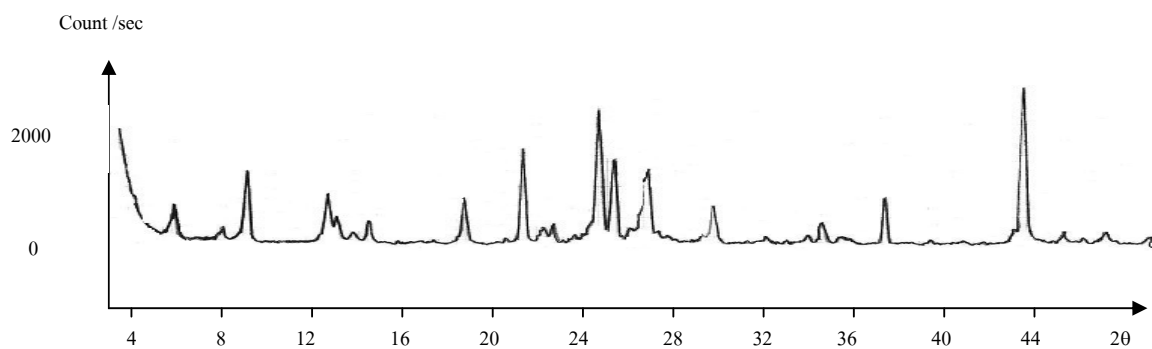
n = an integer number (1, 2, 3,...)

ส่วนประกอบของ Diffractometer ได้แก่ X-ray source, sample holding, Detector และ Goniometer ซึ่งเป็นแกนหมุนระบบให้รังสีเอ็กซ์ตกกระทบตัวอย่างและเลี้ยวเบนเข้าสู่หัววัดรังสี ในมุมตั้งแต่ 0-100 องศา การออกแบบระบบวัดสามารถทำได้หลายแบบโดยเลือกจุดใดจุดหนึ่งบนระนาบเป็นจุดหมุน ดังนั้นในการวัดตัวอย่าง จะได้ข้อมูลอยู่ในรูปของ spectrum ระหว่างมุม (2θ) กับความเข้มของรังสีที่ตรวจวัด

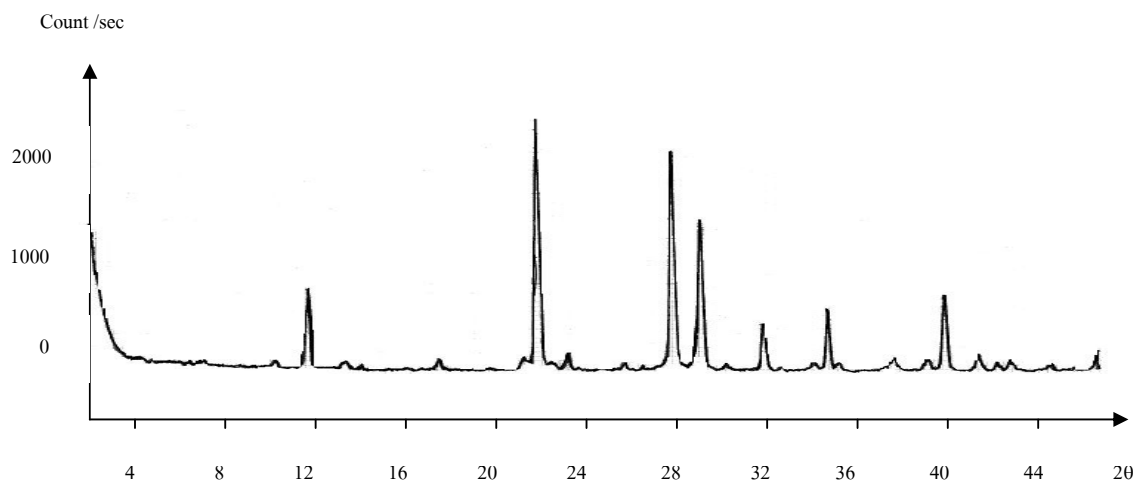
ผลึกของสารแต่ละชนิดจะมีขนาดของหน่วยเซลล์ไม่เท่ากันและประกอบด้วยอะตอมที่แตกต่างกัน เมื่อรังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดียวตกลงบนผลึกก็จะเกิดการเลี้ยวเบนและได้ pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction pattern) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (2θ) กับความเข้มสัมพัทธ์ของรังสีเอ็กซ์ ผลที่ได้คือฟิสิกของการเลี้ยวเบนของ

สารประกอบแต่ละชนิดที่มีลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ pattern ของสารมาตรฐานก็จะทราบว่าเป็นสารประกอบที่นำมาวิเคราะห์คือสารชนิดใด

จากหลักการดังกล่าวเมื่อนำซีโอไลต์ชนิด Mordenite และ Sodalite Octahydrate ที่ได้จากการสังเคราะห์จากดินขาวมาวิเคราะห์ความเป็นผลึก ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD, Philips รุ่น PW 1830/40) แล้วเปรียบเทียบ XRD pattern ที่ได้กับ XRD pattern ของซีโอไลต์มาตรฐานของ Treacy et al. (1996) (แสดงพิกมาตรฐานในภาคผนวก ข) พบว่ามีพิกหลักทุกพิกตรงกัน (ดังภาพที่ 21-22)

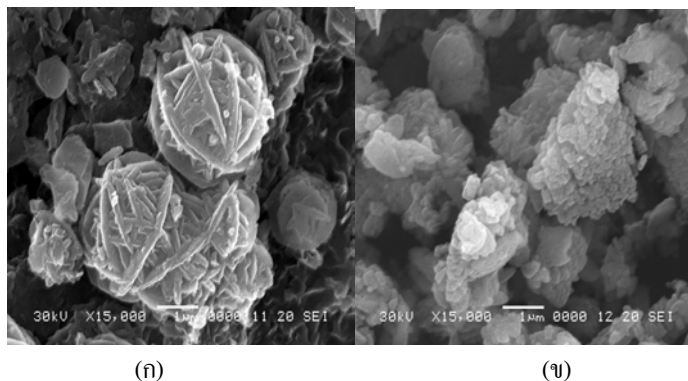


ภาพที่ 21 XRD pattern ของซีโอไลต์ชนิด Mordenite



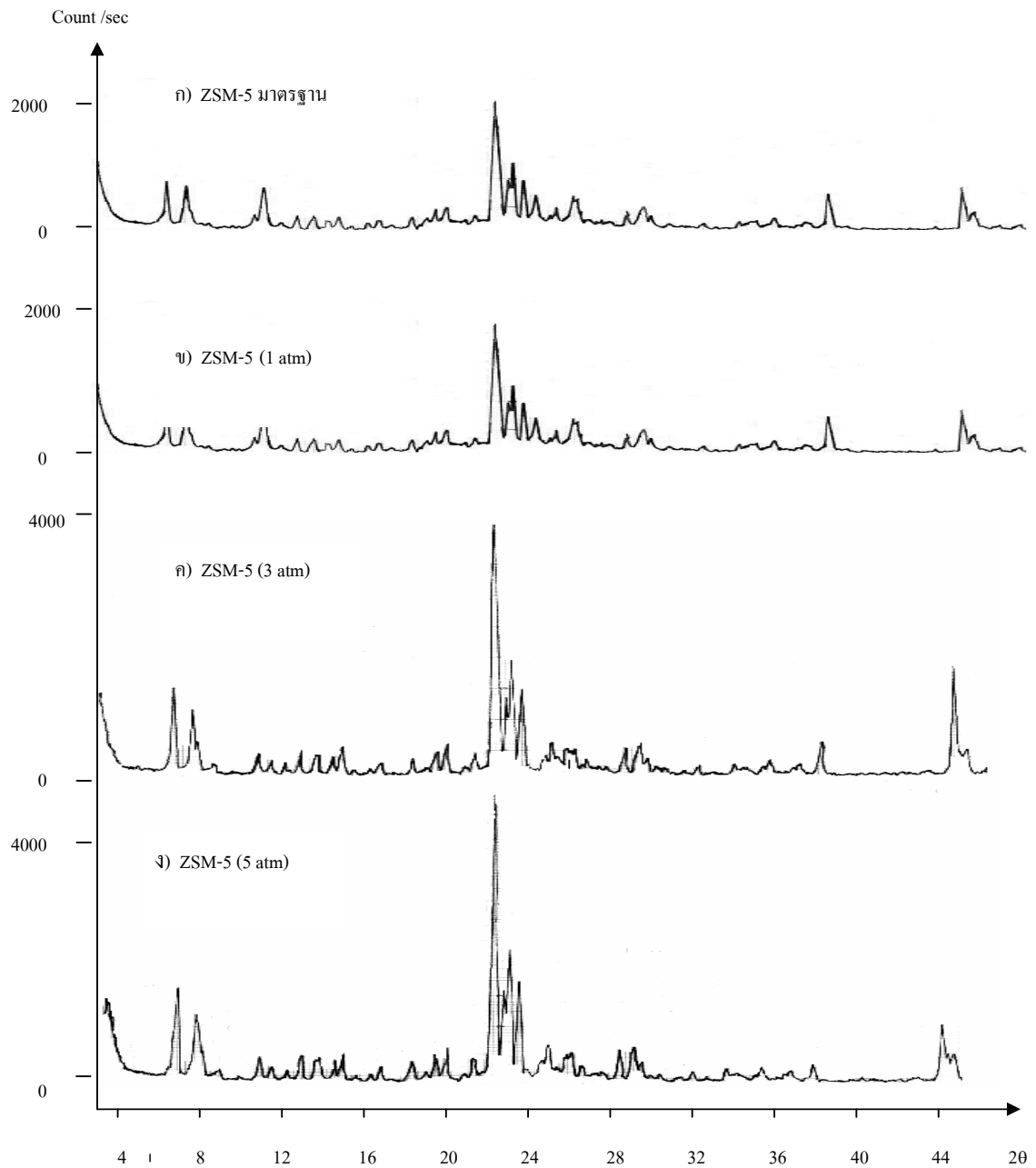
ภาพที่ 22 XRD pattern ของซีโอไลต์ชนิด Sodalite Octahydrate

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM, Jeol JSM-5600 LV) ผลึกของซีโอไลต์ชนิด Sodalite Octahydrate จะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นแบบร่างเหลี่ยมลักษณะคล้ายลูกเต๋ากว้างขนาดประมาณ 1.5 μm ส่วน Mordenite จะมีลักษณะเป็นก้อนมนเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (ดังภาพที่ 23)



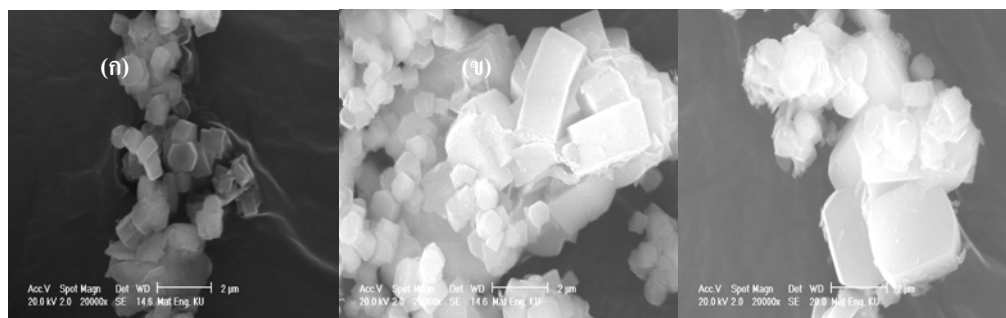
ภาพที่ 23 ภาพ SEM ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ (ก) Sodalite Octahydrate (ข) Mordenite

สำหรับซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่สังเคราะห์ด้วยดินขาวที่ความดันเริ่มต้นต่างกัน คือ 1, 3 และ 5 บรรยากาศ เมื่อนำทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffraction แล้วเปรียบเทียบกับ XRD pattern กับ XRD pattern ของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มาตรฐานจากบริษัท SÜD-CHEMIE (ดังภาพที่ 24) จะเห็นว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ คือ ชนิด ZSM-5 ที่มีความบริสุทธิ์เทียบเท่ากับซีโอไลต์มาตรฐาน นอกจากนั้นยังพบว่าซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ที่ความดัน 3 และ 5 บรรยากาศจะมีความสูงของพีคหลักที่ 2 θ ระหว่าง 22-25 องศา มากกว่า ZSM-5 มาตรฐาน และ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ที่ความดัน 1 บรรยากาศ แสดงว่ามีขนาดผลึกใหญ่กว่า ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ดังภาพที่ 25) จะให้ผลึกรูปทรงเตตราฮีดรอล (tetrahedral) และให้ผลยืนยันการสังเคราะห์ด้วยความดันเริ่มต้นที่สูงขึ้นจะได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสอดคล้องกับผลจาก XRD โดยที่ความดัน 1 บรรยากาศ ให้ผลึกมีขนาดเล็ก 1 ไมครอน เมื่อเพิ่มความดันเป็น 3 และ 5 บรรยากาศผลึกที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่ 3 บรรยากาศจะมีผลึกขนาดเล็กและใหญ่ปนกัน (ขนาด 1 และ 2.5 ไมครอนตามลำดับ) ส่วนผลึกที่ 5 บรรยากาศจะมีขนาดประมาณ 2.5 ไมครอน



ภาพที่ 24 XRD pattern ของซีโอไลต์ชนิด ก.ZSM-5 มาตรฐาน

ข. ZSM-5 (1 atm) ค. ZSM-5 (3 atm) และ ง. ZSM-5 (5 atm)

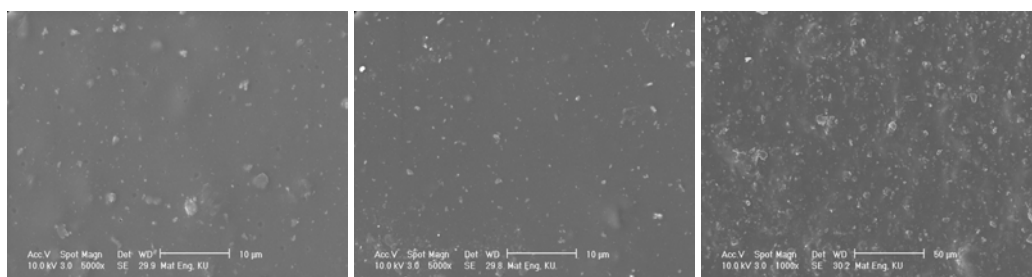


ภาพที่ 25 ภาพ SEM ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ (ก) SM-5 (1 atm)
(ข) ZSM-5 (3 atm) และ (ค) ZSM-5 (5 atm)

2. ผลการวิเคราะห์สมบัติเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ซีโอไลต์

2.1 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของซีโอไลต์ในเยื่อแผ่น

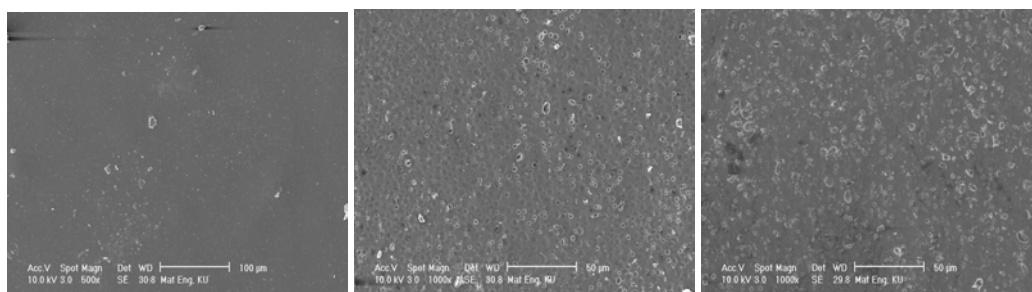
เมื่อนำเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์ด้วย SEM เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของซีโอไลต์ 3 ชนิด คือ ZSM-5 (สังเคราะห์ที่ 1 และ 5 บรรยากาศ) Mordenite และ Sodalite Octahydrate โดยผสมด้วยปริมาณ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ผลที่ได้แสดงในภาพที่ 26 สังเกตได้ว่าการกระจายตัวอยู่ในเกณฑ์ดี แต่จากภาพ SEM วิเคราะห์ได้ไม่ชัดเจนนักเพราะภาพที่เห็นจะมีทั้งส่วนที่เป็นการกระจายตัวของซีโอไลต์บนพื้นผิวและบางส่วนเป็นร่องรอยที่เกิดจากการลอกเยื่อออกจากแผ่นกระจก จึงนำเยื่อแผ่นไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM/EDS เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่น เนื่องจากซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ การดูลักษณะการกระจายตัวของซิลิกอนจะสามารถบอกได้ว่าซีโอไลต์ที่ใส่ในเยื่อแผ่นที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอหรือไม่ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 27-30



(ก) 5% ZSM-5 (1 atm)

(ข) 10% ZSM-5 (1 atm)

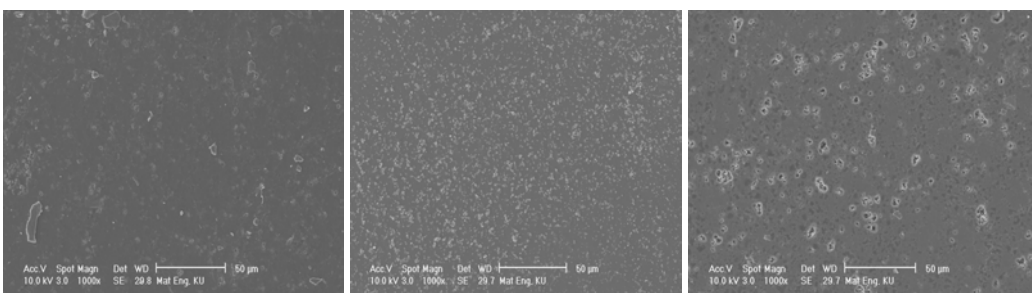
(ค) 15% ZSM-5 (1 atm)



(ง) 5% ZSM-5 (5 atm)

(จ) 10% ZSM-5 (5 atm)

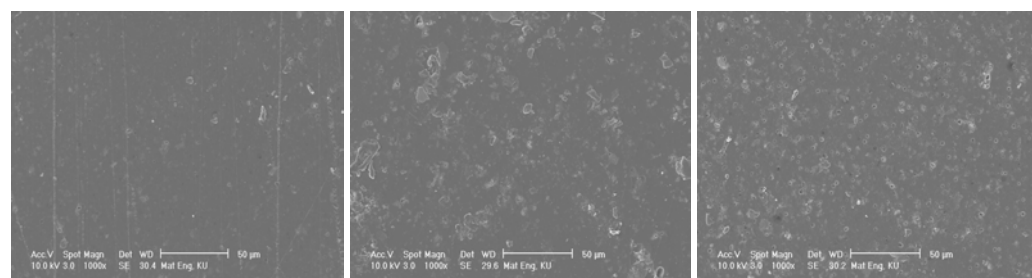
(ฉ) 15% ZSM-5 (5 atm)



(ซ) 5% Mordenite

(ฅ) 10% Mordenite

(ณ) 15% Mordenite

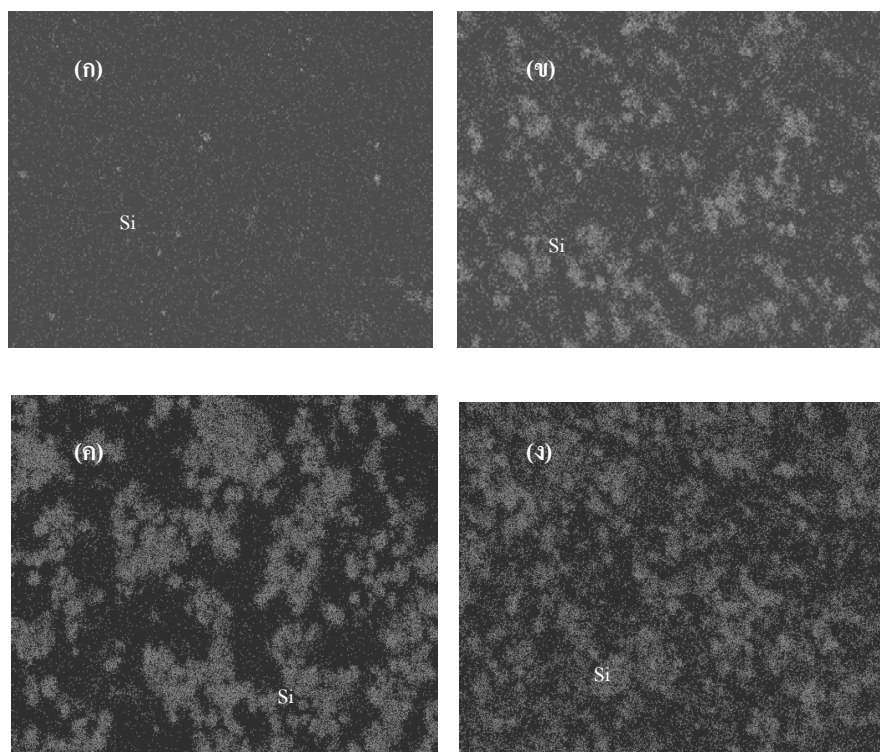


(ญ) 5% Sodalite

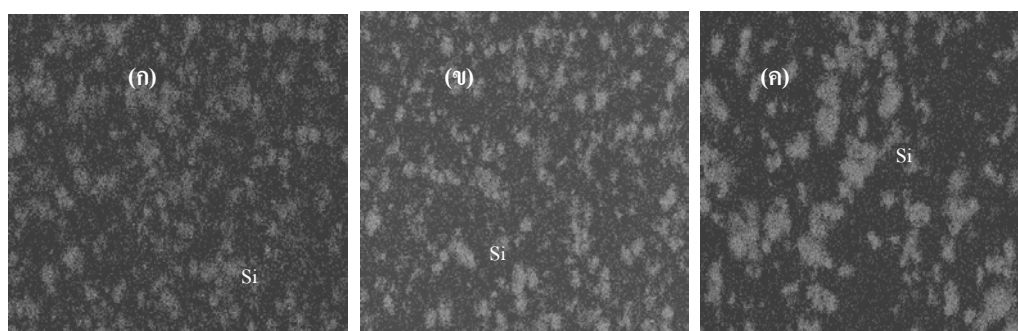
(ฎ) 10% Sodalite

(ฏ) 15% Sodalite

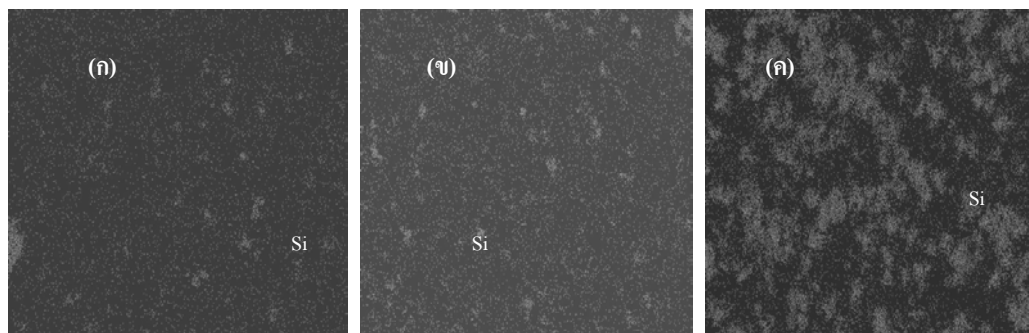
ภาพที่ 26 ภาพ SEM ที่แสดงการกระจายตัวของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ ปริมาณ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนักบนเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117



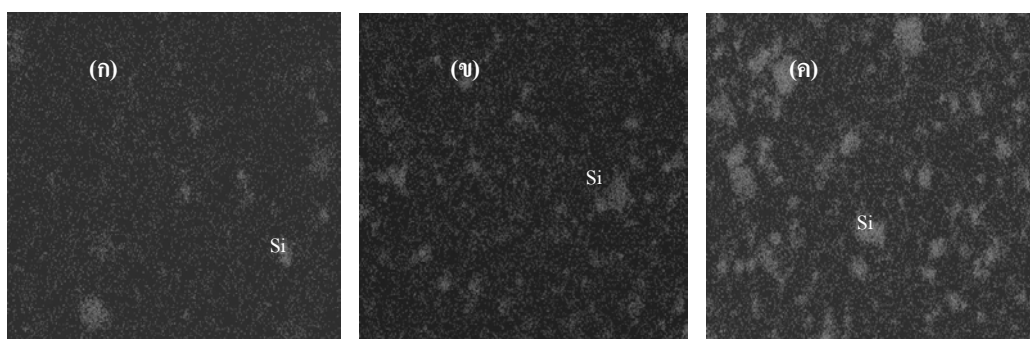
ภาพที่ 27 ภาพ SEM/EDS การกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่นแนฟฟิออน /
ZSM-5 (1 atm) ปริมาณ (ก) 5% (ข) 10% (ค) 15% และ (ง) 25% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 28 ภาพ SEM/EDS การกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่นแนฟฟิออน /
ZSM-5 (5 atm) ปริมาณ ก) 5% (ข) 10% และ (ค) 15% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 29 ภาพ SEM/EDS แสดงการกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่นแนฟฟิออน /
Mordenite ปริมาณ (ก) 5% (ข) 10% และ (ค) 15% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 30 ภาพ SEM/EDS แสดงการกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่น แนฟฟิออน /
Sodalite Octahydrate ปริมาณ (ก) 5% (ข) 10% และ (ค) 15% โดยน้ำหนัก

จากภาพ SEM/EDS พบว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม ZSM-5 (1 atm) ในปริมาณส่วนผสม 5%, 10% และ 25% โดยน้ำหนักมีการกระจายตัวค่อนข้างดี แต่ที่ 15% มีการจับตัวกันของซิลิกอนเป็นกลุ่มก้อน สำหรับเยื่อแผ่นที่ผสม ZSM-5 (5 atm), Mordenite และ Sodalite Octahydrate มีการกระจายตัวค่อนข้างดีที่ปริมาณส่วนผสม 5% และ 10% โดยน้ำหนัก แต่ที่ 15% เริ่มมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของซิลิกอน โดยรวมจะสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณส่วนผสมของซีโอไลต์เพิ่มขึ้นจะมีการกระจายตัวของซิลิกอนบนเยื่อแผ่นแย่ลง เนื่องจากปริมาณของซีโอไลต์ที่มากขึ้นแต่เวลาในการผสมคงที่และเทคนิคการผสมยังไม่ได้พอทำให้ซีโอไลต์กระจายตัวได้ไม่เต็มที่ มีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งอาจมีผลต่อสมบัติอื่นๆ ของเยื่อแผ่นด้วย

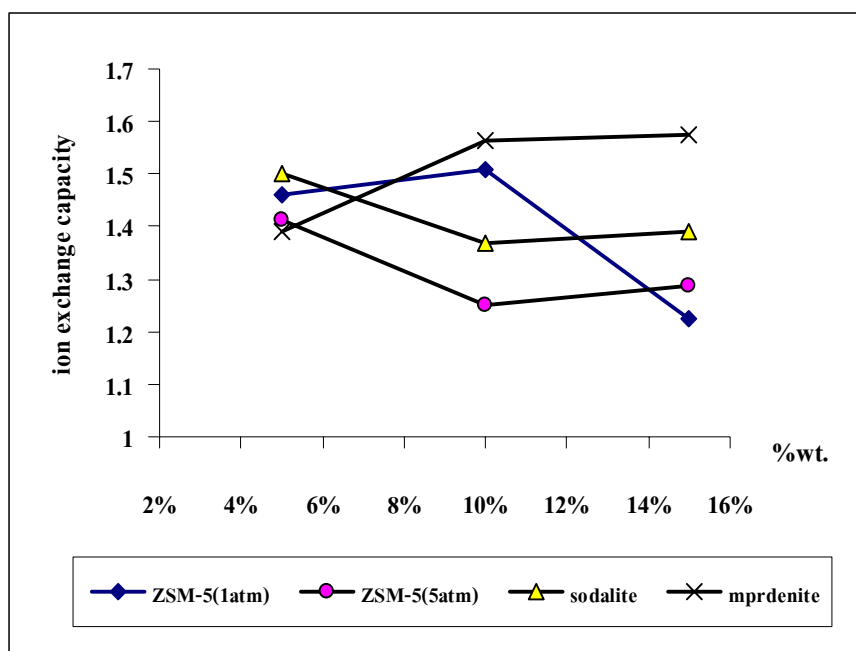
2.2 ผลการค่าการแลกเปลี่ยนไอออน

ในการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (IEC) คาดว่าเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์น่าจะมีความสามารถสูงกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสมและเมื่อปริมาณส่วนผสมมากขึ้นค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนก็น่าจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากซีโอไลต์มีความเป็นกรดในตัวเอง จากอัตราส่วน Si/Al ที่แสดงความเป็นกรดของซีโอไลต์แต่ละชนิดถ้าอัตราส่วนของ Si/Al มีค่าสูงจะมีความเป็นกรดต่ำ สำหรับ Sodalite Octahydrate, Mordenite และ ZSM-5 จะมีอัตราส่วนส่วนของ Si/Al เท่ากับ 1.5, 5 และ 22 ตามลำดับ ดังนั้นเยื่อแผ่นที่ผสม Sodalite Octahydrate น่าจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุด รองลงมาเป็น Mordenite และ ZSM-5 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า เมื่อนำเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 และเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 ที่ผสมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5, Mordenite และ Sodalite Octahydrate ที่ปริมาณส่วนผสม 5%, 10% และ 15% มาทำการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ก) ได้ผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 น้ำหนักแห้งของเยื่อแผ่นและปริมาตรของ HCl 0.005 โมลาร์ ที่ใช้ในการไตเตรทกับ NaOH 0.005 โมลาร์ เพื่อนำมาหาค่าการแลกเปลี่ยนไอออน

สาร	IEC
pure nafion	1.02
5% ZSM-5 (1 atm)	1.46
10% ZSM-5 (1 atm)	1.51
20% ZSM-5 (1 atm)	1.22
5% ZSM-5 (5 atm)	1.41
10% ZSM-5 (5 atm)	1.25
15% ZSM-5 (5 atm)	1.28
5% Sodalite Octahydrate	-
10% Sodalite Octahydrate	1.52
15% Sodalite Octahydrate	1.36
5% Mordenite	1.38
10% Mordenite	1.56
15 % Mordenite	1.57

จากผลการทดลองวัดค่าการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่น เมื่อทำการเปรียบเทียบผลระหว่างเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์กับเยื่อแผ่นที่ไม่ผสมซีโอไลต์ พบว่าเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนดีกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ผสมซีโอไลต์ในทุกตัวอย่างซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดไว้ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบในแต่ละตัวอย่างพบว่าเยื่อแผ่นแต่ละชนิดมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 1.2-1.6 และสำหรับเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ ZSM-5 และ Sodalite Octahydrate ที่ปริมาณส่วนผสมต่างกัน จะมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำลงที่ปริมาณส่วนผสมมากขึ้น แต่เยื่อแผ่นที่ผสม Mordenite จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อผสมมากขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ไม่สามารถบอกแนวโน้มได้อย่างชัดเจน อาจเนื่องจากเยื่อแผ่นที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่น ยิ่งเมื่อปริมาณส่วนผสมของซีโอไลต์สูงขึ้นการกระจายตัวยังไม่สม่ำเสมอ (สังเกตจากภาพ SEM/EDS) ซึ่งในการทดสอบจะใช้เยื่อแผ่นเพียงบางส่วนทำให้ผลที่ได้ไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ เมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลจะได้ผลดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 Mordenite และ Sodalite Octahydrate ที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ กัน

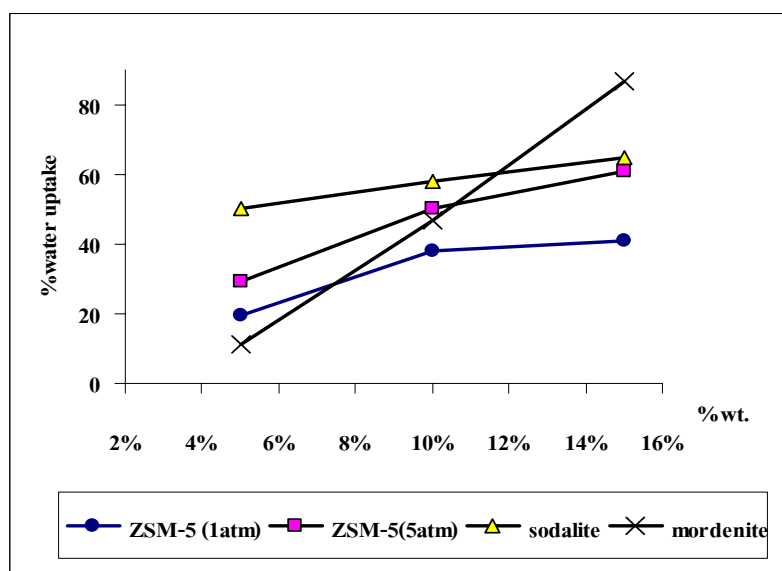
2.3 ผลการวัดค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ

ในการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์กับเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ คาดว่าเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์น่าจะมีสามารถในการดูดซับน้ำดีกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ เนื่องจากซีโอไลต์ที่เติมมีสมบัติความเป็นความเป็นรูพรุนและสามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลน้ำได้ทำให้มีสมบัติในการกักเก็บน้ำได้ดี เมื่อนำเยื่อแผ่นมาทำการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ ซึ่งสามารถหาได้จากผลความแตกต่างของน้ำหนักแห้งและน้ำหนักเปียกของเยื่อแผ่นที่ทำการแช่น้ำจนอิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ก) ได้ผลดังตาราง 8

ตารางที่ 8 ค่าน้ำหนักที่แตกต่างกันระหว่างเยื่อแผ่นแห้งกับเยื่อแผ่นเปียก และค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่นแต่ละชนิด

ชนิดเยื่อแผ่น	น้ำหนักแห้ง (g)	น้ำหนักเปียก (g)	%water uptake
pure nafion	0.028	0.035	25.00
5%zsm-5 (1 atm)	0.031	0.037	19.35
10%zsm-5 (1 atm)	0.029	0.040	37.93
15%zsm-5 (1 atm)	0.032	0.045	40.63
5%zsm-5 (5 atm)	0.017	0.022	29.41
10%zsm-5 (5 atm)	0.018	0.027	50.00
15%zsm-5 (5 atm)	0.021	0.034	60.91
5%sodalite	0.024	0.036	50.00
10%sodalite	0.019	0.030	57.89
15%sodalite	0.017	0.028	64.71
5% mordenite	0.018	0.020	11.11
10% mordenite	0.015	0.022	46.66
15 % mordenite	0.015	0.028	86.66

จากผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่นพบว่า เยื่อแผ่นแต่ละชนิดที่ผสมซีโอไลต์จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำมากกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์และมีค่าเพิ่มขึ้นต่างกันเมื่อปริมาณซีโอไลต์ที่เติมมากขึ้น โดยเยื่อแผ่นที่เติมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (1 atm) จะมีค่าการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นจาก 19.35 เป็น 37.93 และ 40.63% ที่ปริมาณส่วนผสม 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนักตามลำดับ สำหรับเยื่อแผ่นที่เติม ZSM-5 (5 atm) จะมีค่าการดูดซับน้ำเพิ่มจาก 29.41 เป็น 50.00 และ 60.91% ที่ปริมาณส่วนผสม 5, 10 และ 15% ตามลำดับ ส่วนเยื่อแผ่นชนิดที่เติม Sodalite Octahydrate เมื่อปริมาณที่เติมเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับน้ำจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับเพียงเล็กน้อยจาก 50.00 เป็น 57.89% ที่ปริมาณส่วนผสม 5% เป็น 10% โดยน้ำหนักและที่ 15% มีค่าเท่ากับ 64.71% สำหรับเยื่อแผ่นชนิดที่เติมซีโอไลต์ชนิด Mordenite จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 5 % เป็น 10% ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มจาก 11.11 เป็น 46.66% และเมื่อเพิ่มเป็น 15% ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 86.66 จากผลที่ได้จะพบว่าเยื่อแผ่นชนิดที่เติม Mordenite จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำมากที่สุด ตามด้วยชนิดที่เติม Sodalite Octahydrate และ ZSM-5 ที่ 1 และ 5 บรรยากาศตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดไว้แสดงว่า การเติมซีโอไลต์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่นได้ดีขึ้น เมื่อนำค่าที่ได้มาทำการสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลของเยื่อแผ่นแต่ละชนิดให้ชัดเจนขึ้นจะได้ผลดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 Mordenite และ Sodalite Octahydrate ที่ปริมาณส่วนผสมต่างๆ กัน

2.4 ผลการวัดค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน

การวัดค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนเพื่อดูประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นว่ามีการรั่วซึมของก๊าซไฮโดรเจนหรือไม่ โดยหลักการแล้วค่าการรั่วซึมของก๊าซไฮโดรเจนต่ำๆ แสดงว่าเยื่อแผ่นมีประสิทธิภาพดี เพราะก๊าซไฮโดรเจนที่เข้ามาในเซลล์ด้านแคโทดจะสามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นโปรตอน (H^+) ได้อย่างเต็มที่ก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นไปด้านแอโนดและรวมตัวกับออกซิเจนและอิเล็กตรอนแล้วทำให้เกิดกระแสสูงสุด

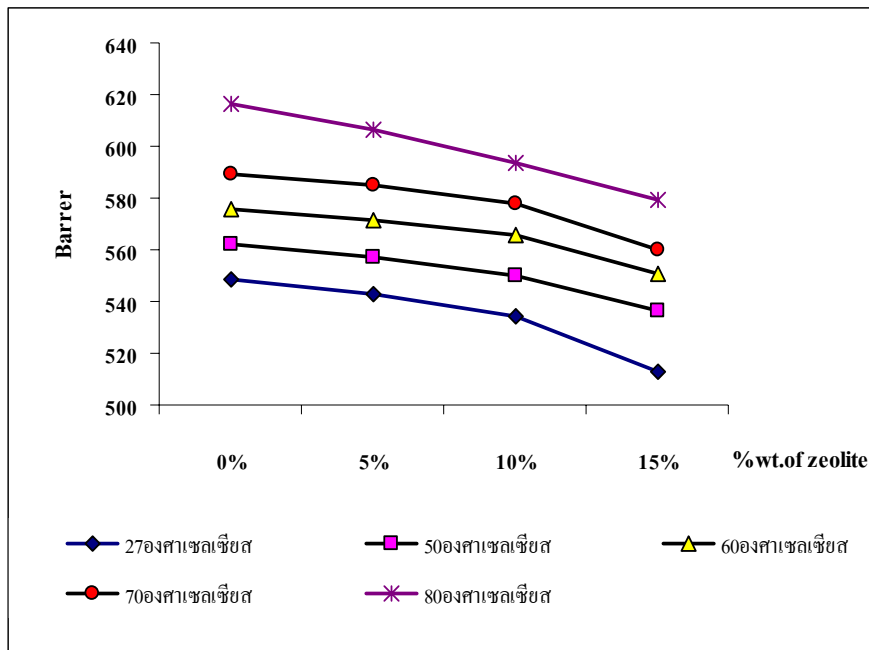
ในการทดสอบจะทำการวัดค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนเปรียบเทียบระหว่างเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์กับเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ปริมาณส่วนผสม 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก ผลที่ได้คาดว่าเยื่อแผ่นที่เติมซีโอไลต์น่าจะให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนต่ำกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ เพราะซีโอไลต์ที่เติมลงไปเป็นผลึกของแข็งจะไปขัดขวางการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเมื่อปริมาณของซีโอไลต์มากขึ้นค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนก็น่าจะลดลงด้วย และได้มีการทดสอบที่อุณหภูมิสูงด้วยว่าจะส่งผลอย่างไรต่อการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 27, 50, 60, 70 และ 80°C

เมื่อนำเยื่อแผ่นแนฟฟิออนมาวัดค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยจะทำการวัดเฉพาะเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์และเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (1 atm) แสดงผลดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน (Barer) ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

ปริมาณ ZSM-5 (1atm)	ค่าการซึมผ่านก๊าซไฮโดรเจน (Barer)				
	27°C	50°C	60°C	70°C	80°C
0%	548.90	526.37	575.84	589.31	616.25
5%	542.72	556.91	571.10	585.29	606.61
10%	534.02	549.85	565.74	577.64	593.46
15%	513.17	536.71	550.83	560.25	579.46

จากค่าที่ได้ในตารางที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์กับเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์พบว่า ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นที่ไม่ผสมซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 27°C มีค่าเท่ากับ 548.9 barrer ซึ่งมีค่ามากกว่าเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ในทุกตัวอย่างที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะให้ผลลักษณะเดียวกันซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดไว้คือเมื่อเติมซีโอไลต์ลงไปแล้วทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนลดลง และเมื่อเปรียบเทียบเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณส่วนผสมต่างกันพบว่า ค่าจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการใช้งานสูงขึ้น เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิที่ทำการทดสอบสูงขึ้นก็จะทำให้เยื่อแผ่นขยายตัวเกิดช่องว่างภายในระหว่างเนื้อของแนฟฟิออนกับซีโอไลต์ที่เติมลงไป ก๊าซไฮโดรเจนจึงสามารถซึมผ่านเยื่อแผ่นได้มากขึ้น และเมื่อนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลจะแสดงได้ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน ของเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม ZSM-5 (1 atm) ในปริมาณต่างกันเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่างกัน

2.5 ค่าการนำโปรตอน

ในการทดสอบการวัดค่าการนำโปรตอน ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้ระหว่างเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์กับเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ คาดว่าที่อุณหภูมิไม่สูงนักค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์น่าจะให้ค่าการนำโปรตอนที่สูงกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์เล็กน้อยแต่จะมีผลมากเมื่อทำการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพราะภายในโครงสร้างของซีโอไลต์มีโพรงที่สามารถกักเก็บน้ำได้ดีทำให้รักษาความชื้นของเยื่อแผ่นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำภายในเซลล์เป็นหลัก ดังนั้นการเติมซีโอไลต์น่าจะช่วยกักเก็บความชื้นในเซลล์เมื่อมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเปรียบเทียบค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เติมซีโอไลต์ในแต่ละชนิด คาดว่าสมบัติที่แตกต่างกันของซีโอไลต์ในด้านความเป็นกรด ปริมาณที่เติมและขนาดผลึกที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ค่าการนำโปรตอนที่ได้แตกต่างกันด้วย โดยซีโอไลต์ที่มีความเป็นกรดสูงที่สุดน่าจะให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุด คือ Sodalite Octahydrate, Mordenite และ ZSM-5 ตามลำดับ และเมื่อปริมาณซีโอไลต์ที่เติมมากขึ้นค่าการนำโปรตอนก็น่าจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยขนาดที่แตกต่างกันของซีโอไลต์ไม่น่าจะส่งผลต่อค่าการนำโปรตอนมากนัก เพราะขนาดผลึกของซีโอไลต์แต่ละชนิดใกล้เคียงกัน

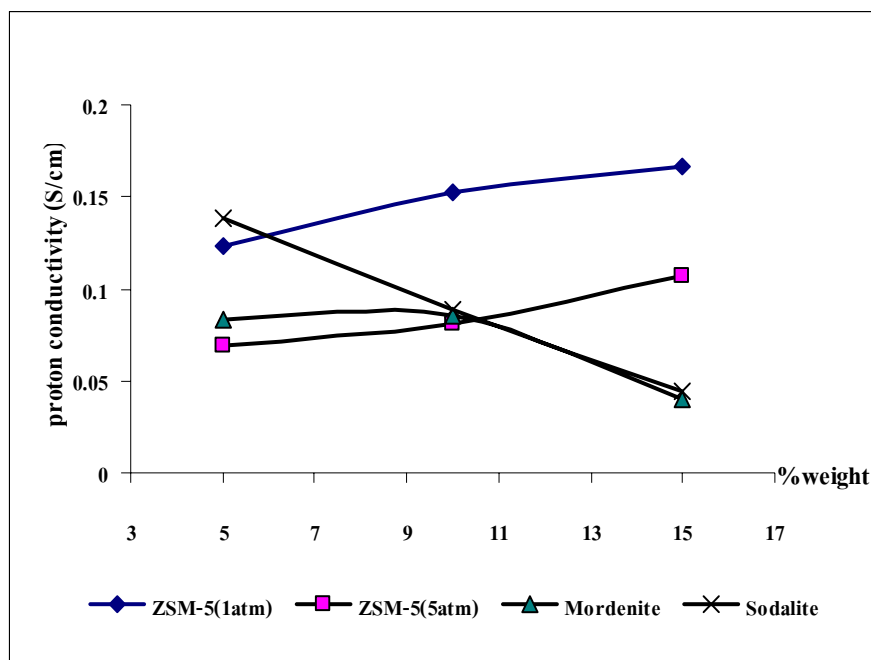
เมื่อนำเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน / ซีโอไลต์ ที่ปริมาณส่วนผสมผสมต่างๆ กันและเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์มาทำการวิเคราะห์ค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิห้อง และความชื้นเฉลี่ย 99.9% ด้วยเครื่องนำโปรตอนชนิด Four-point probe ที่ภาควิชาเคมีเทคนิคจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้ทำการทดลองในช่วงเวลา 30 นาทีของแต่ละตัวอย่างแล้วหาค่าเฉลี่ย (ผลการทดลองโดยละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค) แสดงผลดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าการนำโปรตอน โดยเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9 %

ชนิดของเยื่อแผ่น	ค่าการนำโปรตอน (S/cm)	% การนำโปรตอนที่เพิ่มขึ้น
Pure Nafion 117	0.098	
Nafion 117 + 5% wt ZSM-5 (1 atm)	0.123	26
Nafion 117 + 10% wt ZSM-5 (1 atm)	0.152	55
Nafion 117 + 15% wt ZSM-5 (1 atm)	0.166	69
Nafion 117 + 25% wt ZSM-5 (1 atm)	0.173	77
Nafion 117 + 35% wt ZSM-5 (1 atm)	0.099	1
Nafion 117 + 45% wt ZSM-5 (1 atm)	0.037	-62
Nafion 117 + 5% wt ZSM-5 (5 atm)	0.069	-30
Nafion 117 + 10% wt ZSM-5 (5 atm)	0.081	-17
Nafion 117 + 15% wt ZSM-5 (5 atm)	0.107	9
Nafion 117 + 10% wt Mordenite	0.085	-13
Nafion 117 + 15% wt Mordenite	0.040	-59
Nafion 117 + 5% wt Sodalite	0.138	41
Nafion 117 + 10% wt Sodalite	0.089	-9
Nafion 117 + 15% wt Sodalite	0.044	-55

หมายเหตุ: ค่าเป็น + คือค่ามากขึ้น แต่ถ้าค่าเป็น - คือค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นเนฟฟิออน 117

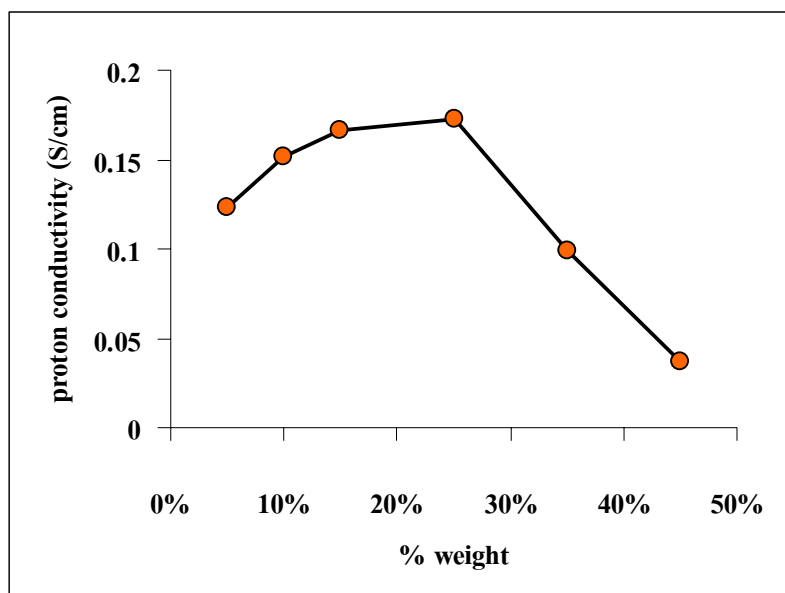
จากค่าที่ได้เมื่อนำมาทำการสร้างกราฟแสดงค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบ เมื่ออัตราส่วนของซีโอไลต์เพิ่มขึ้นเพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง (ดังภาพที่ 34)



ภาพที่ 34 ผลของปริมาณซีโอไลต์ที่มีต่อค่าการนำโปรตอน

จากกราฟและข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% พบว่าเมื่อปริมาณซีโอไลต์ที่เติมมากขึ้นค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์แต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันที่ปริมาณส่วนผสมต่างกันและเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 พบว่าค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่เติมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ความดัน 1 บรรยากาศเท่านั้นที่มีค่าการนำโปรตอนมากกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 (0.098 S/cm) อย่างชัดเจนในทุกตัวอย่าง จึงทำการทดสอบเพิ่มเติมโดยการเพิ่มปริมาณ ZSM-5 (1 atm) มากขึ้นพบว่าเมื่อปริมาณ ZSM-5 (1 atm) ที่เติมมากขึ้นค่าการนำโปรตอนก็จะเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่ปริมาณส่วนผสม 25% ซึ่งมีย่านค่ามากกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ถึง 77% และที่ปริมาณส่วนผสมสูงกว่านี้จะมีค่าการนำโปรตอนลดลงแสดงดังภาพที่ 35 ส่วนเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่เติม ZSM-5 ที่สังเคราะห์ที่ความดัน 5 บรรยากาศจะมีค่าการนำโปรตอนต่ำกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 ที่ปริมาณส่วนผสม 5 และ 10% แต่เมื่ออัตราส่วนมากขึ้นเป็น 15% จะมีค่าการนำโปรตอนมากกว่าแนฟฟิออน 117 คิดเป็น 9% สำหรับเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ชนิด Sodalite Octahydrate ที่ปริมาณส่วนผสม 5% จะมีค่าการนำโปรตอนมากกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 คิดเป็นค่าประมาณ 40% แต่ที่ปริมาณส่วนผสม 10 และ 15% จะมีค่าการนำโปรตอนต่ำกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 และเยื่อแผ่นที่ได้จาก

การเติมซีโอไลต์ชนิด Mordenite ที่ปริมาณส่วนผสม 5, 10 และ 15% จะมีค่าการนำโปรตอนต่ำกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ซึ่งเป็นไปตามการทดลองของ Kwak และคณะ (2003) ที่พบว่าที่อุณหภูมิการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำๆ ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์ชนิด Mordenite จะมีค่ามากกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่เติมซีโอไลต์ชนิด Mordenite



ภาพที่ 35 ผลของปริมาณซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (1 atm) ที่มีต่อค่าการนำโปรตอน

จากผลการทดลองจะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำความชื้นสูงคือที่ อุณหภูมิ 27 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นที่ได้ไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ แสดงว่าความเป็นกรดสูงที่สูงขึ้นของซีโอไลต์ไม่ได้เป็นปัจจัยหลักที่จะทำให้ค่าการนำโปรตอนสูงขึ้นด้วย เพราะจะเห็นได้ว่าเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จะมีค่าการนำโปรตอนดีที่สุดทั้งที่มีค่าความเป็นกรดต่ำสุดในบรรดาซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิดที่เลือกมาทดลอง ดังนั้นจึงคาดว่าปัจจัยที่น่าจะมีผลมากที่สุดก็คงจะเป็นในเรื่องของโครงสร้างที่เหมาะสมกับการเกาะตัวกันของซีโอไลต์และแนฟฟิออนรวมถึงเทคนิคในการผสมและการขึ้นรูปเยื่อแผ่นให้การกระจายตัวของซีโอไลต์อย่างสม่ำเสมอที่จะส่งผลให้เกิดการนำโปรตอนที่ดี

เมื่อทำการวัดค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจน

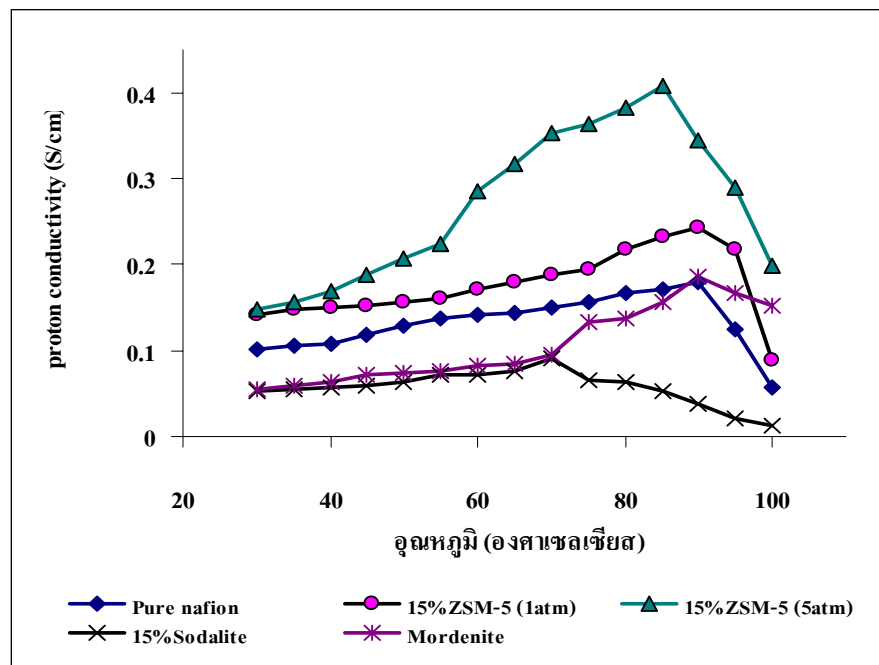
ให้เป็นโปรตอนอิสระ (H^+) เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าการนำโปรตอนสูงขึ้น โดยค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 80 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่แนฟฟิออนสามารถทำงานได้ดีโดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 80°C แนฟฟิออนพอลิเมอร์จะเสื่อมสภาพ ดังนั้นในการทดลองจึงทำการวัดค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 27 °C จนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่า 80°C และรอนค่าการนำโปรตอนเข้าใกล้ศูนย์เพื่อจับเวลาดูการเสื่อมสลายของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 เทียบกับเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน /ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงผลดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน / 15% ซีโอไลต์ เทียบกับเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 ที่อุณหภูมิ 30-100 °C

อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่น (S/cm)				
	Pure nafion	15% ZSM-5 ^a	15%ZSM-5 ^b	15%Sodalite	15% Mordenite
30	0.101	0.141	0.148	0.052	0.055
35	0.106	0.148	0.157	0.054	0.060
40	0.108	0.150	0.170	0.056	0.063
45	0.119	0.153	0.187	0.059	0.071
50	0.129	0.157	0.208	0.064	0.074
55	0.137	0.160	0.225	0.071	0.077
60	0.141	0.171	0.285	0.072	0.082
65	0.143	0.179	0.316	0.076	0.085
70	0.150	0.187	0.353	0.090	0.095
75	0.157	0.194	0.364	0.066	0.133
80	0.166	0.217	0.383	0.064	0.138
85	0.172	0.233	0.408	0.052	0.156
90	0.179	0.243	0.345	0.038	0.185
95	0.125	0.218	0.289	0.022	0.166
100	0.056	0.088	0.199	0.013	0.152

เมื่อ a สัมประสิทธิ์ที่ความดันเริ่มต้น 1 atm, b สัมประสิทธิ์ที่ความดันเริ่มต้น 5 atm

เมื่อนำค่าที่ได้จากตารางที่ 11 มาสร้างกราฟจะได้ดังภาพที่ 36 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (สูงกว่า 27°C) ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออนทั้งชนิดที่มีการเติมซีโอไลต์และชนิดที่ไม่มีการเติมซีโอไลต์จะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิหนึ่งแล้วหลังจากจุดนี้ค่าการนำโปรตอนจะลดลง โดยเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์และเยื่อแผ่นแนฟฟิออนชนิดที่ผสม ZSM-5 (1 atm) และเยื่อแผ่นแนฟฟิออนชนิดที่ผสม Mordenite จะมีค่าการนำโปรตอนมากที่สุดที่อุณหภูมิ 90°C และมีค่ามากกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ โดยเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม ZSM-5 (5 atm) จะมีค่าการนำโปรตอนมากที่สุดที่อุณหภูมิ 85°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.408 S/cm ส่วนเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม Sodalite Octahydrate จะมีค่าการนำโปรตอนมากที่สุดที่อุณหภูมิ 70°C ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าของเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์กับเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ ณ อุณหภูมิเดียวกันที่ 90°C พบว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม ZSM-5 (5 atm) มีประสิทธิภาพการนำโปรตอนดีที่สุดเท่ากับ 0.345 S/cm และเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม Sodalite Octahydrate จะมีประสิทธิภาพการนำโปรตอนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.038 S/cm



ภาพที่ 36 ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 เทียบกับเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออน/ซีโอไลต์ที่ปริมาณส่วนผสม 15% ที่อุณหภูมิ 30 -100 $^{\circ}\text{C}$

จากผลการทดลองพบว่าค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิสูงมีค่ามากขึ้นเพราะที่อุณหภูมิสูงจะกระตุ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดีทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนไปเป็น H^+ ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำทำให้ค่าการนำโปรตอนเพิ่มมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปจะทำให้เยื่อแผ่นแนฟฟิออนสูญเสียน้ำหนักจนเกิดการเสื่อมสภาพของแนฟฟิออนพอลิเมอร์มีผลทำให้ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออนลดลงมากอย่างเห็นชัดเจน แต่สำหรับเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์นอกจากจะมีค่าการนำโปรตอนที่สูงกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์แล้วที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดสูงสุดก็จะยังคงสภาพการนำโปรตอนที่ดีกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์อีกด้วย แสดงว่าซีโอไลต์ที่เติมลงไปนอกจากจะช่วยในการนำโปรตอนแล้วยังช่วยกักเก็บน้ำไว้ในเซลล์ด้วยทำให้เกิดการสูญเสียน้ำน้อยลงที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้คือที่อุณหภูมิสูงการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์ จะมีค่ามากกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้เติมซีโอไลต์

โดยสรุปแล้วค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์แต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันไปทั้งที่อุณหภูมิ $27^{\circ}C$ ความชื้นสัมพัทธ์ 99.9 % และที่อุณหภูมิสูงขึ้นแสดงว่าทั้งชนิดและขนาดอนุภาคของซีโอไลต์ที่เติมรวมถึงสภาวะแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้นก็ล้วนแล้วมีผลต่อค่าความสามารถในการนำโปรตอนซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเยื่อแผ่นเมื่อนำไปใช้งานกับเซลล์ไฟฟ้าจริงด้วย

สรุปผลการทดลอง

1. ในขั้นตอนการสังเคราะห์และเตรียมซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ความดันเริ่มต้นต่างกัน คือ ที่ความดัน 1, 3 และ 5 บรรยากาศ พบว่าซีโอไลต์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ 100% เหมือนกันแต่จะมีขนาดผลึกต่างกันคือ ที่ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศจะได้ผลึกขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร ที่ความดัน 3 บรรยากาศผลึกขนาด 1-2.5 ไมโครเมตรและที่ความดันเริ่มต้น 5 บรรยากาศได้ขนาดผลึกประมาณ 2.5 ไมโครเมตร โดยผลึกมีรูปร่าง tetrahedral สำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Sodalite Octahydrate และ Mordenite ได้ผลึกขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร มีรูปร่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยมเกาะกันคล้ายรูปตะกร้อและกลมมนเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนตามลำดับ

2. เมื่อนำเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 ที่มีการเติมซีโอไลต์มาวิเคราะห์การกระจายตัวด้วยเครื่อง SEM และ EDS พบว่ามีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอที่ปริมาณซีโอไลต์ 5% และ 10% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์มากขึ้นที่ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก การกระจายตัวจะแย่งมีการเกาะรวมกันเป็นกลุ่มเล็กน้อย

3. ในการวิเคราะห์สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อแผ่นพบว่าเยื่อแผ่นชนิดที่มีการเติมซีโอไลต์จะมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดีกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 แต่ไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของซีโอไลต์ที่เติมกับค่าการแลกเปลี่ยนไอออนที่ได้

4. จากการวิเคราะห์ค่าการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่น พบว่าเยื่อแผ่นที่ผสมซีโอไลต์มีการดูดซับน้ำที่ดีกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ โดยเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม ZSM-5 (5 atm) จะมีการดูดซับน้ำได้ดีกว่าเยื่อแผ่นที่ผสม ZSM-5 (1 atm) แสดงว่าขนาดของซีโอไลต์มีผลต่อการกักเก็บน้ำในเซลล์ และเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม ZSM-5 (5 atm) จะมีค่าการดูดซับน้ำใกล้เคียงกับเยื่อแผ่นที่ผสม Sodalite Octahydrate สำหรับเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม Mordenite ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนักจะมีค่าการดูดซับน้ำเพียง 11.11% แต่เมื่อปริมาณที่เติมเพิ่มขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอื่นๆ โดยที่อัตราส่วน 15 % มีการดูดซับน้ำถึงเพิ่มเป็น 86.66 % แสดงว่าชนิดของซีโอไลต์ต่างกันจะให้ค่าการดูดซับน้ำของเยื่อแผ่นต่างกันด้วย

5. ในการวิเคราะห์ค่าการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นพบว่าที่อุณหภูมิห้องและความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% พบว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิดจะมีค่าการนำโปรตอนที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณที่เติมมากขึ้น โดยเยื่อแผ่นที่ผสม ZSM-5 (1 atm) จะมีค่าการนำโปรตอนมากกว่า

เยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ในทุกตัวอย่างและที่ปริมาณ 25% โดยน้ำหนักจะมีค่าการนำโปรตอนดีที่สุดเท่ากับ 0.173 S/cm ซึ่งมากกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 ที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ 77% สำหรับเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม Mordenite จะมีค่าต่ำกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ในทุกตัวอย่าง ส่วนเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสม Sodalite Octahydrate ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนักจะมีค่าการนำโปรตอนดีกว่าเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์คิดเป็น 41% และเมื่อปริมาณที่เติมเพิ่มขึ้นค่าการนำโปรตอนจะลดลง แสดงว่าปริมาณและชนิดซีโอไลต์ที่เติมมีผลต่อการนำโปรตอนที่เพิ่มขึ้นด้วย

6. เมื่อทำการวัดค่าการนำโปรตอนที่อุณหภูมิสูงขึ้น (30-100°C) ความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้น 99.9% ของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 และเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยค่าจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 85-90°C แล้วหลังจากนั้นค่าจะลดลง โดยเยื่อแผ่นแนฟฟิออน 117 จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก 0.179 S/cm (90 °C) เป็น 0.056 S/cm (100°C) แต่เยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ผสมซีโอไลต์จะมีค่าลดลงช้ากว่าและให้ค่าการนำโปรตอนสูงสุดมากกว่าเยื่อแผ่นที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ โดยเยื่อแผ่นชนิดแนฟฟิออน/ ZSM-5 (5 atm) จะมีค่าการนำโปรตอนดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.408 S/cm (85°C) แล้วลดลงเท่ากับ 0.199 S/cm (100°C) ส่วนเยื่อแผ่นชนิดที่เติม Sodalite Octahydrate มีค่าการนำโปรตอนแย่ที่สุด เนื่องจากมีความสามารถในการรักษาสมบัติการนำโปรตอนน้อยที่สุดคือ ค่าการนำโปรตอนจะลดลงเร็วกว่าตัวอย่างอื่นโดยมีค่าเท่ากับ 0.090 S/cm (70°C) แล้วลดลงเหลือ 0.013 S/cm (100°C)

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าทั้งชนิด ขนาดและสภาวะในการใช้งานของเยื่อแผ่นแนฟฟิออนที่ใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเติมมีผลต่อปริมาณน้ำภายในเซลล์ซึ่งส่งผลต่อค่าการนำโปรตอดังนั้นจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นเพื่อที่จะพัฒนาและนำไปใช้กับเซลล์ไฟฟ้าต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนาเทคนิคการผสมซีโอไลต์ซึ่งเป็นของแข็งกับสารละลายแนฟฟิออนที่เป็นของเหลวชนิดให้มีการผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น อาจมีการเพิ่มเวลาในการกวนผสมให้นานขึ้นหรือใช้เครื่องกวนแบบใบพัด หรือเติมสารช่วยผสมจำพวก surfactant เพื่อลดแรงตึงผิวของแนฟฟิออน
2. ในขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติของเยื่อแผ่นด้านการนำไอออน การดูดซับน้ำ และการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน เยื่อแผ่นที่นำมาวิเคราะห์ควรจะได้จากการเตรียมในครั้งเดียวกัน (แผ่นเดียวกัน) เพื่อให้ผลที่ได้ชัดเจนช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบและสรุปผล
3. ในการวิเคราะห์ค่าการนำโปรตอน พบว่าเยื่อแผ่นที่ผสม ZSM-5 มีประสิทธิภาพในการนำโปรตอนดีที่สุด ทั้งที่เป็นซีโอไลต์ที่มีความเป็นกรดน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ Mordenite และ Sodalite Octahydrate แสดงว่าความเป็นกรดของซีโอไลต์ไม่ได้มีผลมากนัก ควรทำการศึกษาต่อไปว่าอะไรที่มีผลต่อการนำโปรตอน ศึกษารายละเอียดด้านการเกาะตัวของซีโอไลต์บนแนฟฟิออนว่ามีการสร้างพันธะทางเคมีกันหรือไม่และมีผลอย่างไร

เอกสารอ้างอิง

- นิรุติ วานิชกิจ. 2546. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากดินขาว. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 97 น.
- ภัทรพร โล่ห์สุนทร. 2545. การจำแนกชนิดของซีโอไลต์จากเพอร์ไลต์และเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 96 น.
- สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. 2543 เซลล์เชื้อเพลิงแบบโพลีเมอร์ของแข็ง. **การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง. ครั้งที่ 1** สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อภิชัย เทอดเทียนวงษ์. 2543. เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแบบเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว. **การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง. ครั้งที่ 1** สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Adjemian, K.T., S.T. Lee, S. Srinivasan, J. Benziger, and A.B. Bocarsly. 2002. Silicon oxide nafion composite membranes for proton-exchange membrane fuel cell operation at 80-140°C. **Electrochemical Society**. 149A: 256-261.
- Alberti, G., M. Casciola, L. Massinelli, and B. Bauer. 2001. Polymeric proton conducting membranes for medium temperature fuel cell (110-160°C). **Membrane Science**. 185: 73-81.
- Antonucci, P.L., A.S. Arico, P. Creti, E. Ramunni, and V. Antonucci. 1999. Investigation of direct methanol fuel cell based on a composite Nafion-silica electrolyte for high temperature operation. **Solid State Ionics**. 125: 431-437.

- Baglio, V., A. Di Blasi, A.S. Ario, P.L. Antonucci, F. Nannetti, and V. Tricoli. 2005. Investigation of the electrochemical behavior in DMFCs of Chabazite and Clinoptiolite composite membranes. **Electrochimica Acta**. 50: 5181-5188.
- Banerjee, S. and D.E. Curtin. 2004. Nafion[®] perfluorinated membranes in fuel cells. **Fluorine Chemistry**. 125: 1211-1216.
- Bloman, L.J.M.J. and M.N. Mugerwa. 1993. **Fuel cell system**, Plenum Press, Newyork.
- Bruce, P.G. 1995. **Solid State Electrochemistry**, Cambridge University Press.
- Chun, Y., C. Kim., D. Peck, and D. Shin, 1998. Performance of polymer electrolyte membrane fuel cell with thin film catalyst electrodes. **Power Sources**. 71: 174-178.
- Dehertog, W.J.H. and G.F. Froment. 1999. A catalytic route for aromatics production from LPG. **Applied Catalysis**. General 189: 63.
- EG&G Technical Services, Inc. Science Applications International Corporation. 2002. **Fuel Cell Handbook**. 6th ed. National Energy Technology Labolatory, West Virginia.
- Grot, W. G. and G. Rajendran. 1999. Membrane containing inorganic filler and membrane electrode assemblies and electrochemical cells employing same. **United States**.
- Hinatsu, J. T., M. Mizuhata and H. Takenaka. 1994. Water uptake of perfluorosulfonic acid membrane from liquid water and water vapor. **Electeochemical Soc**. 146(6): 1493-1498.
- Hogarth, W. H. J., J. C. Diniz Da Costa and G.Q. (Max) Lu. 2005. Solid acid membrane for high temperature (>140^oC) proton exchange membrane fuel cells. **Power Source**. 142: 223-237

- Jalani, H-J. and R. Datta. 2005. The effect of equivalent weight, temperature, cationic forms, sorbets, and nanoinorganic additives on the sorption behavior of Nafion®. **Membrane Science**. Inpress.
- Janjic, N. and M.S. Surrell. 2002. Evidence for the enhancement of the catalytic action of Zn-ZSM-5-based catalysts for propane aromatization using microwave radiation **Catalysis Communications**. 3: 253.
- Kim, C.S., Y.G. Chun, D.H. Peck, and D.R. Shin. 1998. A novel process to fabricate membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells. **Hydrogen Energy**. 23: 1045-1048.
- Kim, Y-T., M-K. Song, K-H Kim, S-B Park, S-K Min, and H-W. Rhee. 2004. Nafion/ZrSPP composite membrane for high temperature operation of PEMFCs. **Electrochimica Acta**. 50: 645-648.
- Kordesh, K.V. and G.R. Simader. 1996. **Fuel Cells and Their Applications**. Willey, New york.
- Kwak, S-H., T.H. Yang, C-S. Kim, and K-H. Yoon. 2003. Nafion/Mordenite Hybrid Membrane for High-temperature Operation of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. **Solid State Ionics**. 160: 309-315.
- Malhota, S. and R. Datta. 1997. Membrane-supported nonvolatile acidic electrolytes allow higher temperature operation of proton-exchange membrane fuel cells. **Electrochem. Soc.** 144(2): L23-L26.
- Mauritz, K.A. and J.T. Payne. 2000. [Perfluorosulfonate ionomer]/silicate hybride membranes via base-catalyzed in situ sol-gel processes for tetraethylorthosilicate. **Membrane Science**. 168(1-2): 39-51.

- Mukerjee, S. and S. Srinivasan. 1993. Enhanced electrocatalysis of oxygen reduction of platinum alloys in proton exchange membrane fuel cells. **Electroanalytical Chemistry**. 357: 201-224.
- Nikhil, H.L., K. Dunn and R. Datta. 2005. Synthesis and characterization of Nafion®-MO₂ (M=Zr, Si, Ti) nanocomposite membranes for higher temperature PEM fuel cells. **Electrochimica Acta**. 51: 553-560.
- Oldman, H.B. and J.C. Myland. 1994. **Fundamentals of Electrochemical Science**, Academic Press.
- Park, Y.-S. and Y. Yamazaki. 2005. Low water /methanol permeable Nafion / CHP organic-inorganic composite membrane with high crystallinity. **European Polymer**. Inpress.
- Patil, P. and P. Zegers. 1994. Fuel cell road traction: an option for a clean global society. **Power Source**. 49: 169-184.
- Patriceon, A., E. Benazzi, Ch. Travers, and J.Y. Bernhard. 2001. Influence of the zeolite structure and acidity on the hydroisomerization of *n*-heptane. **Catalysis Today**. 65: 149-155.
- Ramani, V., H.R. Kunz and J.M. Fenton. 2004. Investigation of Nafion[®] /HPA composite membrane for high temperature/ low relative humidity PEMFC operation. **Membrane Science**. 232: 31-44.
- Shao, Z.-G., P. Joghee and I.-M. Hsing. 2004. Preparation and characterization of hybrid Nafion-silica membrane doped with phosphotungstic acid for high temperature operation of proton exchange membrane fuel cells. **Membrane Science**. 229: 43-51.
- Smitha, B., S. Sridhar and A.A. Khan. 2005. Solid Polymer Electrolyte Membrane for Fuel Cell. **Membrane Sciences**. 259: 10-26.

Sone, Y., P. Ekdunge and D. Simonsson. 1996. Conductivity of Nafion 117 as measured by a Four-Electrode AC Impedance Method. **Electrochem. Soc.** 143: 1254-1259.

Thampan, T., S. Malhotra, J. Zhang, and Datta. 2001. PEM fuel cell as a membrane reactor. **Catalysis Today**, 67: 15-32.

Yan, C., S. Srinivasan, A.B. Cocarsly, S.Tulyani, and J.B. Benziger. 2003. Comparison of physical properties and fuel cell performance of nafion and zirconium phosphate/ nafion composite membranes. **Membrane Science**. 237: 145-161.

Yang, T-H., Y-G. Yoon, C-S. Kim, and S-H. Kwak. 2002. A novel preparation method for a self-humidifying polymer electrolyte membrane. **Power Sources**. 106: 328-332.

<http://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/origins.htm>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณปริมาณสารละลายโซเดียมซัลเฟตเพื่อปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา

การหาปริมาณของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเพื่อปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาว ต้องทราบถึงองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาของดินขาว และองค์ประกอบของซิลิกาที่ผสมอยู่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต มวลโมเลกุลของซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

องค์ประกอบของซิลิกาในดินขาว = 59.50% โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบของซิลิกาในดินขาว = 35.66% โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบของซิลิกาในสารละลายโซเดียมซัลเฟต = 15% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

มวลโมเลกุลของซิลิกา = 60.09

มวลโมเลกุลของอะลูมินา = 101.96

ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาว กำหนดให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่ใช้เป็นอัตราส่วนโดยโมล

ตัวอย่างการคำนวณ

ต้องการเตรียมซีโอไลต์จากดินขาวประมาณ 1 กรัม ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 100 จะต้องเติมสารละลายโซเดียมซัลเฟตปริมาตรเท่าไร

วิธีทำ

จากโจทย์ กำหนดให้ปริมาตรของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเท่ากับ X ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 100 ต้องใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเท่ากับ

$$100 = \frac{0.5950 \times 1 + 0.15 X}{\frac{0.3566 \times 1}{101.96}}$$

ซึ่งสามารถแก้สมการได้ $X = 135.77$ ลูกบาศก์เซนติเมตร

2. การคำนวณปริมาตรแอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) เพื่อใช้เปลี่ยนซีโอไลต์ให้อยู่ในรูปโปรตอน

ตัวอย่างการคำนวณ

แอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ มีมวลโมเลกุล เท่ากับ 80.04 โดยต้องการเตรียมแอมโมเนียมไนเตรต 500 มิลลิลิตร

วิธีทำ

จากสูตรการคำนวณหามวลของแอมโมเนียมไนเตรต

$$\begin{aligned} \text{g /M} &= \text{NV/1000} \\ \text{g} &= (500 \text{ ml}) (80.04 \text{ g}) / 1000 \text{ ml} \\ &= 40.02 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

3. การคำนวณมวลของซีโอไลต์ ZSM-5 เพื่อใช้ในการเตรียมเยื่อแผ่นเชิงประกอบแนฟฟิ-ออน/ซีโอไลต์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

ตัวอย่างการคำนวณ

ต้องการเตรียมซีโอไลต์ 3 % โดยน้ำหนัก โดยใช้ Nafion solution ปริมาตร 5 มิลลิลิตร

Perfluorosulfonylfluoride copolymer resin (Nafion) ที่มีองค์ประกอบของแนฟฟิออนผสมอยู่ในสารละลาย โดยค่าความหนาแน่นสามารถแสดงได้ดังนี้

องค์ประกอบของแนฟฟิออนในสารละลาย เท่ากับ 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ค่าความหนาแน่น เท่ากับ 0.87 g/cm^3

วิธีทำ

ในการเตรียมใช้ Nafion solution = 5 มิลลิลิตร

แสดงได้ดังนี้

สารละลาย 100 มี แนฟฟิออน 5 มิลลิลิตร

สารละลาย 5 มี แนฟฟิออน $(5 \times 5) / 100 = 0.25$ มิลลิลิตร

คิดเป็นน้ำหนัก

$$m = \rho v$$

$$= 0.87 \times 0.25$$

$$= 0.2175 \text{ กรัม}$$

ต้องการเตรียมใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 = 3% โดยน้ำหนัก

$$\begin{aligned}\therefore \text{มวลของซีโอไลต์ ZSM-5 สำหรับเตรียมเยื่อแผ่น} &= 0.2175 \times 0.03 \\ &= 0.0065 \text{ กรัม}\end{aligned}$$

4. ร้อยละการดูดซับน้ำ

จากข้อมูลในตารางที่ 8 เยื่อแผ่น Nafion + 5% wt. ZSM-5 (1atm)

$$\text{น้ำหนักเยื่อแผ่นแห้ง} = 0.031 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักเยื่อแผ่นเปียก} = 0.037 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned}\% \text{Swelling} &= \frac{(\text{Weight}_{\text{wet}} - \text{Weight}_{\text{dry}})}{\text{Weight}_{\text{dry}}} \times 100 \\ &= \frac{(0.037 - 0.031) \times 100}{0.031} = 19.35\end{aligned}$$

5. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

จากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 7 เยื่อแผ่น Nafion + 5% wt. ZSM-5 (1atm)

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์} = 0.005 \text{ นอร์มอล}$$

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก} = 0.005 \text{ นอร์มอล}$$

$$\text{ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์} = 25 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก} = 6.0 \text{ มิลลิลิตร}$$

ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ดูมาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

$$= 10 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{น้ำหนักของเยื่อแผ่น} = 0.053 \text{ กรัม}$$

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

เมื่อ

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

$$\text{Ion exchange capacity} = \frac{\left(0.005(25) - \left(\frac{25}{10}\right) \times 0.005(6.0)\right)}{0.053} = 1.4623 \text{ meq/g}$$

6. ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน

ตัวอย่างการคำนวณ

อัตราการไหลผ่านเยื่อ	=	0.0075	Sccs
ความดันต่าง	=	105.6	cmHg
ความหนาของเยื่อแผ่น	=	0.0014	cm
พื้นที่ของเยื่อแผ่น	=	8.0457	cm ²

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

P	=	ค่าการซึมผ่านของแก๊สไฮโดรเจน (cm ³ (STP)*cm)/(s*cm ² *cmHg)
Q	=	อัตราการไหลผ่านเยื่อแผ่น (Sccs)
L	=	ความหนาของเยื่อแผ่น (cm)
ΔP	=	ความดันต่าง (cmHg)
A	=	พื้นที่ของเยื่อแผ่น (cm ²)

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

$$= 126.53 \text{ Barrer}$$

7. การคำนวณค่าความสามารถในการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบเนฟฟิออน/ซีโอไลต์ที่อัตราส่วนผสมซีโอไลต์ต่างๆ กัน

จากข้อมูลผลการทดลองใน ตารางภาคผนวก ก สามารถคำนวณค่าความสามารถในการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นเชิงประกอบเนฟฟิออน/ซีโอไลต์ที่อัตราส่วนผสมซีโอไลต์เป็น 5 % โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างการคำนวณ

ความหนาของเยื่อแผ่น	=	0.0143 เซนติเมตร
ความกว้างของเยื่อแผ่น	=	1 เซนติเมตร
ระยะห่างระหว่างลวดแพลตินัม	=	0.5 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{The area of membrane} &= \text{Membrane thickness} \times \text{Membrane wide} \\ &= 0.0143 \text{ l} \quad = 0.0143 \text{m}^2 \end{aligned}$$

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

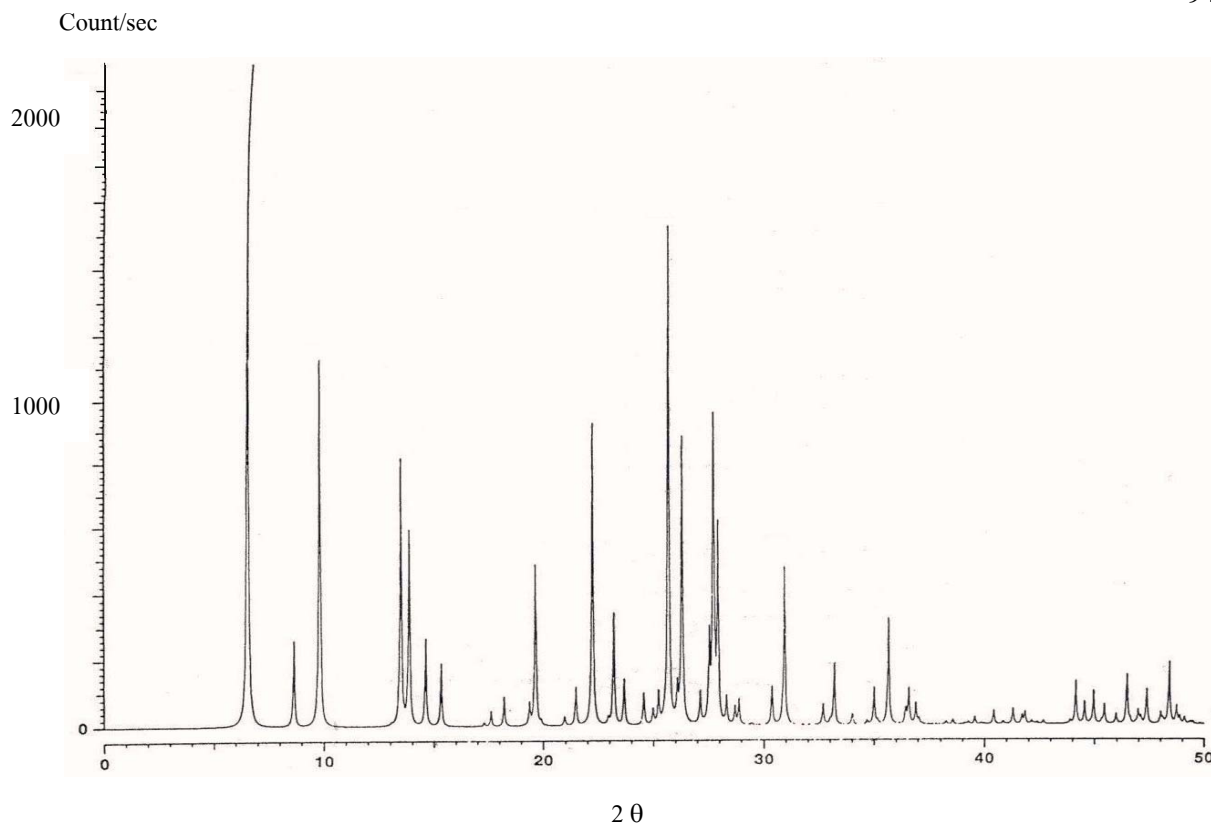
σ	=	ค่าการนำโปรตอน (ซีเมนส์/เซนติเมตร)
R	=	ความต้านทาน (โอห์ม)
L	=	ระยะห่างระหว่างลวดแพลตินัม (เซนติเมตร)
A	=	พื้นที่หน้าตัดของเยื่อแผ่น (ตารางเซนติเมตร)

$$\sigma = \frac{1}{314} \left(\frac{0.5}{0.0143} \right) = 0.123 \text{ ซีเมนส์/เซนติเมตร}$$

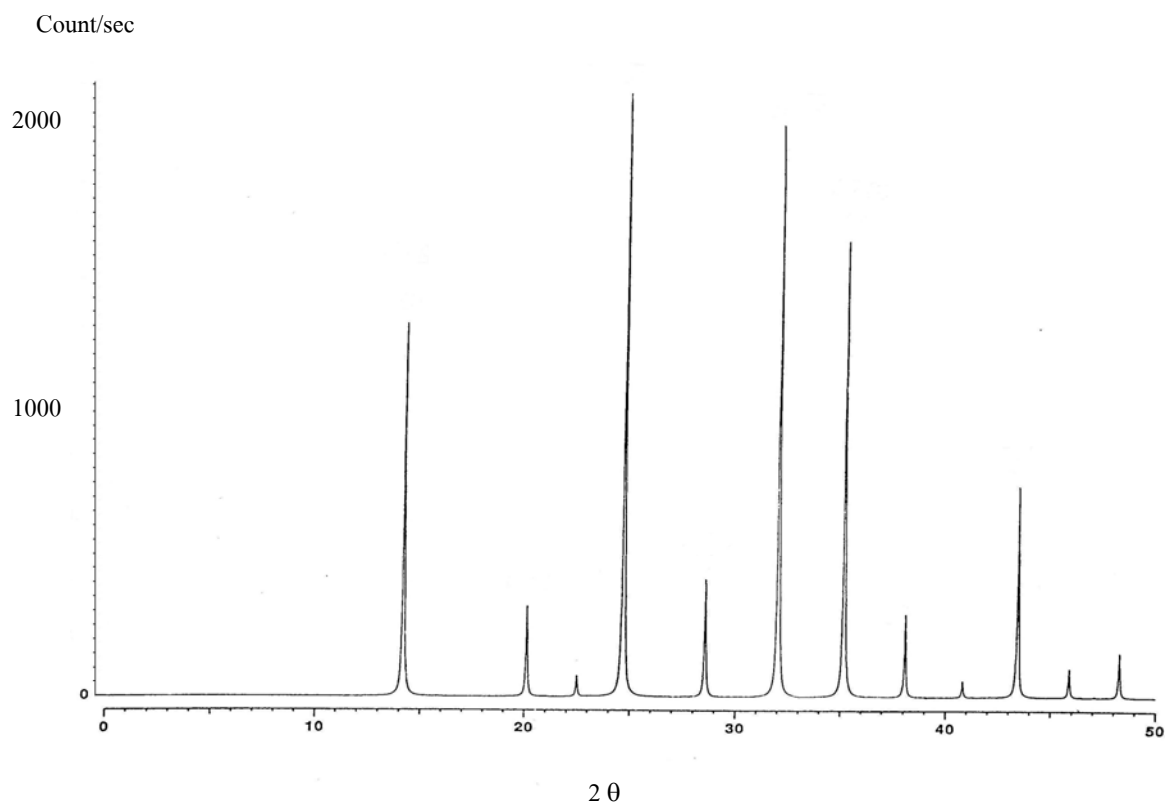
หมายเหตุ :- ค่าความต้านทานที่นำมาใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่เลือกมาจากตารางผลการทดลองค่าใดค่าหนึ่ง

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

ภาคผนวก ข.
XRD-pattern มาตรฐาน



ภาพผนวกที่ 1 XRD pattern มาตรฐานของ Mordenite



ภาพผนวกที่ 2 XRD pattern มาตรฐานของ Sodalite Octahydrate

ภาคผนวก ค.
ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลการทดลอง

1. ค่าการนำโปรตอน

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9%

Nafion 117				5%ZSM-5(1atm)			
Thickness	42	31	38	Thickness	142	143	144
Thickness Average =		0.0037	0.5	Thickness Average =		0.0143	0.5
<i>TIME</i>	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.098</i>	<i>TIME</i>	<i>Ohm (kW)</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.123</i>
1	1.395	0.097	7.43E-04	1	0.243	0.144	0.040496
2	1.392	0.097		2	0.245	0.143	
3	1.390	0.097		3	0.247	0.142	
4	1.387	0.097		4	0.249	0.14	
5	1.385	0.098		5	0.248	0.141	
6	1.383	0.098		6	0.247	0.142	
7	1.382	0.098		7	0.248	0.141	
8	1.380	0.098		8	0.249	0.14	
9	1.379	0.098		9	0.251	0.139	
10	1.378	0.098		10	0.253	0.138	
11	1.377	0.098		11	0.255	0.137	
12	1.376	0.098		12	0.258	0.136	
13	1.375	0.098		13	0.258	0.136	
14	1.374	0.098		14	0.259	0.135	
15	1.372	0.098		15	0.26	0.134	
16	1.372	0.098		16	0.259	0.135	
17	1.370	0.099		17	0.261	0.134	
18	1.370	0.099		18	0.261	0.134	
19	1.368	0.099		19	0.263	0.133	
20	1.367	0.099		20	0.262	0.133	
21	1.366	0.099		21	0.261	0.134	
22	1.365	0.099		22	0.26	0.134	
23	1.364	0.099		23	0.263	0.133	
24	1.364	0.099		24	0.264	0.132	
25	1.363	0.099		25	0.265	0.132	
26	1.362	0.099		26	0.264	0.132	
27	1.361	0.099		27	0.263	0.133	
28	1.360	0.099		28	0.266	0.131	
29	1.358	0.100		29	15.885	0.002	
30	1.358	0.100		30	15.888	0.002	

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% (ต่อ)

Nafion-ZSM-5(1atm) 10%				Nafion-ZSM-5(1atm) 15%			
Thickness (mm)	144	148	147	Thickness (mm)	58	57	54
Thickness Average (mm)		0.014633	0.5	Thickness Average (mm)		0.005633	0.5
<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.152</i>	<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.166</i>
1	0.222	0.154	3.98E-03	1	0.539	0.165	1.44E-03
2	0.221	0.155		2	0.539	0.165	
3	0.219	0.156		3	0.538	0.165	
4	0.214	0.160		4	0.538	0.165	
5	0.216	0.158		5	0.538	0.165	
6	0.217	0.157		6	0.538	0.165	
7	0.219	0.156		7	0.538	0.165	
8	0.221	0.155		8	0.538	0.165	
9	0.219	0.156		9	0.538	0.165	
10	0.223	0.153		10	0.538	0.165	
11	0.224	0.153		11	0.537	0.165	
12	0.225	0.152		12	0.537	0.165	
13	0.228	0.150		13	0.536	0.166	
14	0.221	0.155		14	0.536	0.166	
15	0.221	0.155		15	0.536	0.166	
16	0.223	0.153		16	0.535	0.166	
17	0.227	0.151		17	0.535	0.166	
18	0.225	0.152		18	0.534	0.166	
19	0.223	0.153		19	0.533	0.167	
20	0.224	0.153		20	0.532	0.167	
21	0.227	0.151		21	0.532	0.167	
22	0.228	0.15		22	0.530	0.167	
23	0.228	0.15		23	0.530	0.167	
24	0.231	0.148		24	0.529	0.168	
25	0.232	0.147		25	0.529	0.168	
26	0.233	0.147		26	0.528	0.168	
27	0.231	0.148		27	0.527	0.168	
28	0.235	0.145		28	0.526	0.169	
29	0.237	0.144		29	0.525	0.169	
30	0.233	0.147		30	0.525	0.169	

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% (ต่อ)

Nafion-ZSM-5(1atm) 25%				Nafion-ZSM-5(1atm) 35%			
Thickness (mm)	37	46	53	Thickness (mm)	30	26	26
Thickness Average (mm)		0.004533	0.5	Thickness Average (mm)		0.002733	0.5
<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.173</i>	<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.099</i>
1	0.645	0.171	1.17E-03	1	1.113	0.099	3.36E-04
2	0.643	0.172		2	1.119	0.099	
3	0.644	0.171		3	1.118	0.099	
4	0.642	0.172		4	1.117	0.099	
5	0.642	0.172		5	1.112	0.099	
6	0.642	0.172		6	1.110	0.099	
7	0.641	0.172		7	1.123	0.098	
8	0.641	0.172		8	1.112	0.099	
9	0.641	0.172		9	1.117	0.099	
10	0.640	0.172		10	1.118	0.099	
11	0.640	0.172		11	1.116	0.099	
12	0.640	0.172		12	1.114	0.099	
13	0.639	0.173		13	1.113	0.099	
14	0.639	0.173		14	1.115	0.099	
15	0.638	0.173		15	1.117	0.099	
16	0.638	0.173		16	1.115	0.099	
17	0.637	0.173		17	1.114	0.099	
18	0.636	0.173		18	1.118	0.099	
19	0.636	0.173		19	1.111	0.099	
20	0.636	0.173		20	1.114	0.099	
21	0.635	0.174		21	1.111	0.099	
22	0.635	0.174		22	1.110	0.099	
23	0.634	0.174		23	1.108	0.100	
24	0.634	0.174		24	1.105	0.100	
25	0.634	0.174		25	1.111	0.099	
26	0.632	0.175		26	1.115	0.099	
27	0.632	0.175		27	1.118	0.099	
28	0.630	0.175		28	1.111	0.099	
29	0.630	0.175		29	1.110	0.099	
30	0.630	0.175		30	1.114	0.099	

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% (ต่อ)

Nafion-ZSM-5(1atm) 45%			
Thickness (mm)	43	49	58
Thickness Average (mm)		0.005	0.5
<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.037</i>
1	3.023	0.036	3.83E-04
2	3.017	0.037	
3	3.012	0.037	
4	3.009	0.037	
5	2.999	0.037	
6	2.999	0.037	
7	2.999	0.037	
8	2.999	0.037	
9	2.998	0.037	
10	2.996	0.037	
11	2.993	0.037	
12	2.991	0.037	
13	2.988	0.037	
14	2.984	0.037	
15	2.982	0.037	
16	2.987	0.037	
17	2.974	0.037	
18	2.969	0.037	
19	2.969	0.037	
20	2.967	0.037	
21	2.962	0.037	
22	2.956	0.037	
23	2.950	0.037	
24	2.947	0.037	
25	2.944	0.037	
26	2.939	0.038	
27	2.930	0.038	
28	2.925	0.038	
29	2.919	0.038	
30	2.910	0.038	

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% (ต่อ)

Nafion-modernite 3%				Nafion-modernite 5%			
Thickness (mm)	48	49	52	Thickness (mm)	54	53	52
Thickness Average (mm)		0.00496	0.5	Thickness Average (mm)		0.0053	0.5
<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct</i>	<i>0.082</i>	<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct</i>	<i>0.083</i>
1	1.180	0.085	1.4E-03	1	1.134	0.083	2.87E-4
2	1.195	0.084		2	1.135	0.083	
3	1.197	0.084		3	1.135	0.083	
4	1.203	0.084		4	1.136	0.083	
5	1.202	0.084		5	1.137	0.083	
6	1.203	0.084		6	1.137	0.083	
7	1.204	0.084		7	1.138	0.083	
8	1.207	0.083		8	1.138	0.083	
9	1.213	0.083		9	1.139	0.083	
10	1.214	0.083		10	1.141	0.083	
11	1.217	0.083		11	1.142	0.083	
12	1.217	0.083		12	1.142	0.083	
13	1.222	0.082		13	1.142	0.083	
14	1.223	0.082		14	1.140	0.083	
15	1.223	0.082		15	1.139	0.083	
16	1.226	0.082		16	1.138	0.083	
17	1.227	0.082		17	1.137	0.083	
18	1.228	0.082		18	1.135	0.083	
19	1.229	0.082		19	1.134	0.083	
20	1.229	0.082		20	1.134	0.083	
21	1.230	0.082		21	1.133	0.083	
22	1.232	0.082		22	1.131	0.083	
23	1.235	0.082		23	1.131	0.083	
24	1.235	0.082		24	1.132	0.083	
25	1.237	0.081		25	1.131	0.083	
26	1.239	0.081		26	1.131	0.083	
27	1.241	0.081		27	1.132	0.083	
28	1.242	0.081		28	1.132	0.083	
29	1.244	0.081		29	1.130	0.083	
30	1.244	0.081		30	1.130	0.083	

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% (ต่อ)

Nafion-modernite 10%				Nafion-modernite 15%			
Thickness (mm)	51	52	50	Thickness (mm)	55	56	56
Thickness Average (mm)		0.0051	0.5	Thickness Average (mm)		0.00556	0.5
<i>TIME</i> (sec)	<i>KO_{hm}</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.085</i>	<i>TIME</i> (sec)	<i>KO_{hm}</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.040</i>
1	1.113	0.085	2.88E-04	1	2.562	0.039	5.49E-04
2	1.119	0.084		2	2.560	0.039	
3	1.118	0.084		3	2.552	0.039	
4	1.117	0.084		4	2.540	0.040	
5	1.112	0.085		5	2.535	0.040	
6	1.110	0.085		6	2.530	0.040	
7	1.123	0.084		7	2.525	0.040	
8	1.112	0.085		8	2.526	0.040	
9	1.117	0.084		9	2.523	0.040	
10	1.118	0.084		10	2.520	0.040	
11	1.116	0.085		11	2.515	0.040	
12	1.114	0.085		12	2.510	0.040	
13	1.113	0.085		13	2.500	0.040	
14	1.115	0.085		14	2.495	0.040	
15	1.117	0.084		15	2.480	0.041	
16	1.115	0.085		16	2.475	0.041	
17	1.114	0.085		17	2.472	0.041	
18	1.118	0.084		18	2.470	0.041	
19	1.111	0.085		19	2.468	0.041	
20	1.114	0.085		20	2.467	0.041	
21	1.111	0.085		21	2.465	0.041	
22	1.110	0.085		22	2.463	0.041	
23	1.108	0.085		23	2.460	0.041	
24	1.105	0.085		24	2.461	0.041	
25	1.111	0.085		25	2.462	0.041	
26	1.115	0.085		26	2.464	0.041	
27	1.118	0.084		27	2.460	0.041	
28	1.111	0.085		28	2.463	0.041	
29	1.110	0.085		29	2.460	0.041	
30	1.114	0.085		30	2.500	0.040	

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% (ต่อ)

Nafion-sodalite 5%				Nafion-sodalite10%			
Thickness (mm)	32	30	28	Thickness (mm)	38	42	46
Thickness Average (mm)		0.003	0.5	Thickness Average (mm)		0.0042	0.5
<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.138</i>	<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.089</i>
1	1.220	0.137	4.70E-04	1	1.344	0.089	2.54E-04
2	1.218	0.137		2	1.342	0.089	
3	1.217	0.137		3	1.341	0.089	
4	1.215	0.137		4	1.340	0.089	
5	1.214	0.137		5	1.339	0.089	
6	1.213	0.137		6	1.339	0.089	
7	1.212	0.138		7	1.338	0.089	
8	1.211	0.138		8	1.337	0.089	
9	1.210	0.138		9	1.337	0.089	
10	1.209	0.138		10	1.337	0.089	
11	1.208	0.138		11	1.336	0.089	
12	1.208	0.138		12	1.336	0.089	
13	1.207	0.138		13	1.335	0.089	
14	1.207	0.138		14	1.335	0.089	
15	1.207	0.138		15	1.335	0.089	
16	1.206	0.138		16	1.335	0.089	
17	1.206	0.138		17	1.334	0.089	
18	1.206	0.138		18	1.334	0.089	
19	1.206	0.138		19	1.334	0.089	
20	1.206	0.138		20	1.333	0.089	
21	1.206	0.138		21	1.333	0.089	
22	1.206	0.138		22	1.333	0.089	
23	1.206	0.138		23	1.332	0.089	
24	1.206	0.138		24	1.332	0.089	
25	1.206	0.138		25	1.331	0.089	
26	1.206	0.138		26	1.331	0.089	
27	1.206	0.138		27	1.330	0.090	
28	1.206	0.138		28	1.330	0.090	
29	1.206	0.138		29	1.330	0.090	
30	1.206	0.138		30	1.330	0.090	

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% (ต่อ)

Nafion-sodalite 15%			
Thickness (mm)	54	52	53
Thickness Average (mm)		0.0053	0.5
<i>TIME (sec)</i>	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.044</i>
1	2.756	0.043	2.63E-04
2	2.750	0.043	
3	2.748	0.043	
4	2.750	0.043	
5	2.748	0.043	
6	2.745	0.043	
7	2.740	0.043	
8	2.735	0.044	
9	2.736	0.044	
10	2.735	0.044	
11	2.732	0.044	
12	2.730	0.044	
13	2.730	0.044	
14	2.732	0.044	
15	2.730	0.044	
16	2.726	0.044	
17	2.725	0.044	
18	2.726	0.044	
19	2.723	0.044	
20	2.720	0.044	
21	2.716	0.044	
22	2.712	0.044	
23	2.710	0.044	
24	2.709	0.044	
25	2.708	0.044	
26	2.706	0.044	
27	2.707	0.044	
28	2.703	0.044	
29	2.700	0.044	
30	2.700	0.044	

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% (ต่อ)

Nafion-ZSM-5(5atm) 5%				Nafion-ZSM-5(5atm)10%			
Thickness (mm)	48	47	48	Thickness (mm)	53	52	51
Thickness Average (mm)		0.004767	0.5	Thickness Average (mm)		0.0052	0.5
<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.069</i>	<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.081</i>
1	1.532	0.068	7.07E-04	1	1.183	0.081	1.36E-04
2	1.526	0.069		2	1.183	0.081	
3	1.526	0.069		3	1.183	0.081	
4	1.530	0.069		4	1.183	0.081	
5	1.529	0.069		5	1.183	0.081	
6	1.540	0.068		6	1.183	0.081	
7	1.545	0.068		7	1.181	0.081	
8	1.540	0.068		8	1.181	0.081	
9	1.540	0.068		9	1.181	0.081	
10	1.539	0.068		10	1.181	0.081	
11	1.528	0.069		11	1.182	0.081	
12	1.520	0.069		12	1.182	0.081	
13	1.530	0.069		13	1.183	0.081	
14	1.535	0.068		14	1.183	0.081	
15	1.532	0.068		15	1.183	0.081	
16	1.546	0.068		16	1.183	0.081	
17	1.532	0.068		17	1.184	0.081	
18	1.529	0.069		18	1.184	0.081	
19	1.510	0.069		19	1.184	0.081	
20	1.505	0.070		20	1.185	0.081	
21	1.505	0.070		21	1.185	0.081	
22	1.502	0.070		22	1.185	0.081	
23	1.503	0.070		23	1.186	0.081	
24	1.504	0.070		24	1.186	0.081	
25	1.505	0.070		25	1.186	0.081	
26	1.500	0.070		26	1.187	0.081	
27	1.501	0.070		27	1.187	0.081	
28	1.503	0.070		28	1.187	0.081	
29	1.505	0.070		29	1.187	0.081	
30	1.506	0.070		30	1.187	0.081	

ตารางที่ ค1 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 27 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 99.9% (ต่อ)

Nafion-ZSM-5 (5atm)15%			
Thickness (mm)	48	33	29
Thickness Average (mm)		0.003667	0.5
<i>TIME</i> (sec)	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.107</i>
1	0.904	0.106	2.77E-04
2	0.903	0.106	
3	0.903	0.106	
4	0.901	0.107	
5	0.899	0.107	
6	0.899	0.107	
7	0.898	0.107	
8	0.898	0.107	
9	0.897	0.107	
10	0.897	0.107	
11	0.897	0.107	
12	0.896	0.107	
13	0.896	0.107	
14	0.896	0.107	
15	0.896	0.107	
16	0.895	0.107	
17	0.895	0.107	
18	0.895	0.107	
19	0.896	0.107	
20	0.896	0.107	
21	0.897	0.107	
22	0.897	0.107	
23	0.896	0.107	
24	0.897	0.107	
25	0.897	0.107	
26	0.897	0.107	
27	0.897	0.107	
28	0.898	0.107	
29	0.898	0.107	
30	0.898	0.107	

ตารางที่ ค2 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 30-100 °C และความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้น 99.9%

Nafion 117				15%ZSM5(1atm)			
Thickness (mm)	37	33	38	Thickness (mm)	56	57	58
Thickness Average (mm)		0.0036	0.5	Thickness Average (mm)		0.0057	0.5
°C	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.133</i>	°C	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.176</i>
30	1.369	0.101	3.20E-02	30	0.956	0.141	4.07E-02
35	1.312	0.106		35	0.914	0.148	
40	1.289	0.108		40	0.900	0.150	
45	1.172	0.119		45	0.885	0.153	
50	1.076	0.129		50	0.859	0.157	
55	1.013	0.137		55	0.846	0.160	
60	0.972	0.143		60	0.789	0.171	
65	0.986	0.141		65	0.756	0.179	
70	0.925	0.150		70	0.723	0.187	
75	0.886	0.157		75	0.698	0.194	
80	0.836	0.166		80	0.622	0.217	
85	0.806	0.172		85	0.579	0.233	
90	0.774	0.179		90	0.556	0.243	
95	1.113	0.125		95	0.619	0.218	
100	2.462	0.056		100	1.530	0.088	

ตารางที่ ค2 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 30-100 °C และความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้น 99.9% (ต่อ)

15% ZSM5 (5 atm)				15% Mordenite			
Thickness (mm)	52	48	45	Thickness (mm)	56	55	56
Thickness Average (mm)		0.004833	0.5	Thickness Average (mm)		0.005567	0.5
°C	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.269</i>	°C	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.095</i>
30	0.939	0.148	8.91E-02	30	2.463	0.055	3.63E-02
35	0.884	0.157		35	2.254	0.060	
40	0.818	0.170		40	2.162	0.063	
45	0.743	0.187		45	1.914	0.071	
50	0.667	0.208		50	1.905	0.071	
55	0.616	0.225		55	1.832	0.074	
60	0.487	0.285		60	1.762	0.077	
65	0.440	0.316		65	1.649	0.082	
70	0.394	0.353		70	1.593	0.085	
75	0.382	0.364		75	1.423	0.095	
80	0.363	0.383		80	1.201	0.113	
85	0.340	0.408		85	0.978	0.138	
90	0.403	0.345		90	0.865	0.156	
95	0.480	0.289		95	0.786	0.172	
100	0.698	0.199		100	1.163	0.116	

ตารางที่ ค2 ค่าการนำโปรตอนในเยื่อแผ่นที่อุณหภูมิ 30-100 °C และความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้น 99.9% (ต่อ)

15%Sodalite			
Thickness (mm)	46	35	38
Thickness Average (mm)		0.003967	0.5
°C	<i>KOhm</i>	<i>Conduct.</i>	<i>0.057</i>
30	2.663	0.052	1.99E-02
35	2.587	0.054	
40	2.473	0.056	
45	2.337	0.059	
50	2.173	0.064	
55	1.947	0.071	
60	1.935	0.072	
65	1.836	0.076	
70	1.546	0.090	
75	2.107	0.066	
80	2.181	0.064	
85	2.558	0.054	
90	3.652	0.038	
95	6.231	0.022	
100	10.632	0.013	

2. ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจน

ตาราง ค3 ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ZSM-5 (1 atm) ที่อุณหภูมิห้อง (27°C)

Type of Membrane	Zeolite 5%		Zeolite 10%		Zeolite 15%		Pure naffion	
No.	1	2	1	2	1	2	1	2
อัตราการไหลเข้า (Sccm)	10.2	10.4	10.3	10.6	10.3	10.5	10.8	10.6
อัตราการไหลผ่านเยื่อ (Scs)	0.0127	0.0128	0.0113	0.0112	0.0092	0.0090	0.0136	0.0135
ความดันต่าง (cmHg)	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6
ความหนาของเมมเบรน (cm)	0.0036	0.0036	0.0040	0.0041	0.0048	0.0048	0.0034	0.0034
พื้นที่ (cm ²)	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (cm ³ (STP)*cm) /(s*cm ² *cmHg)	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (Barrer)	541.68	543.77	533.57	534.48	517.87	508.46	552.27	552.27
เฉลี่ย	542.72		534.02		513.17		548.90	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.480		0.647		6.658		4.760	

ตาราง ค4 ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ZSM-5 (1 atm) ที่อุณหภูมิ 50°C

Type of Membrane	Zeolite 5%		Zeolite 10%		Zeolite 15%		Pure naffion	
No.	1	2	1	2	1	2	1	2
อัตราการไหลเข้า (Sccm)	10.3	10.4	10.3	10.6	10.3	10.5	10.8	10.6
อัตราการไหลผ่านเยื่อ (Sccs)	0.0130	0.0132	0.0117	0.0115	0.0097	0.0093	0.0140	0.0138
ความดันต่าง (cmHg)	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6
ความหนาของ เมมเบรน (cm)	0.0036	0.0036	0.0040	0.0041	0.0048	0.0048	0.0034	0.0034
พื้นที่(cm ²)	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (cm ³ (STP)*cm) / (s*cm ² *cmHg)	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (Barrer)	557.93	557.89	549.26	550.44	546.12	527.29	565.74	559.00
เฉลี่ย	556.91		549.85		536.71		562.37	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.387		0.832		13.316		4.762	

ตาราง ค5 ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ZSM-5 (1 atm) ที่อุณหภูมิ 60°C

Type of Membrane	Zeolite 5%		Zeolite 10%		Zeolite 15%		Pure naffion	
No.	1	2	1	2	1	2	1	2
อัตราการไหลเข้า (Sccm)	10.3	10.4	10.3	10.6	10.3	10.5	10.8	10.6
อัตราการไหลผ่านเยื่อ (Sccs)	0.0133	0.0135	0.0118	0.0120	0.0097	0.0098	0.0143	0.0146
ความดันต่าง (cmHg)	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6
ความหนาของเมมเบรน (cm)	0.0036	0.0036	0.0040	0.0041	0.0048	0.0048	0.0034	0.0034
พื้นที่ (cm ²)	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (cm ³ (STP)*cm) / (s*cm ² *cmHg)	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (Barrer)	570.10	572.02	557.11	574.37	546.12	555.80	579.21	572.47
เฉลี่ย	571.10		565.74		550.83		575.84	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.295		12.206		6.658		4.762	

ตาราง ค6 ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ZSM-5 (1 atm) ที่อุณหภูมิ 70°C

Type of Membrane	Zeolite 5%		Zeolite 10%		Zeolite 15%		Pure naffion	
No.	1	2	1	2	1	2	1	2
อัตราการไหลเข้า (Sccm)	10.3	10.4	10.3	10.6	10.3	10.5	10.8	10.6
อัตราการไหลผ่านเยื่อ (Sccs)	0.0137	0.0138	0.0120	0.0123	0.0098	0.0100	0.0146	0.0145
ความดันต่าง (cmHg)	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6
ความหนาของ เมมเบรน (cm)	0.0036	0.0036	0.0040	0.0041	0.0048	0.0048	0.0034	0.0034
พื้นที่(cm ²)	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (cm ³ (STP)*cm) / (s*cm ² *cmHg)	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (Barrer)	584.44	586.14	564.95	590.32	555.54	564.95	592.68	564.95
เฉลี่ย	585.29		577.64		560.25		589.31	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.202		17.940		6.658		4.762	

ตาราง ค7 ค่าการซึมผ่านของก๊าซไฮโดรเจนของเยื่อแผ่นแนฟฟิออน/ZSM-5 (1 atm) ที่อุณหภูมิ 80°C

Type of Membrane	Zeolite 5%		Zeolite 10%		Zeolite 15%		Pure naffion	
No.	1	2	1	2	1	2	1	2
อัตราการไหลเข้า (Sccm)	10.3	10.4	10.3	10.6	10.3	10.5	10.8	10.6
อัตราการไหลผ่านเยื่อ (Sccs)	0.0143	0.0142	0.0123	0.0127	0.0102	0.0103	0.0151	0.0153
ความดันต่าง (cmHg)	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6	105.6
ความหนาของ เมมเบรน (cm)	0.0036	0.0036	0.0040	0.0041	0.0048	0.0048	0.0034	0.0034
พื้นที่(cm ²)	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457	8.0457
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (cm ³ (STP)*cm) /(s*cm ² *cmHg)	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08	5.42E-08
สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (Barrer)	612.95	600.26	580.65	606.28	574.37	583.79	612.88	619.25
เฉลี่ย	606.61		593.46		579.08		616.25	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.970		18.125		6.658		4.762	

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ นางสาวเสาวรส สังสุทธีวงศา

เกิดวันที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522

สถานที่เกิด จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา วท.บ. (วิทยาศาสตร์บัณฑิต) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (พ.ศ.2545)

ทุนการศึกษาที่ได้รับ ทุนผู้ช่วยสอนจากโครงการพัฒนาระบบบัณฑิตศึกษา และวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2544)
ทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2547)