



# Chulalongkorn University จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็ม



นางสาวสุภารัตน์ สายเย็นงค์

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**Chulalongkorn University**  
**จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

FABRICATION OF PEM FUEL CELL STACK



Ms. Sudarat Saiyuenyong

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็ม
โดย	นางสาวสุดาวรัตน์ สายเย็นยงค์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุฒษาทร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

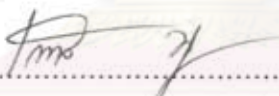
---


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

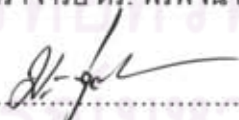
  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุฒษาทร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงศ์)

สุดาร์ตน์ สายยืนยงค์ : การสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. (FABRICATION OF PEM FUEL CELL STACK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เกียรติ พงกษาท,  
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ 88 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและพัฒนาขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (เอ็มอีเอ) ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร เพื่อนำมาขยายขนาดเป็น 25 ตารางเซนติเมตร พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเอ็มอีเอขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ที่ให้สมรรถนะสูงสุดเป็นการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการพ่นบนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ปริมาณเนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เนฟิออนเมมเบรน 115 ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.54 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ เมื่อทำการขยายขนาดของเอ็มอีเอเป็น 25 ตารางเซนติเมตร พบว่าสมรรถนะที่ได้มีค่าลดลงประมาณ 24% โดยเนฟิออนเมมเบรน 212 จะให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีกว่าเนฟิออนเมมเบรน 115 การนำขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนขนาดพื้นที่ 25 ตารางเซนติเมตร ที่เตรียมได้มาสร้างเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจำนวน 3 ชั้น พบว่าเนฟิออนเมมเบรน 212 จะเกิดการจึกขาดได้ง่ายกว่าเนฟิออนเมมเบรน 115 เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูง ดังนั้นใช้เนฟิออนเมมเบรน 115 ในการประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อทดสอบสมรรถนะ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ผลของค่าความชื้นของระบบ อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจน ความดันของระบบและผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง จากผลการทดลองภาวะที่ให้ค่าสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุดคือ ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้น 200 sccm และแก๊สออกซิเจนอิ่มตัวด้วยความชื้น 400 sccm ความดันระบบ 10 พีเอสไอจี แรงอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 60 ปอนด์แรง.นิ้ว ให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.08 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์

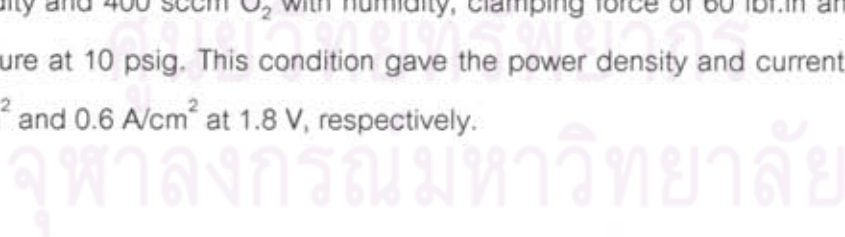
ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต..... สุดาร์ตน์ สายยืนยงค์  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... tom  
ปีการศึกษา .....2552..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... pl

## 4972537523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: PEM FUEL CELL / STACK

SUDARAT SAIYUENYONG: FABRICATION OF PEM FUEL CELL STACK. THESIS  
ADVISOR : ASSOC. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D., THESIS  
CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 88 pp.

This research focused on the preparation and development of a small size Membrane Electrode Assembly (MEA) with an objective to scale up and fabricate a stack under the optimum condition. It was found that spraying catalyst ink with catalyst containing 0.5 mg/cm<sup>2</sup> onto carbon cloth with water management layer, nafion content in catalyst layer 33%wt. and using nafion membrane 115 shown the highest current density of 0.54 A/cm<sup>2</sup> at 0.6 V for a 5 cm<sup>2</sup> MEA. However, the performance of MEA scaled up to 25 cm<sup>2</sup> decreased approximately 24%. Nafion membrane 212 gave higher performance than nafion membrane 115. It was also found that when using nafion membrane 212 was laceration at high flow rate. So, 3-cell stack was fabricated by using nafion membrane 115. The performances of fabricated PEM stack depended on various parameters for example humidities of reactive and oxidized gases, gas flow rate and clamping force. It was found that the optimum operating condition for the stack was 200 sccm H<sub>2</sub> with humidity and 400 sccm O<sub>2</sub> with humidity, clamping force of 60 lbf.in and the operating pressure at 10 psig. This condition gave the power density and current density of 1.08 W/cm<sup>2</sup> and 0.6 A/cm<sup>2</sup> at 1.8 V, respectively.



Department..Chemical Technology.....Student's Signature : Sudarat Saiyuenyong.....

Field of Study :..Chemical Technology....Advisor's Signature : [Signature]

Academic Year :...2009.....Co-Advisor's Signature : [Signature]



## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และคณาจารย์ทุกท่านในกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่มีอบุนอดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตรานันต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ นุ่นสมและ รองศาสตราจารย์ ดร. สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	4
2.1.1 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	5
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	9
2.2.1 ตัวรองรับคาร์บอน .....	9
2.2.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	9
2.2.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ .....	9
2.2.4 ปริมาณสารละลายเนฟิออน.....	10
2.2.5 เทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	10
2.2.6 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ.....	10
2.3 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด.....	10
2.3.1 วิธีการเตรียมน้ำหมึกสำหรับขั้วอิเล็กโทรด.....	10
2.3.2 เทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	11
2.4 การอัดด้วยความร้อนในการประกอบขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน.....	12
2.5 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	13

2.6	ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	16
2.6.1	แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	17
2.6.2	ปะเก็น.....	18
2.6.3	แผ่นประกบ.....	19
2.7	การออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	19
2.7.1	ขนาดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	19
2.7.2	จำนวนของเซลล์.....	20
2.7.3	ลักษณะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	20
2.8	ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	21
2.8.1	การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังแต่ละเซลล์.....	21
2.8.2	การกระจายตัวของแก๊สเชื้อเพลิงภายในแต่ละเซลล์.....	22
2.8.3	การจัดการความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	24
2.8.4	การอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	25
2.8.5	การจัดการน้ำสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็ม.....	27
2.8.6	การประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	28
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3	อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.3	ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว.....	33
3.4	ระบบทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	36
3.5	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	38
3.6	ตัวแปรที่ศึกษาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเซลล์เดี่ยว.....	38
3.7	ตัวแปรที่ศึกษาของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	38
3.8	วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.8.1	การปรับสภาพของเมมเบรน.....	39
3.8.2	การเตรียมขั้วอิเล็กโทรด.....	39
3.8.2.1	การเตรียมชั้นจัดการน้ำ.....	39
3.8.2.2	การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40



3.8.3	การประกอบขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรดประกอบเมมเบรน.....	40
3.8.4	การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว.....	41
3.8.5	การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับชั้นเซลล์ เชื้อเพลิง.....	41
3.8.5.1	การประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีไอเอ็ม.....	41
3.8.5.2	ขั้นตอนก่อนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์ เชื้อเพลิง.....	43
3.8.5.3	ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์ เชื้อเพลิง.....	43
3.8.5.4	ขั้นตอนภายหลังจากการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชั้น เซลล์เชื้อเพลิง.....	44
4	ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	45
4.1	การปรับปรุงขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ขนาดพื้นที่ ขั้วไฟฟ้า 5 ตารางเซนติเมตร.....	45
4.1.1	ผลของเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรด.....	45
4.1.2	ผลของชั้นจัดการน้ำบนขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรด.....	49
4.1.3	ผลของปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
4.1.4	ผลของชนิดของเมมเบรน.....	55
4.2	ผลของการขยายขนาดขั้วไฟฟ้า.....	57
4.3	การสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีไอเอ็มขนาด 25 ตารางเซนติเมตร.....	65
4.3.1	ผลของความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง.....	66
4.3.2	ผลของเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊ส ออกซิเจน.....	67
4.3.3	ผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....	70
4.3.4	ผลของความดันของระบบ.....	71
4.3.5	ผลของการเปรียบเทียบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้กับหน่วย ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรดทางการค้า.....	73
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	75

บทที่

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข .....	84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	88



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ตารางแสดงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDX.....	60



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม .....	5
2.2	การถ่ายโอนของแก๊ส โปรตอน และอิเล็กตรอนในขั้วอิเล็กโทรด .....	8
2.3	โครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทีลิน .....	8
2.4	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม .....	13
2.5	องค์ประกอบที่สำคัญในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง .....	17
2.6	รูปแบบของช่องทางการไหลแบบต่าง ๆ .....	18
2.7	โครงสร้างโดยรวมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง .....	21
2.8	ลักษณะการไหลของแก๊สภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง .....	22
2.9	ทิศทางการไหลที่เป็นไปได้ในแผ่นช่องทางการไหล .....	23
2.10	รูปแบบการวางชั้นเซลล์เชื้อเพลิง .....	24
2.11	รูปแบบและลักษณะการหล่อเย็นชั้นเซลล์เชื้อเพลิง .....	25
2.12	ลักษณะการโค้งตัวของแผ่นประกบกรณีใช้แรงในการอัดประกอบเซลล์มากเกินไป .....	26
2.13	ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แรงอัดประกอบต่างกัน .....	27
2.14	กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม .....	28
2.15	ลักษณะการประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจำนวน 2 เซลล์ .....	29
3.1	ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยวที่ใช้ในการทดลอง..	34
3.2	Hardware สำหรับทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว) บริษัท Electrochem Inc.....	34
3.3	ลักษณะช่องทางการไหลแบบคดเคี้ยวในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียวของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว .....	35
3.4	Hardware เซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ บริษัท NuVant Systems.....	35
3.5	ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า บริษัท Electrochem Inc.....	36
3.6	เครื่อง Electronic load รุ่น PLZ-30F บริษัท KIKUISUI .....	36
3.7	เครื่อง Electronic load รุ่น N3300A บริษัท Agilent.....	37
3.8	Hardware สำหรับทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง).....	37
3.9	ช่องทางการไหลในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง .....	38
3.10	ลักษณะของการวางชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเรียงเป็นมุม 30 องศาของหน่วยทดสอบ...	42
4.1	โพลาริเซชันของเอ็มอีเอเปรียบเทียบเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้ว	

	อิเล็กโทรด ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ.....	46
4.2	ไซคลิกโวลแทมเมตรีของการเปรียบเทียบเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด.....	48
4.3	ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM สำหรับเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันบนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร.....	49
4.4	โพลาริเซชันของเอ็มอีเอเปรียบเทียบผลของการมีและไม่มีชั้นจัดการน้ำ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอน เทคนิคการพ่นในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	51
4.5	โพลาริเซชันของเอ็มอีเอที่มีปริมาณเนฟออนต่าง ๆ ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา บนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น.....	53
4.6	ไซคลิกโวลแทมเมตรีของการเปรียบเทียบปริมาณเนฟออนต่าง ๆ ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา บนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ.....	54
4.7	โพลาริเซชันของเอ็มอีเอที่มีปริมาณเนฟออนต่าง ๆ ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น.....	54
4.8	โพลาริเซชันของเอ็มอีเอที่ชนิดของเมมเบรนต่างกัน ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น ปริมาณเนฟออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก บนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ.....	56
4.9	กราฟ Nyquist plot จากการทดสอบอิมพีแดนซ์ของขั้วไฟฟ้าประกอบเยื่อแผ่นที่ชนิดของเมมเบรนต่างกัน.....	57
4.10	โพลาริเซชันของเอ็มอีเอเนื่องจากผลของการขยายขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น ปริมาณเนฟออนในชั้นตัวเร่ง	



	ปฏิกิริยา ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก บนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ .....	59
4.11	ลักษณะการจัดวางตำแหน่งจำนวน 16 ตำแหน่งของเอ็มอีเอที่ใช้ในการอัดประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร.....	60
4.12	โพลาริเซชันของขั้วอิเล็กโทรดที่มีชั้นจัดการน้ำโดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร เปรียบเทียบ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของขั้วอิเล็กโทรด ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเนฟออนร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เทคนิคการพ่นในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	61
4.13	ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM สำหรับผลการศึกษารายขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ .....	62
4.14	ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ภาคตัดขวางขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ ด้วยเครื่อง SEM สำหรับผลการศึกษารายขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด.....	63
4.15	โพลาริเซชันของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเนฟออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น บนผ้าคาร์บอน เนฟออนเมมเบรน 115 ไมครอนการอัด 40 ปอนด์แรง.นี้ว กับขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน.....	65
4.16	โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้และไม่ให้ค่าความชื้นแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอน ไมครอนการอัด 50 ปอนด์แรง.นี้ว .....	67
4.17	โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนอิมิตัวต่อแก๊สออกซิเจนอิมิตัวต่าง ๆ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรบนผ้าคาร์บอน ไมครอนการอัด 50 ปอนด์แรง.นี้ว.....	69

- 4.18 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรบนผ้าคาร์บอน ..... 71
- 4.19 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันของระบบต่างกัน โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรบนผ้าคาร์บอน..... 72
- 4.20 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน กับขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เทคนิคการพ่นในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ อัดประกอบกับเนฟลอนเมมเบรน 115..... 74
- ข.1 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้และไม่ให้ค่าความชื้นแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน..... 84
- ข.2 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนอิมิต์ต่อแก๊สออกซิเจนอิมิต์ด้วยความชื้นต่าง ๆ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน ..... 85
- ข.3 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน ..... 86
- ข.4 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันของระบบต่างกัน โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน..... 87

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ที่ผ่านมาแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนใหญ่มาจากน้ำมันเชื้อเพลิง แต่ความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากเหตุดังกล่าวจึงได้มีการค้นคว้าและพัฒนากระบวนการใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ทางเลือกหนึ่งที่ได้รับค่านิยมคือ เซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากเป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและมีประสิทธิภาพสูง เซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะการทำงานคล้ายแบตเตอรี่ กล่าวคือเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงและสามารถทำงานนานตรวบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงคือมีประสิทธิภาพสูงกว่าอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าทั่วไป ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงและใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยเมื่อเทียบกับขนาดกำลังไฟฟ้าที่ได้

เซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์โดยทั่วไปให้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำ ตามทฤษฎีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจนและออกซิเจนเท่ากับ 1.23 โวลต์ แต่ในการทำงานจริงค่าที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าทางทฤษฎีเนื่องจากเกิดการสูญเสียไปในส่วนต่าง ๆ เช่น สูญเสียเนื่องจากกระแสไฟฟ้าภายใน สูญเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา สูญเสียเนื่องจากความต้านทานและความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิง นอกจากนี้การนำเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดี่ยวที่มีพื้นที่ทำปฏิกิริยาขนาดเล็กไปใช้งานจะพบปัญหาเรื่องกำลังไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการ ดังนั้นเพื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้โดยเพิ่มขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงและนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวมาต่อกันแบบอนุกรม การต่อแบบอนุกรมเป็นการนำเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดี่ยวมาต่อเรียงติดกันเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแต่ละเซลล์เชื่อมต่อกันด้วยแผ่นนำไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ แต่การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อกันแบบอนุกรมทำให้ความต้านทานการสัมผัสเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานต่ำลง จึงจำเป็นต้องศึกษาและทดสอบการทำงานของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้สมรรถนะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ อัตราการไหลและความดันของแก๊สเชื้อเพลิง อุณหภูมิ การประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง การถ่ายโอนมวลและความร้อนในระบบ เป็นต้น ประเด็นสำคัญอีกประเด็นที่ต้องคำนึงถึงในการพัฒนาหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือ ขนาดของพื้นที่

ทำปฏิกิริยาของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากพื้นที่ทำปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นจะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงขึ้น แต่การเตรียมขั้วอิเล็กโทรดขนาดใหญ่มีปัญหาของความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีความสำคัญ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ขนาดเล็ก เพื่อนำมาพัฒนาและศึกษาผลของการขยายขนาดพื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรดต่อไป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาพัฒนาขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนและหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร และทำการทดสอบสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้ที่ภาวะต่าง ๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เตรียมและพัฒนาขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร ให้มีสมรรถนะที่เหมาะสม
2. ประกอบหน่วยชั้นและศึกษาสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมได้

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมและพัฒนาขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร ให้มีสมรรถนะที่เหมาะสม
2. ทราบผลของตัวแปรที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมสารเคมีและอุปกรณ์เพื่อใช้ในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดและขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน
3. ศึกษาการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดและขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และปริมาณเนฟลอนค่าต่าง ๆ จากนั้นทดสอบสมรรถนะเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม

4. ศึกษาและพัฒนาซั้วอิเล็กทรอนิกส์ประกอบเมมเบรนขนาดพื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 25 ตารางเซนติเมตร และทดสอบสมรรถนะ เพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงกับขนาด 5 ตารางเซนติเมตร จากภาวะที่เหมาะสมที่ได้ในข้อ 3
5. ประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 25 ตารางเซนติเมตร และทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ภาวะต่าง ๆ เช่น แรงอัดประกอบ อัตราการไหลของแก๊ส และความดัน เป็นต้น
6. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์



ศูนย์วิทยพัทพยาบาล  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

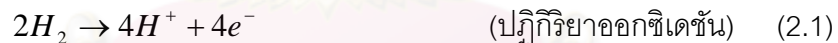


## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

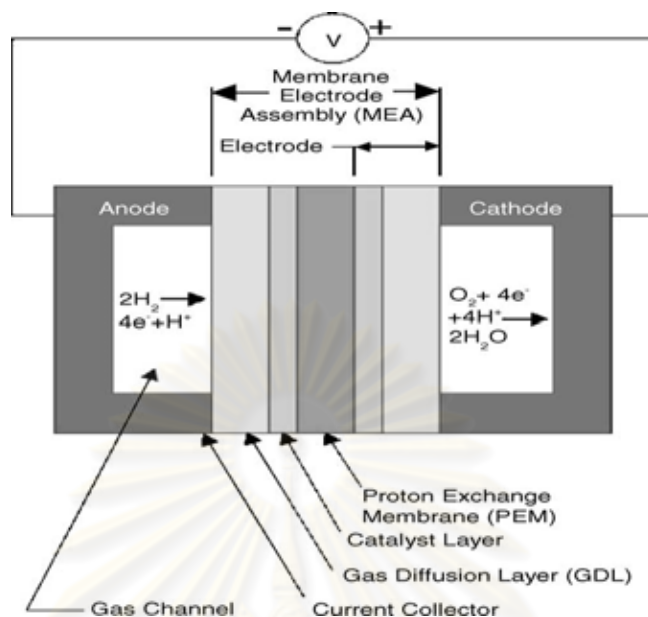
#### 2.1 เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton exchange membrane fuel cell) [1]

เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มมีลักษณะการทำงานคล้ายแบตเตอรี่ ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ในการเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงอย่างสม่ำเสมอ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม คือกระแสไฟฟ้า น้ำและความร้อน จึงไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ภาวะการทำงานที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 60 – 100 องศาเซลเซียส จึงเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการทำงานด้านต่าง ๆ โดยกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์เกิดมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดแต่ละด้าน เชื้อเพลิงหลักที่ใช้คือ แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นสารออกซิแดนซ์ จากรูป 2.1 แก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม ได้โปรตอน อิเล็กตรอน และความร้อน ตามสมการ (2.1)



โปรตอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์คือ แผ่นเมมเบรน ซึ่งมีคุณสมบัติในการนำโปรตอนสูง (High proton conductivity) แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน (Electron barrier) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกได้เป็นกระแสไฟฟ้า จากนั้นทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้ามายังขั้วดังกล่าว เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือน้ำ ตามสมการ (2.2) และได้ปฏิกิริยารวมแสดงดังสมการที่ (2.3)





รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [2]

### 2.1.1 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [1-4, 6]

เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญได้แก่ แผ่นนำกระแสไฟฟ้า ขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น

#### - แผ่นนำกระแสไฟฟ้า (Current collector plate)

แผ่นนำกระแสไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Unipolar plate) และแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นนำกระแสไฟฟ้าทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ออกจากเซลล์ และเป็นช่องทางการไหลของแก๊ส (Gas flow field plate) ซึ่งอยู่บริเวณผิวหน้าของแผ่นเพื่อเป็นช่องทางให้แก๊สเคลื่อนที่ผ่านต่อไปยังขั้วอิเล็กโทรด ช่วยในการระบายความร้อน และการจัดการน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา

#### - ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (Membrane Electrode Assembly)

ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอถือเป็นหัวใจสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เนื่องจากเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาและการถ่ายโอนประจุ เอ็มอีเอประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ เมมเบรนทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์และขั้วอิเล็กโทรดที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา การประกอบเอ็มอีเอทำได้โดยการนำขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด มาประกบเข้า

กับเมมเบรน โดยวิธีการอัดด้วยความร้อน (Hot pressing) องค์ประกอบหลักที่สำคัญของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน มีดังนี้

- **ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode)**

ขั้วอิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ทางผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาและทางผ่านของอิเล็กตรอน ขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้อยู่โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion layer) ชั้นจัดการน้ำ (Water management layer) และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer)

(1) **ชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion layer)**

เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับแผ่นนำกระแสไฟฟ้า ควรมีความต้านทานต่ำหรือความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าสูงและมีความพรุนสูง ความพรุนของขั้วอิเล็กโทรดจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและช่วยให้การเคลื่อนที่ของสารไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเกิดได้ง่าย โดยทั่วไปทำมาจากเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) นำมาทำเป็นกระดาษคาร์บอน (Carbon paper) และ ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) โดยชั้นแพร่แก๊สมีหน้าที่ดังนี้

- เป็นเส้นทางผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงจากช่องทางกรไหลของแก๊ส (Flow field channel) ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ติดกัน
- เป็นเส้นทางผ่านสำหรับน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ออกไปยังช่องทางกรไหลของแก๊ส
- เป็นตัวนำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังแผ่นนำกระแสไฟฟ้าเพื่อจะครบวงจรได้กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง
- ส่งผ่านความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องทางกรไหลของแก๊สหรือช่องระบายความร้อน เพื่อกำจัดออกจากเซลล์
- เป็นตัวรองรับเชิงกล (Mechanical support) เพื่อป้องกันการซ้อนทับกันระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนกับช่องทางกรไหลของแก๊ส

(2) **ชั้นจัดการน้ำ (Water management layer)**

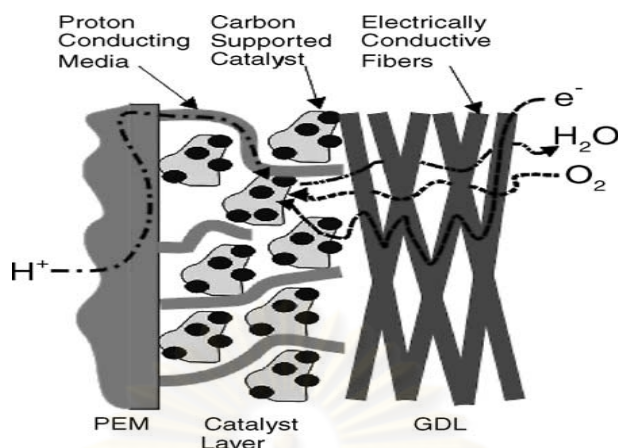
เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา มีส่วนช่วยในการจัดการน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากสารละลายเทพลอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักภายในชั้นจัดการน้ำมีหมู่กรดซัลโฟนิก ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำทำให้ช่วยขับน้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงโดยเฉพาะที่ช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่มีน้ำเกิดจากปฏิกิริยาในจำนวนมาก

### (3) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer)

เป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ในอุณหภูมิปกติตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากโมเลกุลมีความเสถียรมาก จำเป็นจะต้องมีตัวกระตุ้นเพื่อให้เกิดการแตกตัว เช่น การเพิ่มอุณหภูมิหรือเติมสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, EA) ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นโลหะมีตระกูล (Noble metal) เช่น แพลทินัม (Pt) นิกเกิล (Ni) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแพลทินัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงที่อึด้มมากที่สุด เนื่องจากสามารถทนต่อการกัดกร่อนและว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแก๊สออกซิเจน (ขั้วแคโทด) และแก๊สไฮโดรเจน (ขั้วแอโนด) ได้ดีกว่าโลหะอื่น แพลทินัมจะเตรียมให้มีขนาดอนุภาคเล็ก ๆ โดยวางอยู่บนอนุภาคที่ใหญ่กว่าของผงคาร์บอนเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้ผงคาร์บอน Vulcan XC72 (Cabot)

ขั้วอิเล็กโทรดที่ดีต้องมีความต้านทานต่ำ (Low resistance) หรือความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าสูง (High conductivity) ต้องมีส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic pathways) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic pathways) เพื่อช่วยกำจัดน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ออกไป [6] สำหรับอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องนำอิเล็กตรอน เพื่อเชื่อมโยงกับวงจรไฟฟ้าภายนอก และต้องมีความพรุนสูงเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด และช่วยให้การเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเป็นไปด้วยดี จากรูปที่ 2.2 แสดงการถ่ายโอนของแก๊ส โปรตอน และอิเล็กตรอนในขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- (i) โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่จากชั้นแพร่แก๊สไปยังบริเวณผิวหน้าระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและอิเล็กโทรไลต์
- (ii) เกิดการดูดซับของแก๊สบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการดูดซับจะขึ้นกับพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (Specific surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา
- (iii) โมเลกุลของแก๊สเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาแตกตัวให้โปรตอนและอิเล็กตรอน โปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปอีกด้านหนึ่งของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งการเคลื่อนที่ของโปรตอนจะขึ้นอยู่กับความหนาของอิเล็กโทรไลต์ และค่าการนำโปรตอนของสารอิเล็กโทรไลต์

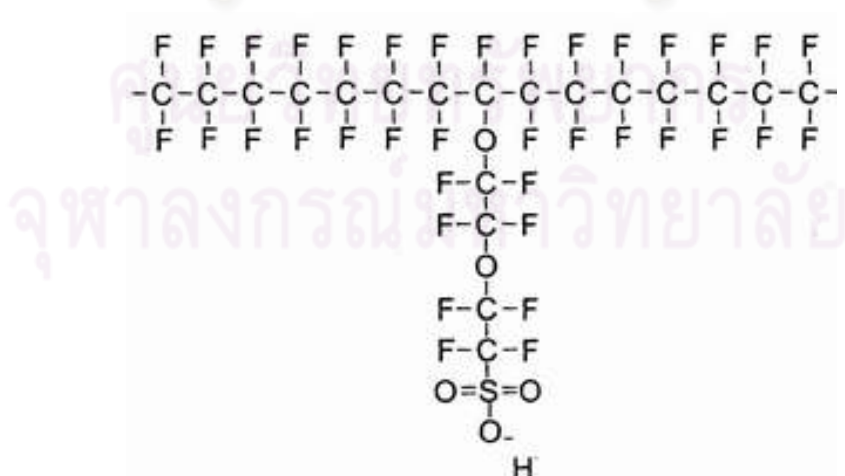


รูปที่ 2.2 การถ่ายโอนของแก๊ส โปรตอน และอิเล็กตรอนในขั้วอิเล็กโทรด [2]

### - อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มคือ พอลิเมอร์เมมเบรนชนิดเนฟลอน เมมเบรนซึ่งยึดติดกับขั้วอิเล็กโทรด ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โมเลกุลไฮโดรเจนสัมผัสกับออกซิเจน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยตรง และยอมให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านจากขั้วแอโนดไปยังขั้ว แคโทดเท่านั้น

เมมเบรนที่ได้รับความนิยมคือเนฟลอนเมมเบรน จากบริษัทดูปองต์ (Dupont) โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน [4]



## 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [5-11]

สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีหลายปัจจัยที่ส่งผล เช่น ภาวะการทดสอบการทำงานของระบบ ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น แสดงดังนี้

### 2.2.1 ตัวรองรับคาร์บอน

ตัวรองรับมักเป็นสารจำพวกที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก โดยหน้าที่ของตัวรองรับมีดังนี้

- ทำให้เกิดการกระจายตัวของโลหะ
- เพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างไม่แข็งแรง
- เพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาในตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา
- เพิ่มความสามารถในการต้านทานการรวมตัวกันของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากความร้อน

สำหรับตัวรองรับที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มคือ ผงคาร์บอน (Carbon powder) เนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้า มีความพรุนสูงและพื้นที่ผิวมาก แต่การเพิ่มตัวรองรับในขั้วอิเล็กโทรดอาจมีส่วนทำให้ความต้านทานและความหนาของขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การแพร่ของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาทำได้ช้าลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ดังนั้นปริมาณของตัวรองรับที่ใช้ควรมีความเหมาะสมกับขั้วอิเล็กโทรดที่ต้องการใช้งาน

### 2.2.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่นิยมใช้คือ แพลทินัม (Pt) เนื่องจากมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนสูงกว่าโลหะมีตระกูลชนิดอื่น ๆ เช่น แพลเลเดียม (Pd) หรือ นิกเกิล (Ni) เป็นต้น แต่เนื่องจากราคาของแพลทินัมมีราคาแพงจึงได้มีงานวิจัยที่ศึกษาชนิดของแพลทินัมอัลลอยด์ต่าง ๆ [9] นอกจากนี้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องพิจารณาแล้ว ยังคงต้องพิจารณาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา อันได้แก่ พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ขนาดและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

### 2.2.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ

เนื่องจากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะส่งผลให้เกิดสมรรถนะที่ดีของเซลล์เชื้อเพลิงและการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดน้อยยังทำให้ลดราคาต้นทุนในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงได้อีกด้วย

## 2.2.4 ปริมาณสารละลายเนฟิออน

เนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้การสัมผัสกันของ 3 เฟส คือ แก๊สเชื้อเพลิง อิเล็กโทรไลต์ และตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้ดี ดังนั้นปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

## 2.2.5 เทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน ส่งผลต่อขนาดของรูพรุน (Pore size) และความขรุขระของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมจะช่วยให้เกิดการส่งผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงและสารออกซิแดนซ์ได้ดี และถ้าพื้นผิวมีความขรุขระมากจะทำให้เกิดการสัมผัสกันของแก๊สเชื้อเพลิงกับตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น โดยเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีหลายวิธี เช่น การพ่น การระบาย การสกรีน การพิมพ์ เป็นต้น

## 2.2.6 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะ

การเพิ่มความดันและอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและสารออกซิแดนซ์ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์มีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกับผลจากอุณหภูมิของระบบ เนื่องจากที่ความดันและอัตราการไหลที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น และยังมีส่วนช่วยในการขับไล่ น้ำออกจากระบบ [8] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะที่ดี

## 2.3 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด [6]

การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเริ่มต้นจากการเตรียมโลหะมีตระกูลบนตัวรองรับ (Support) เช่น ผงแกรไฟต์ หรือผงคาร์บอน ที่มีความเป็นรูพรุนสูง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจึงนำไปเตรียมเป็นสารละลายผสมหรือน้ำหมึก (Ink) เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

### 2.3.1 วิธีการเตรียมน้ำหมึกสำหรับขั้วอิเล็กโทรด

ในการเตรียมน้ำหมึกโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จะให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระจายตัวอยู่ อิมมัลชันด้วยไอออนเมอร์ (Ionomer) ซึ่งนิยมใช้สารละลายเนฟิออน ส่วนที่ 2 จะให้คาร์บอนรวมตัวกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ จากนั้นจึงนำทั้งสองส่วนมาผสมกันในอัตราส่วนที่ได้จากการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมน้ำหมึก คือ อัตราส่วนระหว่างสารละลายเนฟิออนกับคาร์บอน ปริมาณที่เหมาะสมและการกระจายตัวของเนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีความสมดุลเพื่อให้ขั้วอิเล็กโทรดมีความต้านทานน้อย เนฟิออนสัมผัสกับอนุภาคของแพลทินัมมากที่สุดและทางเข้าของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องผ่านรูพรุนของแก๊สมากที่สุด

ปริมาณเนฟลอนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญต่อสมรรถนะที่ดีของเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากสามารถช่วยลดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic losses) และค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการถ่ายโอนมวล (Mass transport overpotential) ในอิเล็กโทรไลต์ได้ ถ้าปริมาณของเนฟลอนน้อยมาก ๆ จะส่งผลให้การสัมผัสของอิเล็กโทรไลต์กับตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ทั่วถึง มีผลให้การส่งผ่านโปรตอนทำได้ไม่ดี และถ้าปริมาณของเนฟลอนมากเกินไปก็เป็นสาเหตุให้สมรรถนะของตัวอิเล็กโทรไลต์ลดลงได้ เนื่องจากจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา ขัดขวางรูพรุนของตัวอิเล็กโทรไลต์ ลดความสามารถในการซึมผ่านได้ของแก๊ส (Gas permeability) และเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการถ่ายโอนมวล

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาสูตรการคำนวณหาปริมาณเนฟลอนที่เหมาะสมในชั้นอิเล็กโทรไลต์ เช่น Sasikumar และคณะ [7] ได้เสนอสูตรการหาปริมาณเนฟลอน ดังแสดงในสมการที่ (2.4)

$$Wt.\% \text{ Nafion} = \frac{\text{dry wt. of Nafion} \times 100}{Wt. \text{ of Pt / Catalyst} + \text{dry wt. of Nafion}} \quad (2.4)$$

### 2.3.2 เทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

มีเทคนิคต่าง ๆ มากมายสำหรับการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวอิเล็กโทรไลต์โดยใช้สารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา จัดวางตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปหมึกสารละลายลงบนเมมเบรนหรือชั้นแพร่แก๊ส โดยกระบวนการต่าง ๆ เช่น การทา (Painting) การพ่น (Spraying) การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) เป็นต้น

#### - การพ่น (Spraying)

ในกระบวนการพ่นสารละลายที่ใช้จะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ตัวเร่งปฏิกิริยามีความละเอียด ผสมกับตัวทำละลายจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปพ่นลงบนแผ่นรองรับแผ่นรองรับที่ใช้โดยทั่วไปคือ กระดาษคาร์บอน หรือผ้าคาร์บอน ขั้นตอนการทำเริ่มจากนำผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับตัวทำละลายและส่วนผสมอื่นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นนำไปพ่นบนตัวรองรับ หลังจากนั้นนำไปอบเพื่อระเหยให้แห้ง ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมด้วยวิธีนี้คือ ความหนืด (Viscosity) ของสารผสมก่อนการพ่น และระยะเวลาในการแห้ง (Drying time) ของตัวเร่งปฏิกิริยา

#### - การทา (Painting)

ปัจจัยสำคัญในการเตรียมตัวอิเล็กโทรไลต์โดยจัดวางตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยการทาที่ต่างจากการพ่นคือ สารผสมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวทำละลายรวมทั้งสารเคมี

อื่น ๆ จะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงมีความหนืดที่เหมาะสมต่อการทา จากนั้นจึงนำสารผสมไปทาบนแผ่นรองรับด้วยแปรงหรือพู่กัน แผ่นรองรับที่นิยมใช้ได้แก่ กระดาษคาร์บอน ผ้าคาร์บอน เป็นต้น จากนั้นจึงนำไปอบเพื่อระเหยสารระเหยให้แห้ง อีกวิธีหนึ่งคือทาบนแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนแล้วนำไปอัดประกอปกับเนฟิออนเมมเบรนจากนั้นนำแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนออก โดยทั่วไปแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนที่ใช้ในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดจะเป็นพวกพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอน เป็นต้น [11]

- การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition)

วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าอาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า คือการทำให้โลหะไปเกาะบนผิวหน้าขั้วงานที่ต้องการคือขั้วอิเล็กโทรด ขั้นตอนการพอกพูนเริ่มจากจุ่มขั้วอิเล็กโทรดลงในสารละลายที่มีโลหะที่ต้องการให้เกิดการพอกพูน จากนั้นป้อนกระแสไฟฟ้าให้ขั้วงานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะได้เป็นชั้นโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพอกพูนบนผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรด จากนั้นจึงนำไปล้างให้ปราศจากไอออนต่าง ๆ แล้วทำให้แห้ง [12]

- การพิมพ์ (Printing)

กระบวนการพิมพ์อาศัยหลักการการพ่นน้ำหมึกจากเครื่องพิมพ์ที่มีขนาดหยดหมึกเล็กลงบนผ้าคาร์บอนด้วยความเร็วสูงจึงทำให้ได้ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความบางและสม่ำเสมอ แต่การใช้เทคนิคการพิมพ์อาจมีความยุ่งยากในด้านของการเตรียมน้ำหมึกและระยะเวลาในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา [13]

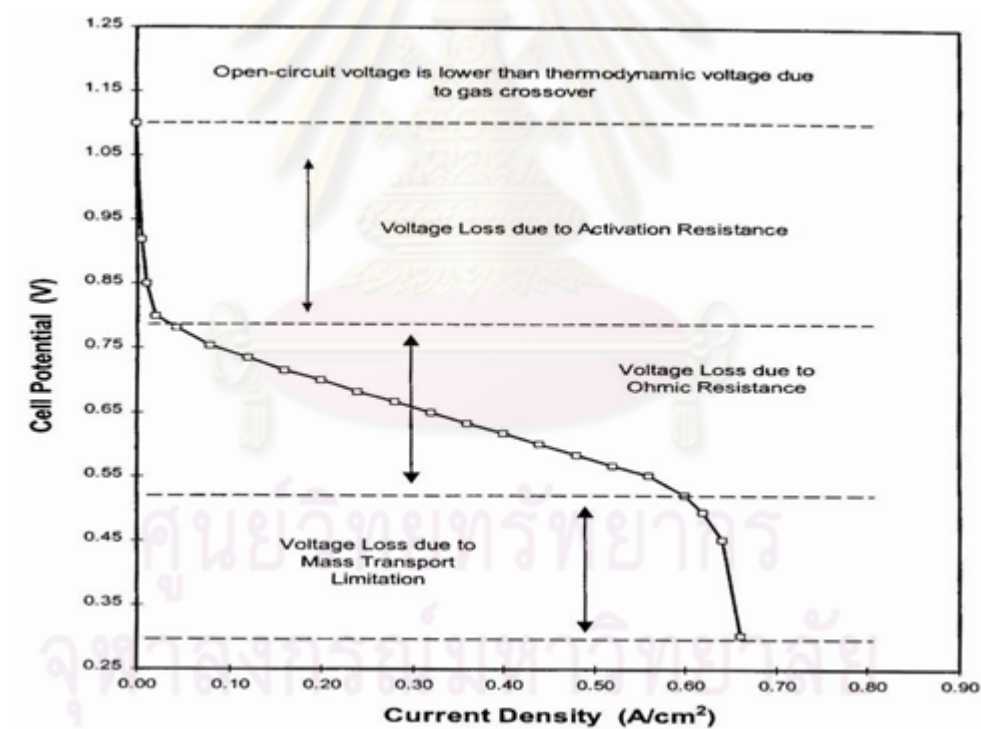
## 2.4 การอัดด้วยความร้อนในการประกอบขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (Hot pressing assembly of MEA) [1, 14]

ในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนจะทำการอัดขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วกับเนฟิออนเมมเบรนด้วยความร้อน โดยอุณหภูมิที่ใช้อัดด้วยความร้อนควรมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วของเนฟิออนเมมเบรน (อุณหภูมิที่เนฟิออนเมมเบรนเริ่มเสื่อมสภาพ) คือ ประมาณ 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วเมมเบรนจะมีการแลกเปลี่ยนโปรตอนและการสัมผัสของไอออนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างดี และที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้เมมเบรนสูญเสียคุณสมบัติในการรักษาน้ำ (Water retention) ทำให้มีความเป็นกรดมากขึ้นส่งผลให้เนฟิออนเมมเบรนมีสมบัติการนำโปรตอนลดลงและทำให้ขั้วอิเล็กโทรดแยกออกจากเมมเบรน การอัดด้วยความร้อนโดยทั่วไปจะใช้เวลาในช่วง 5000 – 15000 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียส และเวลาประมาณ 1-5 นาที จากงานวิจัยที่ผ่านมา [14] ได้ทำการหาค่าภาวะที่เหมาะสมในการอัดประกอปกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 137

องศาเซลเซียส ความดัน 65 กิโลกรัม. แรงต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

## 2.5 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล [1, 4, 15]

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถศึกษาได้จากกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) ดังรูปที่ 2.4 พบว่าเมื่อเซลล์มีการผลิตกระแสไฟฟ้าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell potential) จะมีค่าลดลงจากค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อเซลล์ยังไม่ได้มีการผลิตกระแสไฟฟ้า (Open circuit potential) ซึ่งการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้านี้เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานจริงของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น กระบวนการเป็นแบบไม่ผันกลับ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Overpotential)



รูปที่ 2.4 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล [4]

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงอธิบายได้จากกราฟโพลาริเซชันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่อเข้ากับวงจรภายนอกและมีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงให้กับระบบ เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้า



จ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ แต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าที่ลดลงไม่เท่ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี หรือที่ได้จากกระบวนการผันกลับได้ (Reversible process) ซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนจะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีประมาณ 1.299 โวลต์ โดยผลต่างระหว่างค่าความต่างศักย์จริงที่จ่ายให้กับวงจรภายนอกกับค่าความต่างศักย์ตามกระบวนการผันกลับได้ตามหลักของอุณหพลศาสตร์เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Overpotential) การลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงเกิดในกระบวนการที่เรียกว่า โพลาริเซชัน โดยการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง ( $E_{cell}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.5

$$E_{cell} = E_{cell}^o - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (2.5)$$

โดยที่	$E_{cell}^o$	=	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ทางเทอร์โมไดนามิกส์เมื่อเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดมาตรฐานไฮโดรเจน (โวลต์)
	$\eta_{act}$	=	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากการสูญเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเป็นผลจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา (โวลต์)
	$\eta_{ohm}$	=	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)
	$\eta_{conc}$	=	ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากการถ่ายเทมวลสาร (โวลต์)

เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.4 พบว่าเกิดการลดลงของศักย์ไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากกลไกต่าง ๆ โดยเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพลาริเซชันเป็น 4 ช่วง คือ

1. ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open-circuit potential) ซึ่งเกิดจากการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (Crossover) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเมมเบรน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับผิวขั้วอิเล็กโทรด ตัวอย่างเช่นเมื่อแก๊สไฮโดรเจนแพร่ข้ามไปยังขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สออกซิเจนโดยตรงส่งผลให้ไม่เกิดอิเล็กตรอนแกว่งจรภายนอกหรือเรียกว่าเกิดกระแสไฟฟ้าภายใน (Internal current) [15] ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินขึ้นที่ขั้วแคโทด

เช่นเดียวกันกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของออกซิเจน ก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง

2. โพลารีเซชันทางเคมี (Activation Polarization) เป็นค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงไปเนื่องมาจากการเอาชนะพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และความดัน ถ้าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะเกิดโพลารีเซชันทางเคมีมาก การลดค่าโพลารีเซชันทางเคมีสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง การเพิ่มความดัน เป็นต้น

3. โพลารีเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization) เกิดจากความต้านทานในแต่ละองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดและที่บริเวณแผ่นนำกระแสไฟฟ้า ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเมมเบรน และบริเวณจุดเชื่อมต่อด่าง ๆ ในการประกอบเซลล์ โดยเฉพาะการประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีจำนวนหลายชั้นเซลล์เนื่องจากจะเกิดความต้านทานผิวสัมผัสแต่ละจุดของชั้นเซลล์ที่มากส่งผลให้ประสิทธิภาพของชั้นเซลล์มีค่าลดลง เป็นต้น

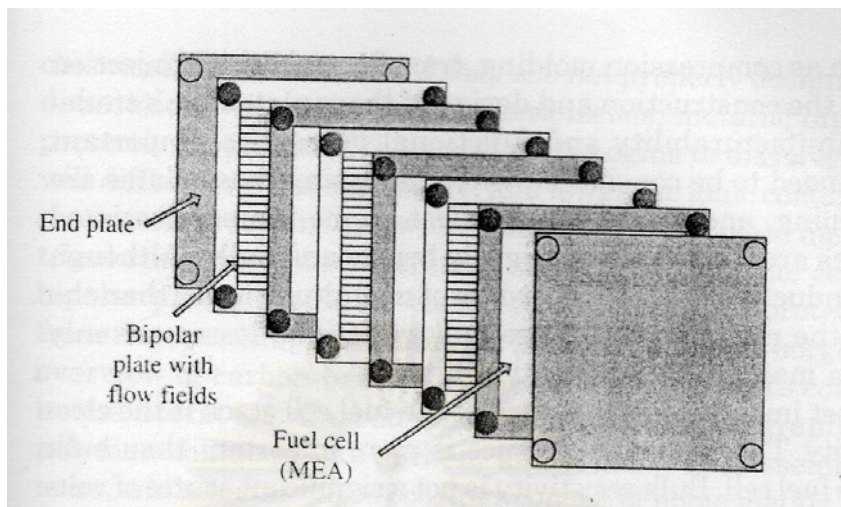
4. โพลารีเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization) เกิดเนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดซ์ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วจนไม่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากความเข้มข้นหรือความดันของสารตั้งต้นต่ำเป็นผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนิร์นสต์ ด้านแคโทดในกรณีที่ใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์มักจะไม่พบปัญหานี้เกิดขึ้นแต่เมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดซ์จะเกิดปัญหานี้ขึ้นเนื่องจากในอากาศมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยกว่ามาก ดังนั้นเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดซ์จำเป็นจะต้องมีการออกแบบช่องทางเดินแก๊สให้อากาศสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดได้อย่างเต็มที่เพื่อให้ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศสามารถแพร่เข้าไปยังบริเวณขั้วอิเล็กโทรดให้มากที่สุดทางด้านแอโนดแก๊สไฮโดรเจนถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในอัตราที่เร็วจนแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกป้อนเข้ามาไม่สามารถเข้าไปทดแทนในส่วนที่ใช้ไปในปฏิกิริยาได้ทัน จนทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนบริเวณผิวขั้วอิเล็กโทรดลดลง ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินมากขึ้น

## 2.6 ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack) [1, 5, 16]

เซลล์เชื้อเพลิงที่เชื่อมแบบเซลล์เดี่ยวจะใช้ในงานวิจัยเบื้องต้นเพื่อศึกษาสมบัติของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าซึ่งทำจากแกรไฟต์และช่องทางการไหลแบบต่าง ๆ เช่น ช่องทางการไหลแบบตรง ภายนอกมีข้อต่อเทพลอนเพื่อเป็นช่องทางแก๊สเข้าและขาออกทั้ง 2 ด้านของทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด พร้อมช่องใส่เทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิภายในเซลล์ และด้านนอกมีแผ่นโลหะประกบ มีแผ่นให้ความร้อนติดอยู่ทั้งสองข้างเพื่อให้ความร้อนแก่เซลล์เชื้อเพลิงตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้คือ แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน จากงานวิจัยของ Jian และคณะ [5] ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวมีค่าอยู่ที่ 600 – 800 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ภาวะการทำงานอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง 70 องศาเซลเซียส แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนอัดตัวด้วยความชื้น ความดัน 0.28 และ 0.3 เมกะปาสคาลตามลำดับ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นจำเป็นต้องหาวิธีแก้ปัญหาโดยการสร้างชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ถ้าเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวหนึ่งเซลล์ต้องการค่ากำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ จำเป็นต้องมีเซลล์ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 1000 แอมแปร์ โดยใช้พื้นที่ผิวเกิดปฏิกิริยามากกว่า 1000 ตารางเซนติเมตร และนอกจากนี้ยังต้องใช้สายไฟฟ้าที่มีความหนามากในการที่จะดึงกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงไปยังตัวดึงกระแสไฟฟ้า (Load) ภายนอก เพื่อที่จะลดความสูญเสียจากความต้านทานลง วิธีการแก้ปัญหาในประเด็นดังกล่าวคือการนำเอาเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวหลาย ๆ เซลล์มาต่อเข้ากันแบบอนุกรมเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเป็นการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้า โดยองค์ประกอบที่สำคัญของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.5

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

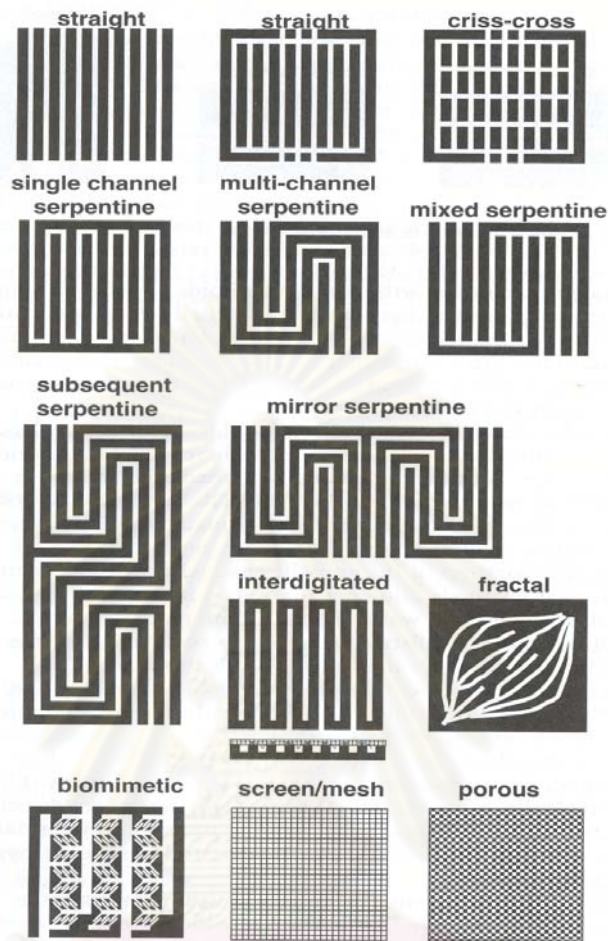


รูปที่ 2.5 องค์ประกอบที่สำคัญในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [16]

### 2.6.1 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate)

ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวมีเพียงแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียว แต่ในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีมากกว่าหนึ่งเซลล์ที่นำมาต่ออนุกรมกันจะมีแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ใช้ในการเชื่อมต่อขั้วแอโนดและขั้วแคโทดของอีกเซลล์หนึ่งเข้าด้วยกัน แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วทำหน้าที่แจกจ่ายแก๊สเชื้อเพลิง แยกแต่ละเซลล์ออกจากกัน รวบรวมกระแสไฟฟ้า พาน้ำออกจากแต่ละเซลล์และทำให้เซลล์รักษาอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยรูปแบบของช่องทางการไหลที่นิยมใช้ประกอบด้วย ช่องทางการไหลแบบตรง ช่องทางการไหลแบบคดเคี้ยว ช่องทางการไหลแบบขนาน เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.6 การเลือกใช้วัสดุที่ผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วขึ้นอยู่กับ การทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ราคา ความหนาแน่นและค่าการนำอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็มคือ แกรไฟต์-คาร์บอน คอมโพสิต เนื่องจากมีความคงทนต่อสารเคมีภายในภาวะแวดล้อมของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดีและง่ายต่อการขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่าง ๆ ส่วนวัสดุที่นิยมใช้งานอีกประเภทคือโลหะ เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก ไทเทเนียม เป็นต้น



รูปที่ 2.6 รูปแบบของช่องทางการไหลแบบต่าง ๆ [1]

### 2.6.2 ปะเก็น (Gasket)

การรั่วไหลของแก๊สเชื้อเพลิงนำไปสู่การสิ้นเปลืองแก๊สและสมรรถนะของเซลล์ที่ไม่ดี การแก้ปัญหาทำได้โดยเพิ่มแรงกดอัดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและการหาวัสดุที่ใช้ในการทำปะเก็นที่เหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของเอ็มอีเอที่ใช้ ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มวัสดุที่ใช้ในการทำปะเก็นคือ เทฟลอน ซิลิโคน เป็นต้น โดยปะเก็นที่ดีควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

- มีความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีเป็นเวลานาน เพื่อรักษาการคงสภาพของปะเก็น
- ป้องกันการรวมกันของแก๊สเชื้อเพลิงกับแก๊สออกซิไดซ์ที่ใช้ เพื่อป้องกันอันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาโดยตรง



- เป็นฉนวนของอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของวงจรไฟฟ้า
- มีความคงทนต่อช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน
- ราคาถูก

### 2.6.3 แผ่นประกบ (End plate)

แผ่นประกบต้องมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรองรับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและสามารถกระจายแรงจากการอัดประกอบให้มีความสม่ำเสมอในแต่ละเซลล์ภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการเลือกแผ่นประกบคือ มีความคงทนต่อแรงบีบอัดสูง สามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ มีความแข็งแรงและราคาถูก โดยวัสดุที่นิยมใช้คือ แก้วไฟต์ แสตนเลส สตีล และอะลูมิเนียม เป็นต้น

## 2.7 การออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [1, 16]

เมื่อต้องการนำส่วนประกอบต่าง ๆ มาประกอบเป็นชั้นเซลล์เชื้อเพลิงนั้น ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือ ขนาดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง น้ำหนัก ค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ ราคา และภาวะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

### 2.7.1 ขนาดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack sizing)

ขั้นแรกในการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือการคำนวณหาพื้นที่ผิวที่ต้องการเพื่อเกิดปฏิกิริยา (Active area) และจำนวนของเซลล์ที่จะใช้ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง แล้วจึงดูว่านำไปใช้งานในลักษณะใดเช่น ใช้งานที่ต้องการค่ากำลังไฟฟ้า งานที่ต้องการค่าศักย์ไฟฟ้าหรือช่วงของศักย์ไฟฟ้า งานที่ต้องการค่าประสิทธิภาพ และข้อจำกัดทางด้านขนาดและน้ำหนัก ซึ่งความต้องการเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้คือผลคูณของค่าศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์และค่ากระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.6

ค่ากำลังไฟฟ้า ( $W$ ) ที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหาได้จาก

$$W = V_{st} \cdot I \quad (2.6)$$

โดยที่  $W$  = ความต่างศักย์ไฟฟ้ารวมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)  
 $I$  = ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)



ค่ากระแสไฟฟ้าหาได้จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์ แสดงดังสมการ 2.7

$$I = i \cdot A_{cell} \quad (2.7)$$

โดยที่  $i$  = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)  
 $A_{cell}$  = พื้นที่ผิวเกิดปฏิกิริยาของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (ตารางเซนติเมตร)

โดยปกติแล้วจำนวนของเซลล์ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกกำหนดด้วยความต่างศักย์ที่ต้องการ พื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ระหว่าง 50 ถึง 300 ตารางเซนติเมตรขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานและค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ ในงานที่ใช้พื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาขนาดใหญ่เป็นการยากที่จะได้ภาวะในการทำงานที่สม่ำเสมอ ส่วนจำนวนของเซลล์มากที่สุดที่ใช้ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงถูกจำกัดด้วยแรงที่ใช้ในการอัด ความแข็งแรงของโครงสร้างและความดันตกคร่อม [1]

### 2.7.2 จำนวนของเซลล์ (Number of cells)

จำนวนของเซลล์ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงถูกกำหนดด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการและค่าศักย์ไฟฟ้าของระบบ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าทั้งหมดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือค่าผลรวมของค่าศักย์ไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหรือค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ไฟฟ้าและจำนวนของเซลล์ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังสมการที่ 2.8

$$V_{st} = \sum_{i=1}^{N_{cell}} V_i = \bar{V}_{cell} \cdot N_{cell} \quad (2.8)$$

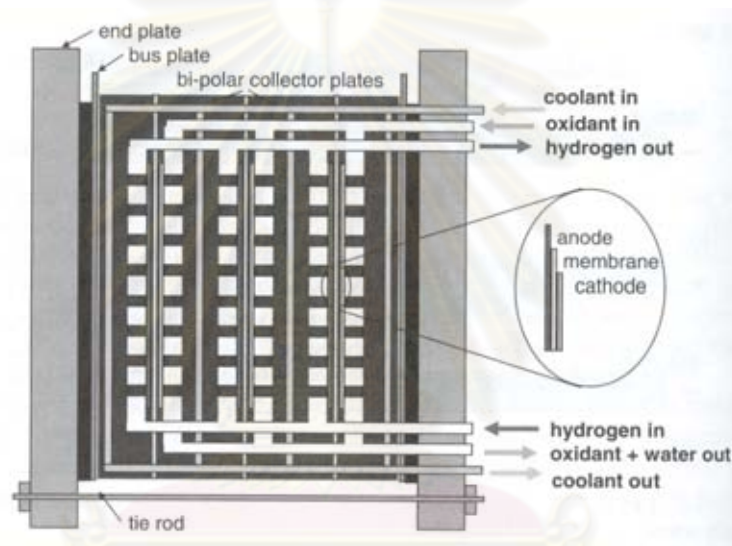
โดยที่  $V_i$  = ความต่างศักย์ไฟฟ้าของแต่ละเซลล์เดี่ยว (โวลต์)  
 $\bar{V}_{cell}$  = ความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของแต่ละเซลล์เดี่ยว (โวลต์)  
 $N_{cell}$  = จำนวนเซลล์ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

### 2.7.3 ลักษณะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stack configuration)

ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยเซลล์เดี่ยวหลายเซลล์ต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรม คือหัวแคโทดของเซลล์หนึ่งจะต่อเข้ากับหัวแอโนดของอีกเซลล์หนึ่งแบบอนุกรม อิเล็กตรอนจะผ่านหัวอิเล็กโทรดหัวสุดท้ายออกไปยังวงจรภายนอกและกลับมาทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์และ

โปรตอนที่เคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์มายังขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยหน่วยให้ความชื้นกับแก๊สก่อนที่จะเข้ามาในเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาจจะอยู่ในตัวชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเลยหรืออาจจะอยู่แยกออกมาอีกส่วนหนึ่งในทั้ง 2 กรณีจะใช้น้ำสำหรับการหล่อเย็นและการให้ความชื้น

ส่วนประกอบหลัก ๆ ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือหน่วยประกอบขั้วอิเล็กโทรด เมมเบรน (MEAs) แผ่นปะเก็น (Gasket) แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) แผ่นนำกระแสไฟฟ้า (Current collector) และแผ่นประกบ (End plate) ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโดยรวมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [1]

## 2.8 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [1, 16]

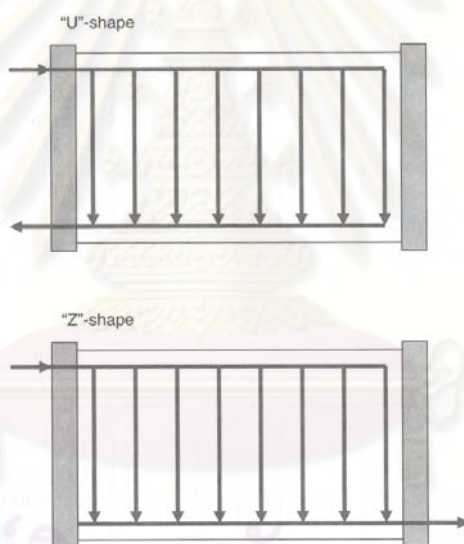
การที่จะให้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีส่วนประกอบหลายอย่างประกอบรวมกันเช่น ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ปะเก็น แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว และแผ่นประกบ ให้มีประสิทธิภาพที่ดีและสม่ำเสมอต้องพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่าง ดังนี้

### 2.8.1 การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังแต่ละเซลล์

ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง การให้แก๊สเชื้อเพลิงเข้าไปในแต่ละเซลล์ในปริมาณที่ไม่เท่ากันจะทำให้เกิดปัญหาด้านประสิทธิภาพ การจะให้แก๊สกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทำได้โดยการป้อนแก๊สเข้าไปในเซลล์ในรูปแบบการไหลแบบขนาน บางชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะช่องทางการไหลแบบภายนอกโดยช่องทางการไหลแบบภายนอกจะเกิดค่าความดันตกที่ต่ำและเกิดการกระจายตัวที่ดีของแก๊สเชื้อเพลิงระหว่างเซลล์

แต่มีข้อเสียคือแก๊สเชื้อเพลิงจะมีการไหลแบบลักษณะทะแยงซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันที่ขี้วอเล็กไทรด แต่โดยทั่วไปนิยมใช้ช่องทางการไหลแบบภายในเพราะไม่เพียงแต่แก้ปัญหาด้านการรั่วไหลได้ยังมีความง่ายต่อการควบคุมทิศทางการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงอีกด้วย

รูปแบบช่องทางการไหลผ่านชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมักจะเป็นในแบบตัวยู (U-shape) คือขาเข้าและขาออกจะอยู่ในด้านเดียวกันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง การไหลของแก๊สขาเข้าและขาออกจะอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม ส่วนในช่องทางการไหลแบบตัวแซด (Z-shape) คือขาเข้าและขาออกจะอยู่ด้านตรงกันข้ามของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง การไหลของแก๊สขาเข้าและขาออกจะขนานซึ่งกันและกัน จากรูปที่ 2.8 การออกแบบขนาดของช่องทางการไหลให้เหมาะสมจะส่งผลให้การกระจายตัวด้านอัตราการไหลเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอในแต่ละเซลล์



รูปที่ 2.8 ลักษณะการไหลของแก๊สภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [1]

### 2.8.2 การกระจายตัวของแก๊สเชื้อเพลิงภายในแต่ละเซลล์

เมื่อแก๊สที่เป็นสารตั้งต้นเข้าไปในแต่ละเซลล์ จะต้องให้การกระจายตัวเป็นไปอย่างทั่วถึงทั้งพื้นผิวการเกิดปฏิกิริยาเพื่อที่จะให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปแล้วจะอาศัยแผ่นช่องทางการไหลช่วยในการกระจายตัวของแก๊สและปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบช่องทางการไหล ประกอบด้วย

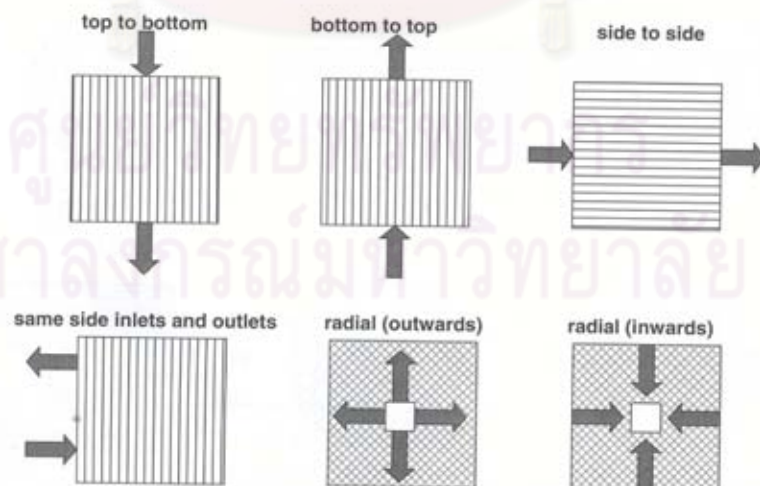
- ลักษณะช่องทางการไหล

ช่องทางการไหลของแก๊สจะมีหลายรูปแบบ หลายขนาด ซึ่งขนาดที่จะใช้พิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ที่ต้องการ ลักษณะของช่องทางการไหลจะดูจากตำแหน่งของช่องทางแก๊สเข้าและขาออก รวมไปถึงการจัดการกับความร้อนที่เกิดขึ้น โดยรูปร่างที่นิยมมากสุดในการออกแบบคือรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่บางครั้งก็อาจเป็นแบบทรงกลม หกเหลี่ยม แปดเหลี่ยม

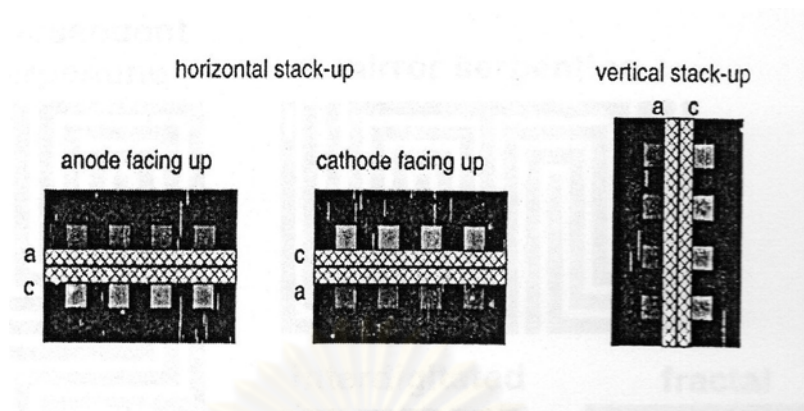
- ทิศทางในช่องทางการไหล

จากรูปที่ 2.9 ทิศทางการไหลและตำแหน่งของช่องทางแก๊สเข้าและออกมีความสำคัญมากเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงต่อน้ำที่อยู่ในเซลล์ซึ่งอาจเกิดการควบแน่นขึ้นภายในเซลล์ (ไม่คำนึงถึงผลของแรงโน้มถ่วงต่อแก๊ส) ปรากฏการณ์ควบแน่นจะเกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลอง หรืออาจขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการทดลองหรือหลังจากปิดเครื่อง

ทิศทางการไหลของแก๊สผ่านขั้วแอโนดและแคโทดอาจเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้ามก็ได้ ทิศทางการไหลมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเช่นกัน เนื่องมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สและน้ำขึ้นภายในเซลล์ นอกจากนี้ทิศทางการวางชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและทิศทางของแผ่นช่องทางการไหลไม่ว่าจะวางในแนวตั้งหรือแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ล้วนมีผลต่อการจัดการน้ำออกจากเซลล์โดยเฉพาะเมื่อปิดเครื่องหรือขณะทำการหล่อเย็น



รูปที่ 2.9 ทิศทางการไหลที่เป็นไปได้ในแผ่นช่องทางการไหล [1]



รูปที่ 2.10 รูปแบบการวางชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [1]

- รูปแบบของช่องทางการไหล

รูปแบบของช่องทางการไหลที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็มมีหลายรูปแบบ โดยมีจุดประสงค์ให้แก๊สที่เข้าไปในเซลล์เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และให้ผลดีต่อการจัดการน้ำที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6

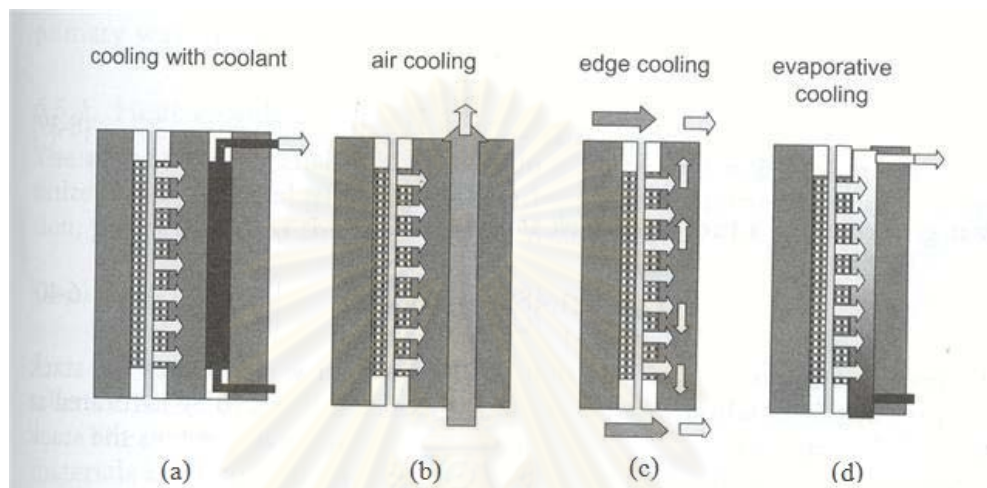
### 2.8.3 การจัดการความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ภายในเซลล์เชื้อเพลิง การจัดการความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามีวิธีการจัดการแสดงดังรูปที่ 2.11

1. การหล่อเย็นด้วยสารหล่อเย็นให้ไหลผ่านระหว่างเซลล์ โดยน้ำที่นำมาใช้อาจเป็นน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized water) สารหล่อเย็นที่ป้องกันการแข็งตัว (Antifreeze coolant) หรืออากาศ โดยที่การหล่อเย็นจะทำโดยให้สารหล่อเย็นผ่านระหว่างเซลล์หรือระหว่างกลุ่มของเซลล์ ดังรูปที่ 2.11 (a), (b)
2. การหล่อเย็นด้วยสารหล่อเย็นที่ปลายของพื้นที่เกิดปฏิกิริยา (ชนิดมีและไม่มีครีระบายความร้อน) ความร้อนจะถูกนำผ่านแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากนั้นจึงถ่ายโอนไปยังสารหล่อเย็น โดยทั่วไปมักใช้อากาศ และแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ใช้กันนั้นจะต้องมีลักษณะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีเพื่อรักษาสภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิให้คงที่ นอกจากนี้พื้นผิวที่ปลายขอบอาจจะทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนได้ไม่ดีพอ จึงต้องมีการนำแผงระบายความร้อนเข้ามาช่วยในการระบายความร้อน วิธีการนี้นิยมใช้กับงานที่ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าไม่สูงนัก ดังรูปที่ 2.11 (c)



3. การหล่อเย็นด้วยการทำให้เปลี่ยนสถานะ สารหล่อเย็นที่ใช้ อาจจะเป็นน้ำหรือสื่อกลางแบบอื่น ๆ การใช้ น้ำ จะง่ายต่อการออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ในทั้งขั้วแอโนดและแคโทด ดังรูปที่ 2.11 (d)



รูปที่ 2.11 รูปแบบและลักษณะการหล่อเย็นชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [1]

#### 2.8.4 การอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

การออกแบบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและเอ็มอีเอ็มอีมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างมาก แรงอัดที่ใช้ในการประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเข้าด้วยกันช่วยป้องกันการรั่วไหลของแก๊สเชื้อเพลิงระหว่างแต่ละชั้นของเซลล์และลดค่าความต้านทานผิวสัมผัสระหว่างชั้นเซลล์ แรงอัดประกอบชั้นเซลล์มีค่าเท่ากับแรงที่ใช้ในการอัดปะเก็น ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง และแรงภายใน ถ้าแรงอัดประกอบที่ใช้มีความไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องการรั่วไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและค่าความต้านทานผิวสัมผัสที่มาก แรงที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์ในแต่ละเซลล์จะมีค่าแตกต่างกันออกไปตามวัสดุ จำนวนและขนาดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยแรงทอร์กที่ใช้ในการยึดเข้าด้วยกันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

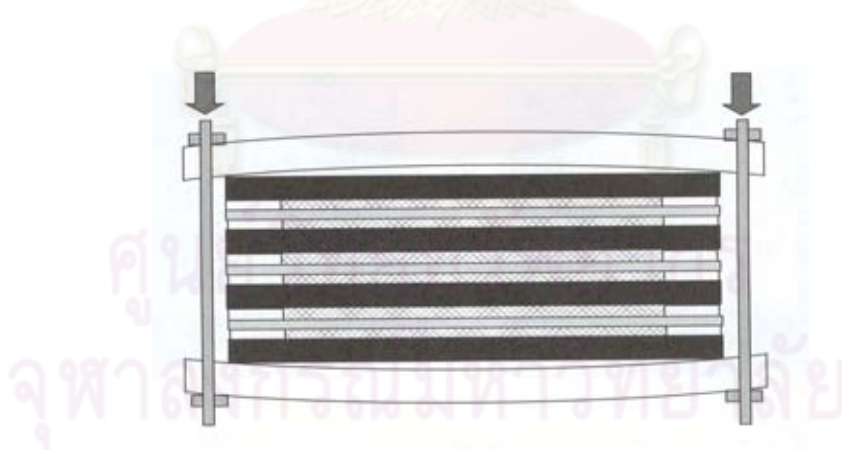
$$T = \frac{FK_b D_b}{N_b} \quad (2.9)$$

โดยที่  $T$  = แรงของโมเมนต์ทอร์กที่ใช้ (นิวตันเมตร)  
 $F$  = แรงที่ใช้ในการยึด (นิวตัน)

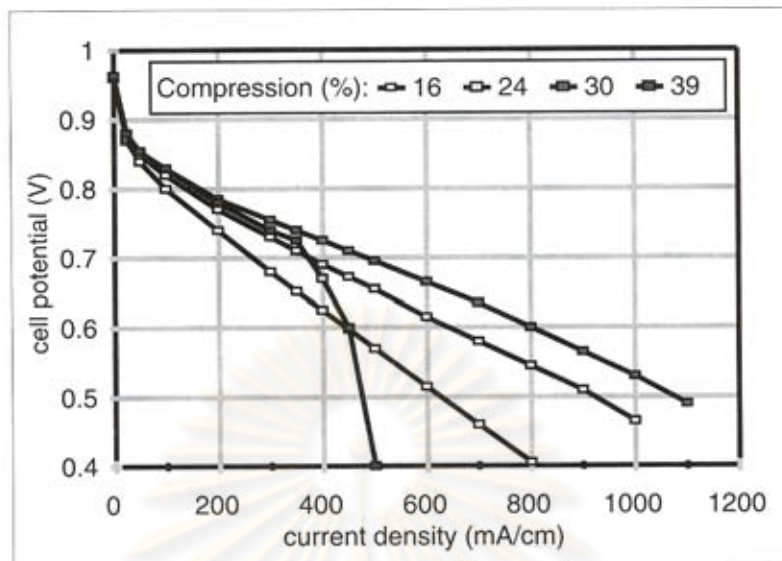


$K_b$	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (สำหรับน็อตที่มีการหล่อลื่นมีค่า 0.17 และสำหรับน็อตที่ไม่มีการหล่อลื่นมีค่า 0.20)
$D_b$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของน็อต (เมตร)
$N_b$	=	จำนวนน็อตที่ใช้

การใช้แรงยึดในการอัดประกอบเซลล์มากเกินไปหรือไม่ถูกวิธีจะทำให้แผ่นประกบเกิดการโค้งงอตัว แสดงดังรูปที่ 2.12 การใช้ความดันในระบบที่ 1.5-2.0 เมกะปาสคาลจะช่วยลดค่าความต้านทานผิวสัมผัสระหว่างชั้นแพร์แก๊ส และแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วให้น้อยลงได้ เนื่องจากชั้นแพร์แก๊สมีสมบัติในการกดอัดได้ (Compressible) ในการทดลองจึงควรเลือกใช้ชั้นแพร์แก๊สกับปะเก็นที่มีความหนาอย่างเหมาะสมและเหมาะสมกับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ใช้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.13 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงที่ใช้ในการอัดประกอบเซลล์ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความต้านทานระหว่างผิวสัมผัสมีค่าลดลง แต่ถ้าใช้แรงอัดมากเกินไปเส้นกราฟโพลาริเซชันจะแสดงผลของโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น เนื่องจากการใช้แรงอัดที่มากเกินไปอาจทำให้รูพรุนของขั้วอิเล็กโทรดถูกกดอัดแน่นขึ้นและมีขนาดลดลง ทำให้แก๊สแพร์ได้ไม่สม่ำเสมอเพราะชั้นต่าง ๆ ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงถูกบีบอัดมาก การหาแรงอัดที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการคำนวณหรือจากการทดลองสำหรับชนิดของชั้นแพร์แก๊สต่าง ๆ



รูปที่ 2.12 ลักษณะการโค้งงอตัวของแผ่นประกบกรณีใช้แรงในการอัดประกอบเซลล์มากเกินไป [1]



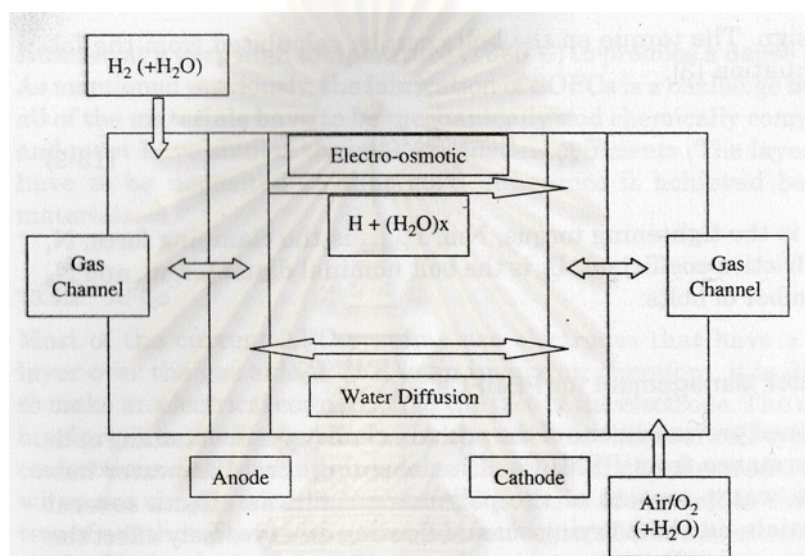
รูปที่ 2.13 ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แรงอัดประกอบต่างกัน [1]

### 2.8.5 การจัดการน้ำสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

ปริมาณน้ำที่เกิดภายในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นมีทั้งปัญหาน้ำท่วมเซลล์ (Flooding) และเซลล์แห้ง (Drying) โดยค่าการนำโปรตอนของพอลิเมอร์เมมเบรนขึ้นกับปริมาณน้ำ ถ้าเอมีอไอมีความชื้นไม่เพียงพอจะทำให้ค่าการนำโปรตอนลดลงซึ่งทำให้ค่าความต้านทานของเซลล์ (Cell resistance) สูงขึ้น และถ้าปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะทำให้ไปขัดขวางการแพร่ของแก๊สเชื้อเพลิงในตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาเนื่องจากน้ำท่วมผิวขั้วอิเล็กโทรดหรือบดบังช่องทางไหลของแก๊สส่งผลให้เกิดการสูญเสียค่าศักย์ไฟฟ้าในการแพร่ (Diffusion over potential) เพิ่มขึ้น [16]

น้ำในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มเกิดจากความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิงและจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงด้านขั้วแคโทด โดยค่าความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิงขึ้นกับอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิง ความดัน อัตราการไหลและความหนาของเมมเบรน ส่วนน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาด้านแคโทดจะเกิดการถ่ายโอนไปยังด้านแอโนดเมื่อมีการใส่ตัวดึงกระแสไฟฟ้าภายนอกโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดโดยผ่านพอลิเมอร์เมมเบรนและพาโมเลกุลน้ำไปกับมันด้วยเรียกว่าแรงลากออสโมติก (Electro-osmotic drag) กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 2.14

วิธีในการกำจัดน้ำออกจากเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มคือการพาสเมทริกซ์น้ำออกจากเซลล์โดยอาศัยแก๊สเชื้อเพลิงที่ไม่อิ่มตัว อัตราการกำจัดน้ำออกจากเซลล์ขึ้นกับภาวะที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงและการออกแบบของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น อุณหภูมิของระบบ ความดัน ช่องทางการไหลของแก๊ส ชนิดของชั้นแพร่แก๊สและอัตราการไหลซึ่งมีผลต่อปริมาณไอน้ำของแก๊ส อัตราการระเหยของน้ำ และค่าความดันไอ

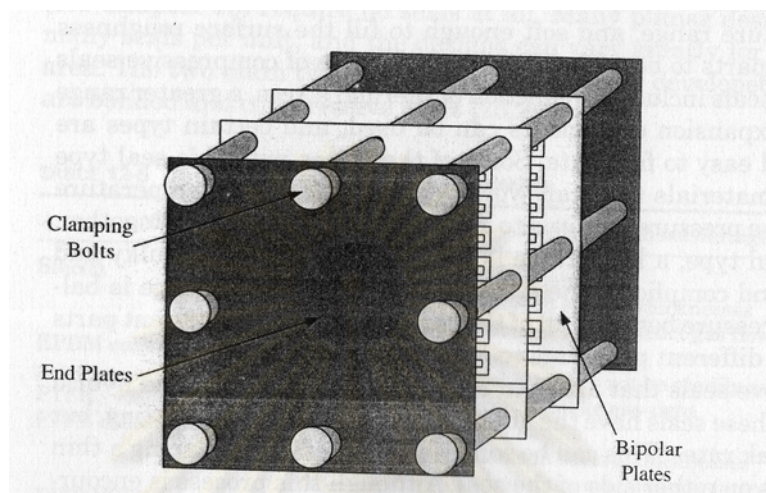


รูปที่ 2.14 กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [16]

## 2.8.6 การประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

หลังจากการออกแบบเอ็มอีเอ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว แผ่นประกบ และปะเก็น ขั้นตอนต่อไปคือการประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเข้าด้วยกัน โดยการเลือกชนิดที่ใช้ในการอัดเซลล์ควรเลือกชนิดที่ไม่ใช่โลหะแต่ควรเลือกวัสดุที่เป็นฉนวน เพื่อป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กชนิดที่นิยมใช้คือ ไนลอน โดยขั้นตอนการประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มจากการนำแผ่นประกบวางและทำการใส่น้ำเพื่อยึดโครงสร้างทั้งหมดเข้าด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 2.15 จากนั้นจึงนำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียวใส่ ตามด้วยปะเก็น เอ็มอีเอ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว และทำสลับกันไปเรื่อยๆจนได้ครบตามจำนวนเซลล์ที่ต้องการ จึงปิดท้ายด้วยแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียวและแผ่นประกบ จากนั้นจึงเลือกแรงอัดประกอบ

ชั้นเซลล์ที่เหมาะสมเพื่อสมรรถนะที่ดีของเซลล์ และจึงนำไปทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป



รูปที่ 2.15 ลักษณะการประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจำนวน 2 เซลล์ [16]

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sasikumar และคณะ [7] ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่ใช้กับปริมาณที่เหมาะสมของเนฟลอนไอโอโนเมอร์ในขั้วอิเล็กโทรด พบว่าปริมาณที่เหมาะสมของเนฟลอนขึ้นอยู่กับปริมาณแพลทินัมที่ใช้ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเนฟลอนจะต้องลดปริมาณแพลทินัมลง โดยขั้วอิเล็กโทรดที่มีปริมาณ 0.5 0.25 และ 0.1 มิลลิกรัมแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร จะต้องใช้ปริมาณของเนฟลอนร้อยละ 20 40 และ 50 ตามลำดับ จึงจะให้สมรรถนะที่ดีที่สุด

Amirinejad และคณะ [17] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของระบบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ภายใต้ภาวะการทำงานต่าง ๆ เช่น ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง อุณหภูมิ และความดันของระบบ โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มชนิดเซลล์เดี่ยวขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยาขนาด 5 ตารางเซนติเมตร จากการศึกษาพบว่าตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อการเคลื่อนที่ของมวลซึ่งประกอบด้วย การเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงไปยังพื้นที่ทำปฏิกิริยาในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา การเคลื่อนที่ของโปรตอนจากด้านแอโนดไปยังด้านแคโทดผ่านเมมเบรนและการเคลื่อนที่ของน้ำที่ผลิตได้จากด้านแคโทดไปยังด้านแอโนดโดยกลไกการแพร่กลับ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ภาวะที่ให้สมรรถนะที่ดีที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิงคือ ทดสอบที่ความดันและอุณหภูมิสูง โดยการใช้แก๊สที่มีความชื้น



Sunnoe และ Hong [18] ศึกษาภาวะของการทดสอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ตัวแปรต่าง ๆ คือ ค่าความชื้นของสารเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนท์ และอุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่พื้นที่ทำปฏิกิริยา 10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 10 เซลล์ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อค่าความชื้นของเซลล์กับอุณหภูมิของทั้งขั้วแอโนดและแคโทดเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความชื้นของขั้วแอโนดเพียงด้านเดียวพบว่าไม่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง แต่ค่าความชื้นทางขั้วแคโทดส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่า

Karimi และคณะ [19] ศึกษาแนวทางการแก้ปัญหาน้ำท่วมของชั้นแพร์แก๊สที่เกิดขึ้นกับช่องทางการไหลของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยทำการประเมินหาภาวะที่ใช้ในการทดสอบที่ทำให้น้ำเริ่มท่วม โดยทำการศึกษาแบบจำลองและสนใจในด้านขั้วแคโทดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีปัญหา น้ำท่วมเซลล์มากกว่า แบบจำลองทำนายสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในเทอมของความดัน ค่าความเข้มข้นของสารแต่ละชนิด น้ำท่วมชั้นแพร์แก๊ส และคุณภาพในการแจกจ่ายแก๊สของช่องทางการไหล จากแบบจำลองพบว่าเมื่อน้ำท่วมชั้นแพร์แก๊สจะทำให้ความสามารถในการแพร่ผ่านของแก๊สในช่องทางการไหลมีค่าต่ำ แต่ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ส่งผลเพียงพอทำให้เกิดค่าความดันตกและเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้

Zhou และคณะ [20] ศึกษาอิทธิพลของแรงอัดประกอบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยพิจารณาค่าความต้านทานผิวสัมผัสและค่าความพรุนของชั้นแพร์แก๊ส ค่าความต้านทานผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นจะส่งผลโดยตรงกับค่าความสูญเสียความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยค่าแรงอัดประกอบที่เหมาะสมจะให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงที่สุดที่แรงอัด 1 เมกะปาสคาล จะให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.9 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์

Weng และคณะ [21] ศึกษาพฤติกรรมน้ำท่วมในช่องทางการไหลที่ขั้วแคโทดและวิเคราะห์ผลกระทบต่อความเสถียรของเซลล์ เซลล์ชนิดโปร่งแสงสร้างจากแผ่นทองเหลืองเคลือบทองเพื่อใช้เป็นช่องทางการไหลของแก๊สและแผ่นนำกระแสไฟฟ้า เซลล์ชนิดโปร่งแสงทำงานที่ภาวะกระแสไฟฟ้าคงที่โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สที่ด้านแคโทดเพื่อสังเกตพฤติกรรมน้ำท่วมในช่องทางการไหลของแก๊สด้านแคโทด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าน้ำท่วมมากขึ้นเมื่อเซลล์ทำงานที่อัตราการไหลต่ำ หรือที่อุณหภูมิของเซลล์ต่ำ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าที่ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าสูง (0.7 โวลต์) น้ำจะท่วมที่อัตราส่วนของแก๊สเชื้อเพลิงต่ำ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำ (0.45-0.5 โวลต์) สมรรถนะถูกควบคุมด้วยการสูญเสียจากการถ่ายโอนมวล สมรรถนะของเซลล์สูงสุดเมื่อ

อัตราส่วนของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิเซลล์ 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิง 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มของอัตราส่วนของอัตราการใช้ของแก๊สจะเพิ่มอัตราการใช้ไอโนมวล แต่จะพบว่าเซลล์เกิดการแห้งเมื่ออัตราส่วนของอัตราการใช้ของแก๊สมีค่ามากเกินไป

Sasikarn และคณะ [22] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกศึกษากระบวนการเตรียม เช่น ปริมาณสารละลายเทฟลอนและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่าระยะเวลาในการอบแห้ง ไม่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ในงานวิจัยจะเลือกใช้การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำภายใต้บรรยากาศ ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาปริมาณเนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิในการอบแห้ง พบว่าปริมาณเนฟิออนมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ภาวะที่ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดคือ ปริมาณเนฟิออนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศ



คุรุขेत्रวิทยัทรพยากร  
จุพาลงกรณมทาวิตยาลัย



### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### - สารเคมีและวัสดุ

ชื่อสารเคมี/วัสดุ	บริษัท
ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (20%wt. Pt/XC72)	Electrochem Inc.
สารละลายเนฟิออน (5%wt. Nafion 117)	Fluka
เนฟิออนเมมเบรน (Nafion membrane 115)	Electrochem Inc.
เนฟิออนเมมเบรน (Nafion membrane 212)	Electrochem Inc.
ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth)	Electrochem Inc.
ผงคาร์บอน (Vulcan XC-72)	Cabot
พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (60%wt. Polytetrafluoroethylene)	Sigma-Aldrich
1, 2 -ไดเมทอกซีอีเทน (1, 2 - Dimethoxy ethane)	Fluka
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30%w/v Hydrogen peroxide)	Merck
กรดซัลฟูริก (98%w/v Sulfuric acid)	BDH

##### - แก๊ส

ชื่อแก๊ส	บริษัท
แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen 99.999%)	Praxair
แก๊สออกซิเจน (Oxygen 99.999%)	Praxair
แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen 99.99%)	Praxair

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

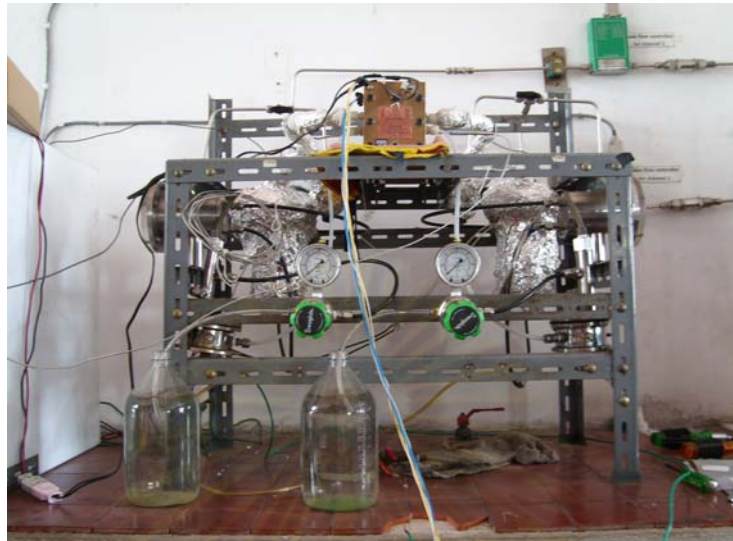
- ตู้อบไฟฟ้า (Oven) รุ่น UE500 บริษัท Memmert
- เตาเผา (Muffle furnace) รุ่น ELF 11/14/201 บริษัท Carbolite
- อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) รุ่น 575D บริษัท Crest
- เครื่องชั่งสารความละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Crest
- ไมโครปิเปต (Micro pipett) ขนาด 0-10 และ 100-1000 ไมโครลิตร บริษัท Labnet

- โถดูดความชื้น (Descicator)
- เครื่องอ่างไอน้ำ (Water bath) รุ่น SBD-50 บริษัท Heto
- เครื่องกดอัดด้วยความร้อน (Compression mold) รุ่น LP20 บริษัท Labtech
- เครื่องแกว่งอื่น ๆ ในห้องปฏิบัติการ

### 3.3 ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว

ระบบทดสอบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มดังแสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย

- Hardware เซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว จากบริษัท Electrochem Inc. ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 และ 25 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และลักษณะช่องทางการไหลของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียว แสดงดังรูปที่ 3.3
- Hardware เซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ จากบริษัท NuVant Systems Inc. ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 0.713 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนฟิออนเมมเบรน 117 จากบริษัท Electrochem Inc. ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.5
- อุปกรณ์ทำความชื้น (Humidifier)
- อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)  
ช่วงอัตราการไหล 0-2000 sccm บริษัท AALBORG
- อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) บริษัท Shinks
- อุปกรณ์ควบคุมความดันแก๊ส (Back pressure)  
ช่วงความดัน 0-60 psi บริษัท Swagelok
- เครื่อง Electronic load รุ่น PLZ-30F บริษัท KIKUISUI ดังแสดงในรูปที่ 3.5

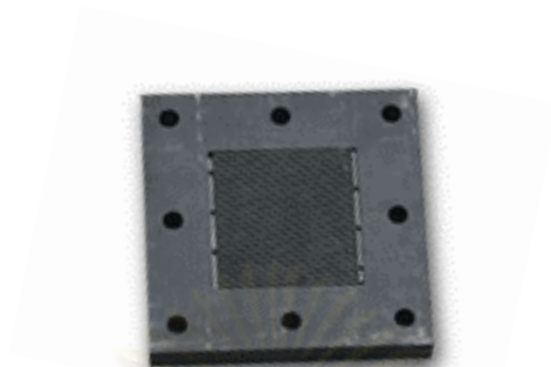


รูปที่ 3.1 ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยวที่ใช้ในการทดลอง

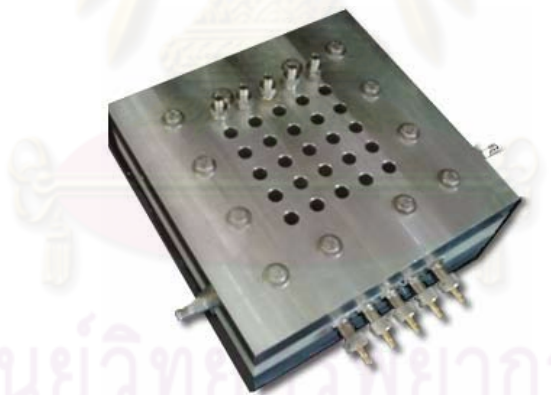


รูปที่ 3.2 Hardware สำหรับทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว)

บริษัท Electrochem Inc.

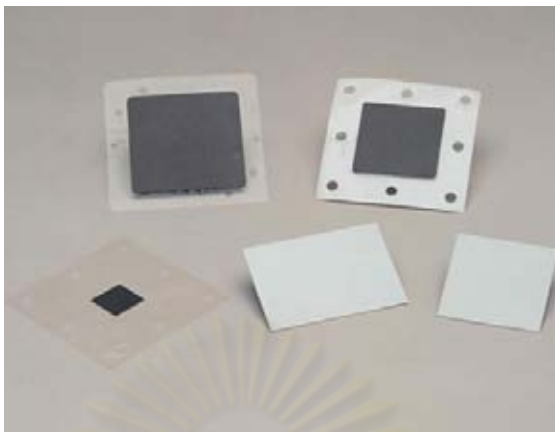


รูปที่ 3.3 ลักษณะช่องทางการไหลแบบคดเคี้ยวในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียว  
ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว



ศูนย์วิจัยสหวิทยาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 Hardware เซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ บริษัท NuVant Systems



รูปที่ 3.5 ซีวีแอลทีทรอดประกอบบนเมมเบรนทางการค้า บริษัท Electrochem Inc.



รูปที่ 3.6 เครื่อง Electronic load รุ่น PLZ-30F บริษัท KIKUISUI

### 3.4 ระบบทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

มีองค์ประกอบเช่นเดียวกับระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวแต่มีข้อแตกต่างของอุปกรณ์ตรวจวัดคือ

- เครื่อง Electronic load รุ่น N3300A บริษัท Agilent ดังแสดงในรูปที่ 3.7

- ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 3 เซลล์ พื้นที่ทำปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และลักษณะช่องทางการไหลในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 3.9

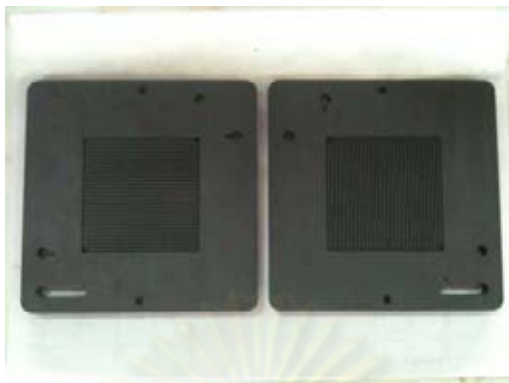


รูปที่ 3.7 เครื่อง Electronic load รุ่น N3300A บริษัท Agilent



รูปที่ 3.8 Hardware สำหรับทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง)





รูปที่ 3.9 ช่องทางการไหลในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

### 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น JSM-5410LV บริษัท JEOL เพื่อดูการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด
- เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท Autolab เพื่อหาพื้นผิวในการเกิดปฏิกิริยาและค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

### 3.6 ตัวแปรที่ศึกษาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเซลล์เดี่ยว

- ผลของเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด
- ผลของชั้นจัดการน้ำบนขั้วอิเล็กโทรด
- ผลของปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ปริมาณเนฟลอนร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก
- ผลของชนิดของเนฟลอนเมมเบรน 115 และ 212
- ผลของการขยายขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดจาก 5 ตารางเซนติเมตร เป็น 25 ตารางเซนติเมตร

### 3.7 ตัวแปรที่ศึกษาของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

- ผลของค่าความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง
- อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจน 1:1 1:2 1:3 2:1 และ 3:1
- แรงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 50-70 ปอนด์แรง.นิ้ว

- ผลของความดันของระบบ 0-10 พีเอสไอจี
- ผลของการเปรียบเทียบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้กับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดทางการค้า

### 3.8 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.8.1 การปรับสภาพของเมมเบรน

1. นำเมมเบรนแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์
2. นำเมมเบรนแช่ในน้ำที่ปราศจากไอออน ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำเมมเบรนแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดไอออนของโลหะ
4. นำเมมเบรนแช่ในน้ำที่ปราศจากไอออนปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อล้างคลอรีนไอออน
5. นำเมมเบรนที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว แช่ในน้ำที่ปราศจากไอออนเก็บไว้ เพื่อรอการนำไปใช้งาน

#### 3.8.2 การเตรียมขั้วอิเล็กโทรด

##### 3.8.2.1 การเตรียมชั้นจัดการน้ำ

1. ปิเปตน้ำปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดที่มีฝาปิดและใช้ไมโครปิเปตปิเปตสารละลายเทฟลอนปริมาตร 1.334 ไมโครลิตร ใส่ในขวดข้างต้น
2. นำขวดตัวอย่างใส่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
3. ปิเปตสารละลายไอโซโพรพานอลปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดตัวอย่าง
4. นำขวดตัวอย่างใส่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
5. ชั่งผงคาร์บอน ปริมาตร 18 มิลลิกรัม ใส่ในขวดตัวอย่าง
6. นำขวดตัวอย่างใส่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
7. ตัดผ้าคาร์บอนขนาด 2.3×2.3 ตารางเซนติเมตร ชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า

8. ใช้ฟุ้งกันจุ่มสารละลายตัวอย่างทาลงบนผ้าคาร์บอน จากนั้นนำผ้าคาร์บอนไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 นาที ทาซ้ำจนได้น้ำหนักที่ต้องการคือ ปริมาณคาร์บอน 2.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

### 3.8.2.2 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 20%wt. Pt/C ใส่ในขวดที่มีฝาปิดตามปริมาณที่ได้จากการคำนวณ
2. บีบเปิดสารละลาย 1,2-ไดเมทอกซีอีเทนในขวดข้างต้น ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ปิดฝาขวด
3. นำขวดตัวอย่างใส่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
4. บีบเปิดสารละลายเนฟิออนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ลงในขวดตัวอย่าง ตามตัวแปรที่ศึกษาคือ ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก
5. นำขวดตัวอย่างใส่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
6. นำผ้าคาร์บอนที่มีและไม่มีชั้นจัดการน้ำตามตัวแปรที่ศึกษา วางบนกรอบพลาสติก ทำการพ่นหรือทาน้ำหมักลงบนผ้าคาร์บอนตามตัวแปรที่ศึกษา ทิ้งให้แห้งแล้วทำซ้ำจนกระทั่งได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่ต้องการคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร
7. นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สำหรับการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดขนาด 25 ตารางเซนติเมตร ทำเช่นเดียวกับการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดขนาด 5 ตารางเซนติเมตร โดยตัดผ้าคาร์บอนขนาด 5.5×5.5 ตารางเซนติเมตร และเพิ่มปริมาตรของสารละลายต่าง ๆ เป็น 5 เท่าของปริมาตรเดิม โดยใช้ภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดขนาด 5 ตารางเซนติเมตร

### 3.8.3 การประกอบขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน

1. นำแผ่นพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น ไมลาร์ฟิล์ม ที่ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ตัดตรงกลางให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเท่ากับพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดคือ 2.3×2.3 ตารางเซนติเมตรสำหรับพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร และ 5.5×5.5 ตารางเซนติเมตรสำหรับพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร

2. นำกาวยสองหน้าแปะที่มุมทั้ง 4 ของแผ่นพลาสติก แล้วนำไปแปะลงบนแผ่น แสตนเลส 1 อัน
3. ทาสารละลายเนฟิออนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก บนผิวหน้าขั้ว อิเล็กโทรดที่เตรียม โดยทาด้านที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ให้ทั่วผิวหน้าทั้ง 2 ขั้วอิเล็กโทรดสำหรับพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร และเพิ่มปริมาตรเป็น 5 เท่า สำหรับพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร
4. นำขั้วอิเล็กโทรดที่ทาสารละลายเนฟิออนวางลงบนแผ่นแสตนเลสที่แปะ พลาสติก
5. จากนั้นนำเนฟิออนเมมเบรนชนิด 115 และ 212 ตามตัวแปรที่ศึกษาที่ผ่าน การปรับปรุงสภาพวางบนขั้วอิเล็กโทรดโดยให้ขั้วอิเล็กโทรดอยู่กึ่งกลางของ เมมเบรน
6. นำขั้วอิเล็กโทรดอีกข้างวางทับลงบนเมมเบรนโดยให้ด้านที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ประทับกับเมมเบรน
7. จากนั้นนำแผ่นพลาสติกอีก 1 แผ่น มาประกบทับบนเมมเบรนกับขั้ว อิเล็กโทรด ก่อนกดอัดด้วยเครื่อง Compression Mold
8. วางแผ่นแสตนเลสทั้งสองแผ่นบนแท่นกดอัดของเครื่อง Compression Mold
9. เปิดเครื่อง Compression Mold และอัดด้วยความร้อนและความเย็น โดยใช้ ความดัน 65 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที [14]
10. นำขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ไปทดสอบสมรรถนะการ ทำงาน

### 3.8.4 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว

ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะทั้งก่อนและหลังของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเซลล์เดี่ยวมี

ลักษณะการทำงานที่เหมือนดังเช่นงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา [12]

### 3.8.5 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

#### 3.8.5.1 การประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

1. เริ่มทำจากด้านขาเข้าของแก๊สไล่ขึ้นมายังด้านบน โดยวางด้านที่มีท่อขา เข้าของแก๊สไว้ด้านล่าง และทำการใส่ไน้ดเพื่อยึดส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

2. วางแผ่นประกบ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียวที่มีช่องทางการไหลแบบตรง (Straight) จากนั้นจึงวางสลับกันไปเรื่อย ๆ ระหว่างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วและขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรดประกอบเมมเบรน โดยจะมีแผ่นปะเก็นซึ่งทำจากเทฟลอนวางคั่นอยู่ระหว่างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วและขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรดประกอบเมมเบรนเพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและการเชื่อมต่อของวงจรไฟฟ้า จนกระทั่งวางครบ 3 เซลล์แล้วจึงปิดท้ายด้วยแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียวและแผ่นประกบ ตามลำดับ
3. ยึดชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกันด้วยการขันน็อตที่แผ่นประกบ โดยใช้ประแจปอนด์เพื่อทำการอัดประกบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่โมเมนต์การหมุนตามตัวแปรที่ศึกษาคือตั้งแต่ 50-70 ปอนด์แรง.นิ้ว
4. นำชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ได้ไปติดตั้งโดยวางในลักษณะเอียง 30 องศากับฐานโดยให้ส่วนที่เป็นด้านขาออกของแก๊สวางอยู่ด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 3.10 ประกอบส่วนของเทอร์โมคัปเปิล ท่อแก๊สเข้าและออกจากเซลล์เชื้อเพลิงและเตรียมทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป



รูปที่ 3.10 ลักษณะของการวางชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเอียงเป็นมุม 30 องศาของหน่วยทดสอบ



### 3.8.5.2 ขั้นตอนก่อนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

1. ตรวจสอบวาล์วควบคุมความดันหัวถังแก๊สให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. ตรวจสอบวาล์วขาเข้าของแก๊สแต่ละชนิดให้อยู่ในทิศทางที่ต้องการ เพื่อป้องกันการไหลผสมกันของแก๊สต่าง ๆ และวาล์วขาออกให้อยู่ในตำแหน่งปิด
3. ตรวจสอบสายนำแก๊ส ท่อนำแก๊สและข้อต่อต่าง ๆ ให้อยู่ในสภาพเรียบร้อย
4. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อจากขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองขั้วมายังเครื่อง Electronic load ให้พร้อมต่อการใช้งาน
5. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
6. เปิดเครื่องวัดอัตราการไหล เพื่ออุ่นเครื่องควบคุมอัตราการไหลก่อนทำการทดลองเป็นเวลา 15 นาที
7. เปิดเครื่อง Electronic load เพื่ออุ่นเครื่องก่อนทำการทดลองเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเลือกการใช้งานแบบ CV (Constant Voltage) กดปุ่ม Input off เพื่อให้เครื่องอยู่ในสถานะ disable
8. ตั้งค่าอัตราการไหลที่เครื่องวัดอัตราการไหล (0-2000 sccm) ตามตัวแปรที่ศึกษา ที่อัตราการไหลเริ่มต้น 200 sccm ของแก๊สทั้งสองชนิด
9. ก่อนทำการทดสอบ ควรป้อนแก๊สไนโตรเจนที่ไม่มีควมชื้นเข้าไปในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงประมาณ 15 นาที เพื่อเป็นการไล่สิ่งตกค้างที่อาจจะยังมีเหลืออยู่ในเซลล์ออกไป

### 3.8.5.3 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

1. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดวาล์วหัวถังของแก๊สที่ต้องการแล้วจึงปรับวาล์วควบคุมความดันที่หัวถัง 50 พีเอสไอ
2. เมื่อทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลเริ่มต้น 200 sccm ที่อัตราส่วนของแก๊สออกซิเจนต่อแก๊สไฮโดรเจนตามตัวแปรที่ศึกษา และปรับความดันในระบบที่ชุดควบคุมความดันย้อนกลับของแก๊สแต่ละชนิดให้ได้ตามตัวแปรที่ศึกษา และการให้ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิงตามตัวแปรที่ศึกษา รอจนกระทั่งค่าความ

ต่างศักย์ในขณะที่ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Open circuit voltage) คงที่ กดปุ่ม Input on ที่เครื่อง Electronic load แล้วจึงกดปุ่ม voltage ใส่ค่าความต่างศักย์ที่ต้องการดึงกระแสไฟฟ้า เริ่มบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้านั้น ๆ

#### 3.8.5.4 ขั้นตอนภายหลังการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

หลังการทดลองกดปุ่ม Input off ที่เครื่อง Electronic load แล้วปิดสวิทช์หลักที่เครื่อง Electronic load จากนั้นจึงทำขั้นตอนเช่นเดียวกับขั้นตอนหลังการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เดียวตามงานวิจัยที่ผ่านมา [12]

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาและทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบชั้นโดยการเตรียมและพัฒนาขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร ให้มีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกับขั้วอิเล็กโทรดขนาดเล็ก (5 ตารางเซนติเมตร) การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกทำการเตรียมและพัฒนาขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร จนได้ภาวะที่ให้สมรรถนะที่ดีที่สุด จากนั้นนำภาวะที่ได้มาทำการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร ให้มีสมรรถนะที่ดีหรือใกล้เคียงกับสมรรถนะของพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร ส่วนที่สองนำขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมได้สร้างเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจำนวน 3 ชั้น และนำไปทดสอบสมรรถนะโดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์คือ ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจน ความดันของระบบ และผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

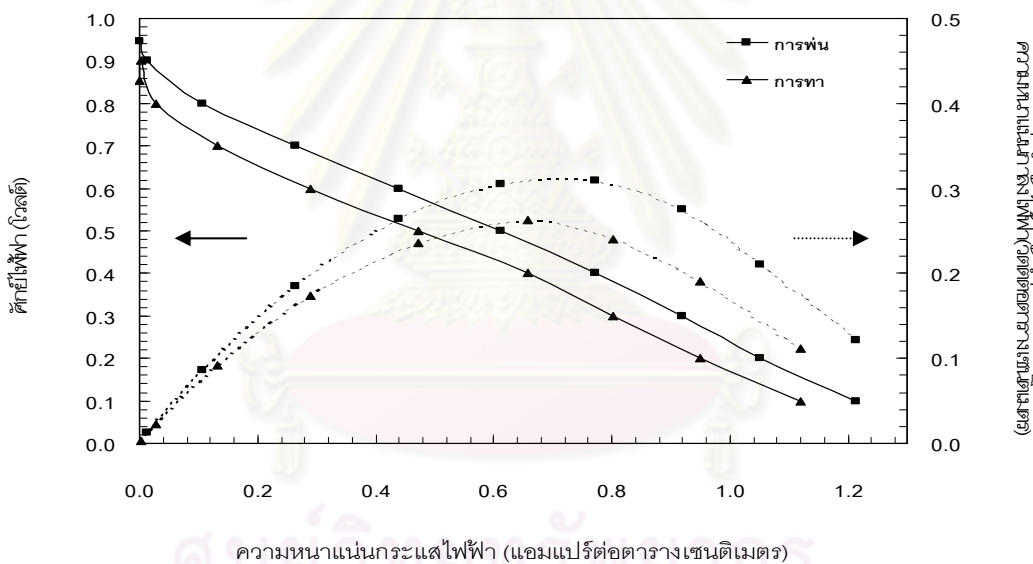
#### 4.1 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร

ในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยส่วนที่จะศึกษาประกอบด้วย

##### 4.1.1 ผลของเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด

การศึกษาผลของเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นแพร่แก๊ส เพื่อหาเทคนิคที่ให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีที่สุด ชั้นแพร่แก๊สที่ใช้ในการศึกษาคือ ผ้คาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ ทำการเปรียบเทียบเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาสองเทคนิคคือ เทคนิคการทาและเทคนิคการพ่นเนื่องจากเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ โดยทั่วไปทั้งสองเทคนิคจะใช้น้ำหมึกที่มีองค์ประกอบเหมือนกันแต่น้ำหมึกสำหรับเทคนิคการทาจะมีความหนืดสูงกว่าเทคนิคการพ่น เนื่องจากกาใส่ตัวทำละลายในปริมาณที่น้อยกว่า เทคนิคการพ่นจะใช้ปริมาณในการพ่นที่ค่าความดัน 20 พีเอสไอจี ทำการพ่นน้ำหมึกลงบนผ้คาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำและเทคนิคการทาจะใช้ฟุ้งกันเบอร์ 4 ในการทาน้ำหมึกลงบนผ้คาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำเช่นเดียวกัน ทั้งสองเทคนิคทำ

การควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่ 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงจะแสดงในรูปความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าหรือโพลาริเซชันของขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.1 ภาวะการทำงานคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนอัดตัวด้วยความชื้น 100 sccm (0.0044 โมล/นาที่) อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ พบว่าในช่วงของความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง เทคนิคการพ่นจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเทคนิคการทา ซึ่งการสูญเสียในช่วงนี้เกิดมาจากผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรด โดยเทคนิคการพ่นมีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.945 โวลต์ และเทคนิคการทามีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.854 โวลต์



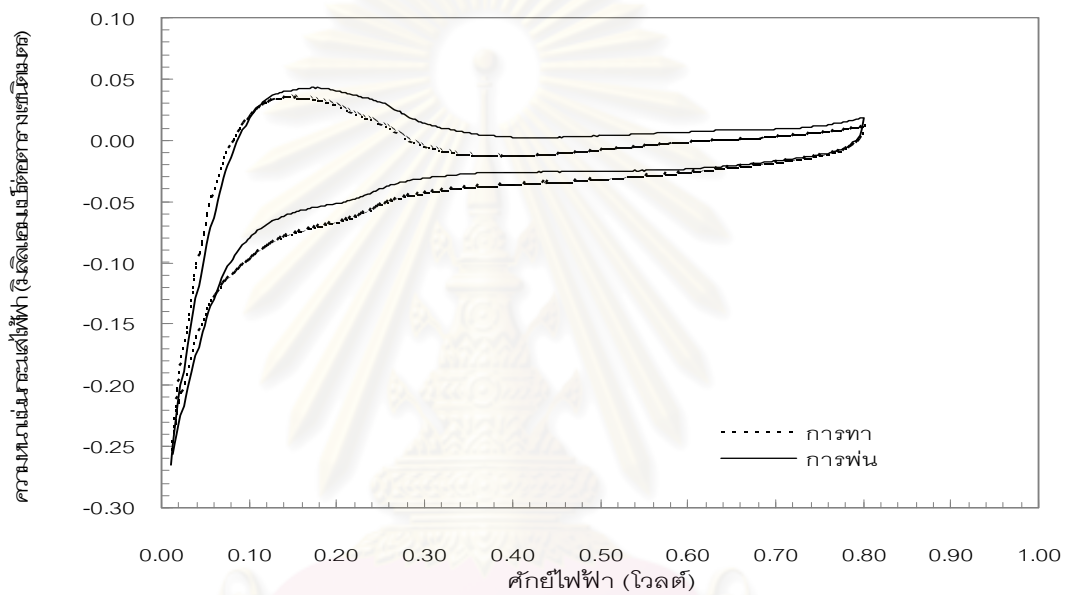
รูปที่ 4.1 โพลาริเซชันของเอ็มเอเปรียบเทียบเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ

อาจเนื่องมาจากเทคนิคการพ่นมีป็นลมที่ใช้ควบคุมแรงดันในการพ่นทำให้น้ำหมึกที่พ่นมีความสม่ำเสมอทำให้การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดดี และเทคนิคการพ่นทำให้พื้นผิวที่ได้มีความขรุขระซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มความเป็นรูพรุนและพื้นผิวในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรด [23] และเพิ่มพื้นที่สัมผัสของ 3 เฟสให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลให้การแพร่ของแก๊สเชื้อเพลิงง่ายมีความต่อเนื่องมากขึ้น อีกทั้งการใช้แรงดันในการพ่นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกาะตัวบนเส้นใยคาร์บอนได้ดีกว่าเทคนิคการทาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกาะตัวอยู่บนพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด จึงทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยเฉพาะในช่วงของการสูญเสียของการเกิดปฏิกิริยาเคมีดีกว่าเทคนิคการทาที่ใช้พู่กันในการทาน้ำหมึกลงบนขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งไม่สามารถควบคุมแรงและปริมาณน้ำหมึกที่ใช้ในการทาลงบนขั้วอิเล็กโทรดในแต่ละครั้งให้มีปริมาณที่แน่นอนได้ จึงทำให้เกิดความหนาไม่สม่ำเสมอทั่วกันของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาเฉลี่ยของขั้วอิเล็กโทรดของเทคนิคการทาและเทคนิคการพ่นอยู่ที่  $0.457 \pm 0.042$  และ  $0.445 \pm 0.025$  มิลลิเมตร ตามลำดับ และการทาน้ำหมึกยังทำให้พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดมีความราบเรียบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีความหนาซึ่งไม่เหมาะต่อการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สเชื้อเพลิง พื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยานี้น้อยทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงน้อยกว่าเทคนิคการพ่น ผลการทดลองในรูปที่ 4.1 แสดงโพลาริแกรมของขั้วอิเล็กโทรดเปรียบเทียบเทคนิคการพ่นและเทคนิคการทาที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ เทคนิคการทาและเทคนิคการพ่นจะให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.29 และ 0.44 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจากการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า เทคนิคการพ่นและเทคนิคการทามีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 25.31 และ 17.63 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

ผลการทดลองที่ผ่านมายังสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 4.3 เป็นภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 35 และ 50 เท่า สำหรับเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันทำการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ พบว่าการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาของเทคนิคการทาจะมีลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความหนาและมีความไม่สม่ำเสมอ ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จะมีความหนาปกคลุมผ้าคาร์บอนจนหมดไม่สามารถมองเห็นเส้นใยคาร์บอนได้ และพื้นผิวยังมีความราบเรียบซึ่งอาจทำให้พื้นที่การทำปฏิกิริยาของแพลทินัลดลง เนื่องจากพื้นผิวที่มีความเรียบมีความเป็นรูพรุนของชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงทำให้ความเชื่อมโยงกันของ 3 เฟสน้อย แก๊สเชื้อเพลิงจึงแพร่ผ่านพื้นผิวไปทำปฏิกิริยาได้ลดลง สมรรถนะที่ได้จึงมีค่าน้อย สำหรับเทคนิคการพ่นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกาะตัว

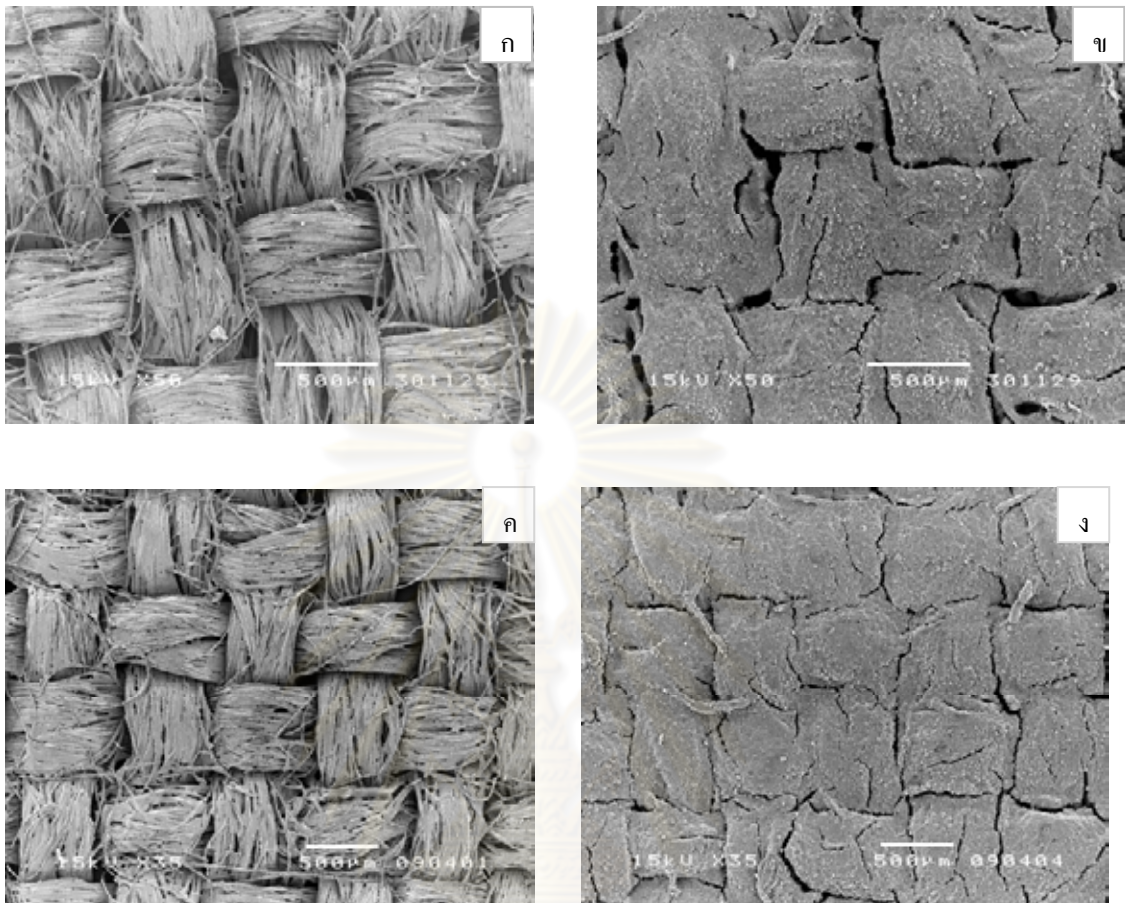


อยู่ที่เส้นใยคาร์บอนทำให้ความเป็นรูปทรงของพื้นผิวมาก การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาดี ชั้น  
 แพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีความขรุขระทำให้มีความเป็นรูปทรงมากแก๊สจึงสามารถแพร่ผ่าน  
 มาเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันของ 3 เฟสเกิดได้ดีเทคนิคการพ่นจึงให้ค่า  
 สมรรถนะของเซลล์ที่ดีกว่า ดังนั้นในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดจะเลือกใช้  
 เทคนิคการพ่นในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดต่อไป



รูปที่ 4.2 ไซคลิกโวลแทมเมตรีของการเปรียบเทียบเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบน  
 ขั้วอิเล็กโทรด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



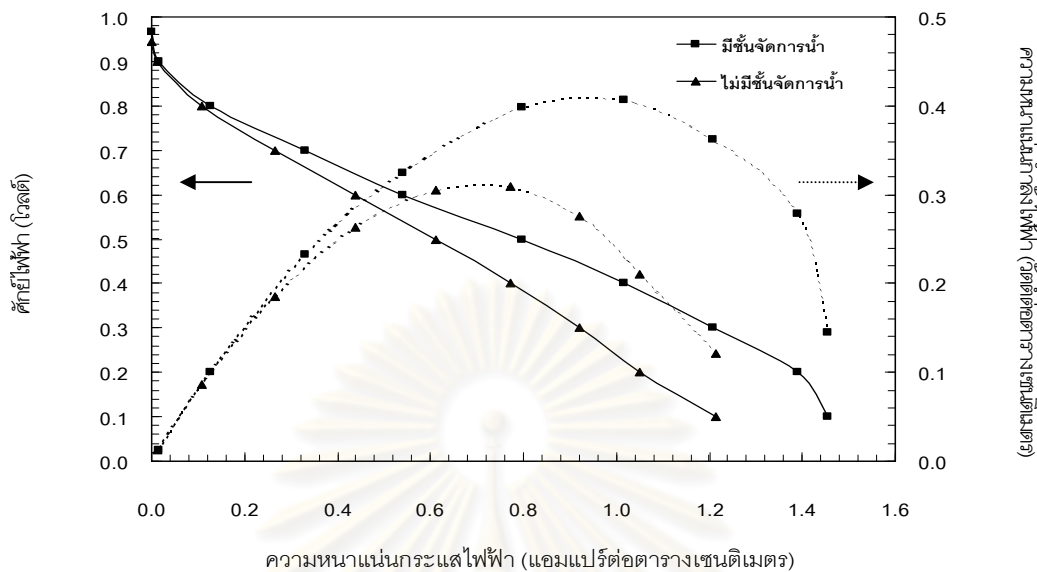
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM สำหรับเทคนิคการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันบนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) เทคนิคการพัน และ (ข) เทคนิคการทา และที่กำลังขยาย 35 เท่า (ค) เทคนิคการพัน และ (ง) เทคนิคการทา

#### 4.1.2 ผลของชั้นจัดการน้ำบนขั้วอิเล็กโทรด

ชั้นจัดการน้ำเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา มีส่วนช่วยในการจัดการน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากมีสารละลายเทพลอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักภายในชั้นจัดการน้ำมีหมู่กรดซัลโฟนิกซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ สำหรับช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงจะมีปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามาก ทำให้น้ำไปอุดตันรูพรุนของชั้นแพร่แก๊สส่งผลให้การแพร่ผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงเกิดได้ไม่ดี แต่ความไม่ชอบน้ำของชั้นจัดการน้ำจะช่วยขับน้ำออกจากรูพรุนทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความชื้นที่เหมาะสมและช่วยให้กลไกการแพร่ของน้ำจากด้านแคโทดไปยังด้านแอโนดเกิดได้ดีทำให้การจัดการน้ำของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น [5] และองค์ประกอบที่สำคัญใน

ชั้นจัดการน้ำคือผงคาร์บอนจะช่วยเพิ่มความเป็นรูปทรงขนาดเล็กทำให้แก๊สแพร่กระจายได้ดีขึ้น แต่ชั้นจัดการน้ำจะทำให้ความหนาของขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น โดยความหนาที่เหมาะสมของชั้นจัดการน้ำจะช่วยลดปัญหาในเรื่องการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานผิวสัมผัสและเพิ่มค่าสมรรถนะที่ดีของเซลล์เชื้อเพลิง [24]

ในการทดลองทำการเตรียมชั้นจัดการน้ำโดยใช้เทคนิคการทำที่มีปริมาณคาร์บอน 2.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณสารละลายเทฟลอนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดยเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่นที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ชั้นแพร่แก๊สที่ใช้คือ ผงคาร์บอน ที่ภาวะการทำงานคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนอัดตัวด้วยความดัน 100 sccm อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ผลการศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยเปรียบเทียบขั้วอิเล็กโทรดที่มีและไม่มีชั้นจัดการน้ำ พบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่มีชั้นจัดการน้ำจะให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีกว่าไม่มีชั้นจัดการน้ำ โดยเฉพาะในช่วงของการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานเนื่องจากสารละลายเทฟลอนที่เป็นองค์ประกอบในชั้นจัดการน้ำมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำจะช่วยในการขับน้ำออกจากขั้วอิเล็กโทรดไม่ให้เกาะตามรูปทรงของชั้นแพร่แก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไม่ไปบดบังพื้นที่เกิดปฏิกิริยา และช่วยในการกระจายแก๊สให้แพร่ได้สม่ำเสมอและดีขึ้นเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังช่วยในการรักษาความชื้นในชั้นแพร่แก๊สทำให้ไม่เกิดปัญหาน้ำท่วมเซลล์เชื้อเพลิงอีกด้วย โดยเฉพาะในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงซึ่งเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดได้ดี จึงทำให้การมีชั้นจัดการน้ำบนขั้วอิเล็กโทรดให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ เมื่อเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ การมีและไม่มีชั้นจัดการน้ำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.54 และ 0.44 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นในการศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ปัจจัยต่าง ๆ จะทำการเตรียมชั้นจัดการน้ำบนขั้วอิเล็กโทรดก่อนการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดี



รูปที่ 4.4 โพลาริเซชันของเอ็มอีเอเปรียบเทียบผลของการมีและไม่มีชั้นจัดการน้ำ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอน เทคนิคการพ่น ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.1.3 ผลของปริมาณเนฟออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

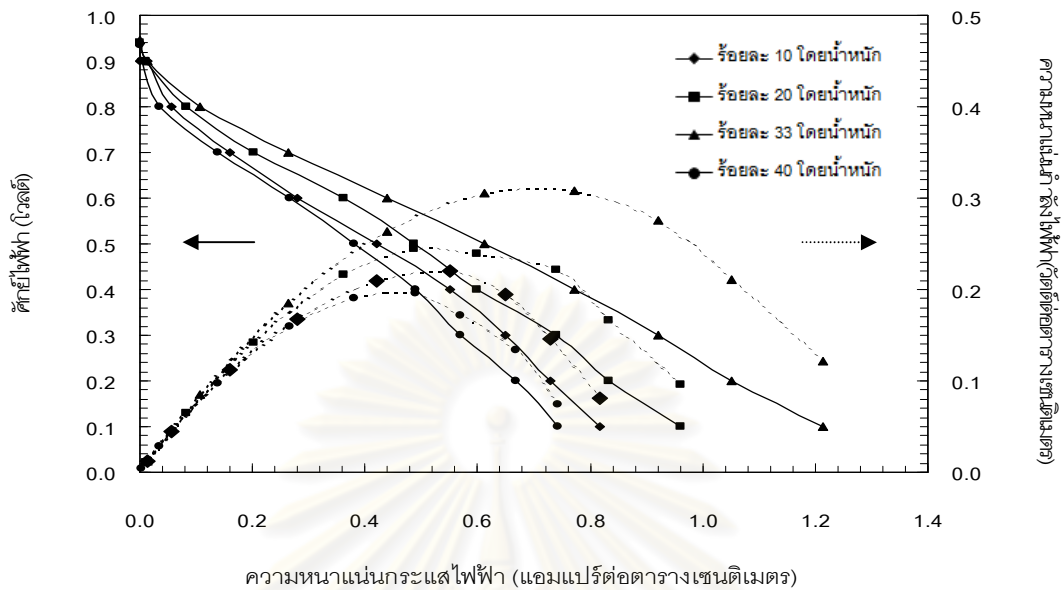
เนฟออนไอโอโนเมอร์ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มพื้นที่สัมผัสกันของ 3 เฟส คือ แก๊สเชื้อเพลิง อิเล็กโทรไลต์ และตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ดังนั้นปริมาณเนฟออนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงจำเป็นต่อสมรรถนะที่ดีของเซลล์เชื้อเพลิง [7] ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษหาปริมาณเนฟออนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดที่มีปริมาณเนฟออนระหว่างร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก ทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น ชั้นแพร่แก๊สที่ใช้คือ ผ้าคาร์บอน และทำการเปรียบเทียบทั้งขั้วอิเล็กโทรดที่มีและไม่มีชั้นจัดการน้ำที่ภาวะการทำงานของเซลล์คือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนอัดตัวด้วยความชื้น 100 sccm อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ

โพลาริเซชันเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 4.5 สำหรับการเปลี่ยนปริมาณเนฟออนต่าง ๆ ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ พบว่าปริมาณเนฟออนบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าสมรรถนะที่ดีที่สุดคือร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก โดย



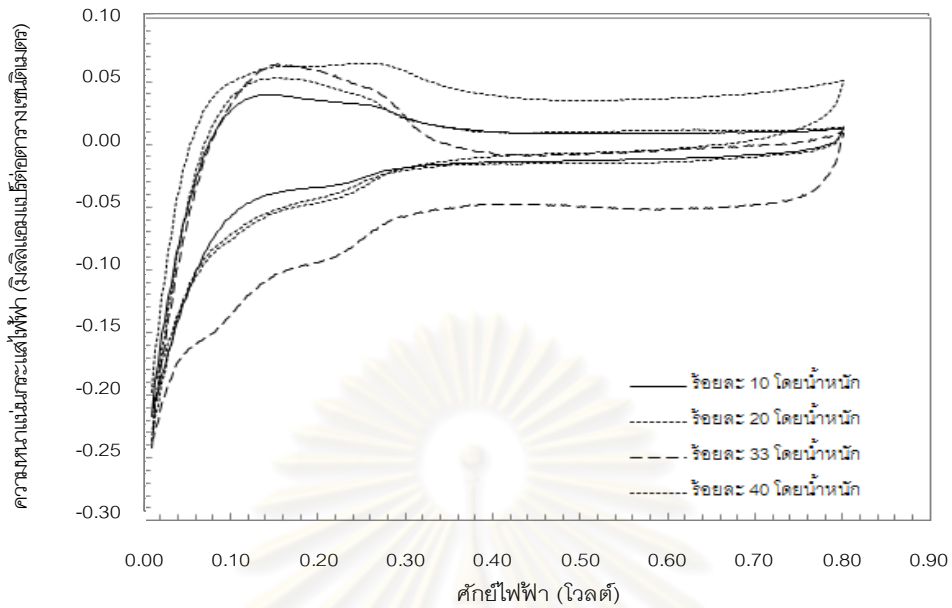
ปริมาณเนฟิออนที่น้อยเกินไปคือที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก อาจทำให้การเชื่อมต่อกันของ 3 เฟสเกิดได้ไม่ต่อเนื่องมีผลอย่างมากต่อช่วงการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานเพราะเกิดความต้านทานการเคลื่อนที่ของโปรตอนสูง เนื่องจากปริมาณเนฟิออนไม่เพียงพอต่อการเชื่อมต่อกันของ 3 เฟส ทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเกิดได้ไม่ต่อเนื่อง ปฏิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้ไม่สมบูรณ์ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง และที่ปริมาณเนฟิออนที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ปริมาณเนฟิออนมีมากเกินไปเนฟิออนไปบดบังพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิริยาและรูพรุนของขั้วอิเล็กโทรดทำให้การขนส่งแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าลดลง แก๊สเชื้อเพลิงไม่สามารถผ่านเข้าไปทำปฏิริยาแตกตัวบนตัวเร่งปฏิริยาแพลทินัมได้ และเกิดความต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนปฏิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้น้อยส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง [25] และเมื่อทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิริยาของปริมาณเนฟิออนต่าง ๆ ในชั้นตัวเร่งปฏิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ (รูปที่ 4.6) พบว่า ปริมาณเนฟิออนร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิริยามากที่สุดเท่ากับ 54.07 ตารางเมตรต่อกรัม สอดคล้องกับสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีค่าสูงสุดและที่ร้อยละ 10, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก จะมีค่าพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิริยาเท่ากับ 33.92, 40.95 และ 27.54 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกราฟโพลาริเซชัน ดังนั้นปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือที่ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ปริมาณเนฟิออนร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก บนขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.44 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (รูปที่ 4.5) ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sasikumar และคณะ [7] ทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณเนฟิออนร้อยละ 10-33 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ชั้นแพร่แก๊สที่ใช้คือ กระจกคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ เนฟิออนเมมเบรน 115 พบว่าปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมคือร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เช่นกัน ที่ภาวะการทำงานของเซลล์ต่างกันคือ แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนอิ่มตัวด้วยความชื้น อุณหภูมิของเซลล์ 80 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ให้ค่าสมรรถนะที่สูงสุดเท่ากับ 0.51 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในงานวิจัยนี้ปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิริยาคือร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก บนผ้าคาร์บอน



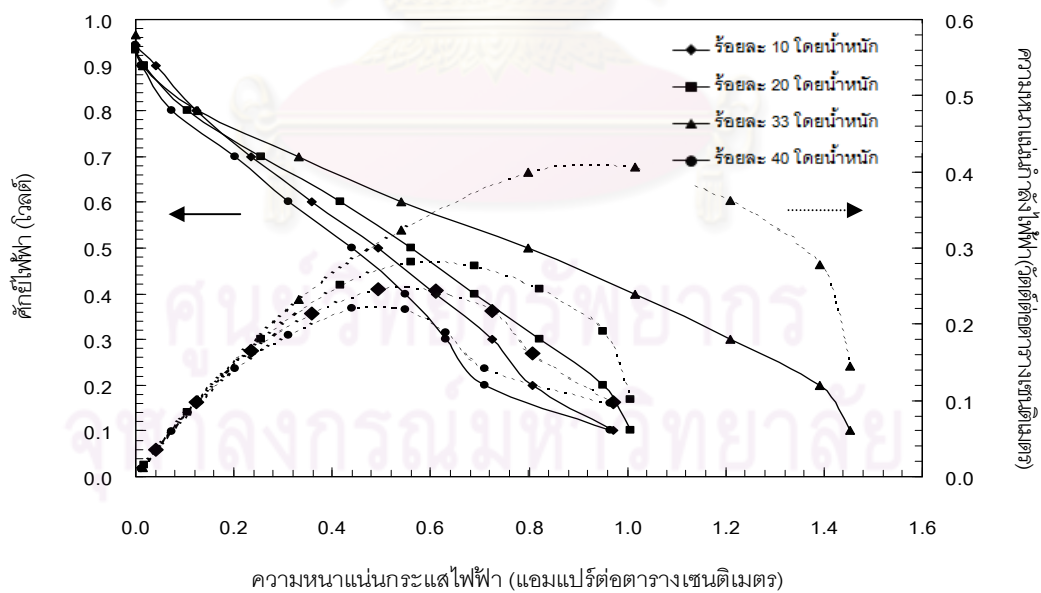


รูปที่ 4.5 โพลาริเซชันของเอมีเอที่มีปริมาณเนฟออนต่าง ๆ ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา บนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเนฟออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดที่มีชั้นจัดการน้ำ ที่ปริมาณเนฟออนร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่นบนผ้าคาร์บอน ที่ภาวะการทำงานเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าปริมาณเนฟออนที่ให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีที่สุดคือร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก กราฟโพลาริเซชันมีแนวโน้มเดียวกันเช่นกับการเปรียบเทียบปริมาณเนฟออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ ดังนั้นภาวะในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมคือ ปริมาณเนฟออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก บนขั้วอิเล็กโทรดที่มีชั้นจัดการน้ำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.54 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์



รูปที่ 4.6 ไซคลิกโวลแทมเมตรีของการเปรียบเทียบปริมาณเนฟิออนต่าง ๆ ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ

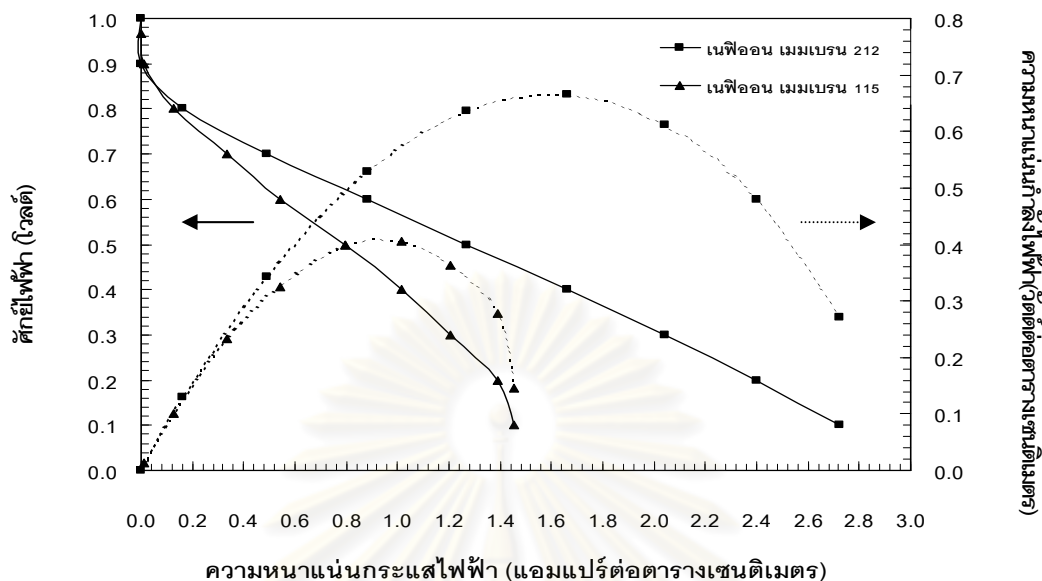


รูปที่ 4.7 โพลาริเซชันของเอ็มอีที่มีปริมาณเนฟิออนต่าง ๆ ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา บนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น

#### 4.1.4 ผลของชนิดของเมมเบรน

เมมเบรนหรืออิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มมีหน้าที่ผ่านโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยเมมเบรนที่มีความหนาต่างกันจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติในการนำโปรตอน ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบชนิดของเมมเบรน 2 ชนิดคือ เนฟลอนเมมเบรน 115 คือที่ความหนาของเมมเบรน 127 ไมโครเมตร Equivalent Weight (EW) เท่ากับ 1100 [1] และเนฟลอนเมมเบรน 212 คือที่ความหนาของเมมเบรน 50 ไมโครเมตร EW เท่ากับ 2100 [1] โดยทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น ชั้นแพร่แก๊สที่ใช้คือ ฝ้ายคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ในขั้นตอนการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนจะทำการอัดประกอบขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้กับชนิดของเมมเบรนที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ทำการทดสอบที่ภาวะการทำงานคือ อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนอัดตัวด้วยความชื้น 100 sccm อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ

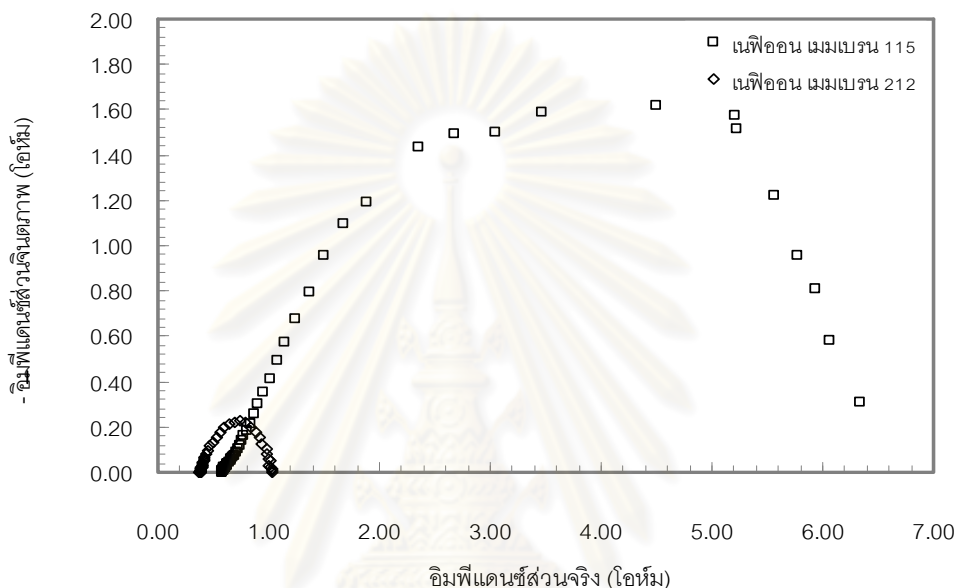
ผลการศึกษสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงในรูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ชนิดของเมมเบรนต่างกัน พบว่า เนฟลอนเมมเบรน 212 ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่าโดยเฉพาะช่วงการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ของเนฟลอนเมมเบรน 212 และ 115 เท่ากับ 0.88 และ 0.54 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากเมมเบรนที่มีความบางจะลดปัญหาในการเกิดเซลล์แห้งของด้านแอโนดจากผลของแรงลากออสโมติก (Electro-osmotic drag) และลดความต้านทานในการส่งผ่านการเคลื่อนที่ของโปรตอนทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้ง่าย โดยเมมเบรนที่มีความบางจะทำให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอนน้อยลง โปรตอนจึงสามารถแพร่ผ่านมาเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้ดีขึ้น ในส่วนของเนฟลอนเมมเบรน 115 จะส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนมาก เนื่องจากเมมเบรนที่มีความหนาโปรตอนจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้น้อย และยังเกิดปัญหาในเรื่องการแพร่ย้อนกลับของน้ำในด้านแอโนดไม่เพียงพอกับแรงลากออสโมติกสมรรถนะที่ได้จึงมีค่าลดลง [5, 26]



รูปที่ 4.8 โพลาริเซชันของเอมไอเอทีชนิดของเมมเบรนต่างกัน ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น ปริมาณเนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก บนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติอิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยทำการทดสอบที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.8 โวลต์ โดยใช้โปรแกรม Frequency response analyzer, FRA ในการควบคุม จากรูปที่ 4.9 พบว่า เนฟิออนเมมเบรน 115 และ 212 มีความต้านทานทางไฟฟ้าเท่ากับ 0.59 และ 0.39 โอห์ม ตามลำดับ เนื่องจากเนฟิออนเมมเบรน 212 มีความบางกว่าเนฟิออนเมมเบรน 115 ส่งผลให้โปรตอนสามารถถ่ายโอนได้สะดวก ซึ่งสอดคล้องกับกราฟโพลาริเซชันจากรูปที่ 4.8 แต่ที่ค่าความต่างศักย์ในช่วงค่าสูง ซึ่งการสูญเสียที่เกิดขึ้นจะเกิดจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ถ้าระบบมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสมรรถนะที่ได้จะมีค่าสูงตามไปด้วย โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน หรือลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา จากกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.8 พบว่าที่ค่าความต่างศักย์ประมาณ 0.8 โวลต์ เนฟิออนเมมเบรน 212 จะมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเนฟิออนเมมเบรน 115 เล็กน้อย และจากกราฟ Nyquist plot รูปที่ 4.9 มีการสูญเสียเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเนฟิออนเมมเบรน 115 สูงมากกว่า อาจเนื่องมาจากการทดสอบอิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้าทำการทดสอบหลังจากกราฟโพลาริเซชันเป็น

เวลานานทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีสมรรถนะลดลง โดยในการเตรียมหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงเนฟิออนเมมเบรน 212 เกิดการฉีกขาดได้ง่าย จึงไม่เหมาะสมต่อการสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนเพื่อใช้ในการสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง เมมเบรนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมคือ เนฟิออนเมมเบรน 115



รูปที่ 4.9 กราฟ Nyquist plot จากการทดสอบอิมพีแดนซ์ของขั้วไฟฟ้าประกอบเยื่อแผ่นที่ชนิดของเมมเบรนต่างกันที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์

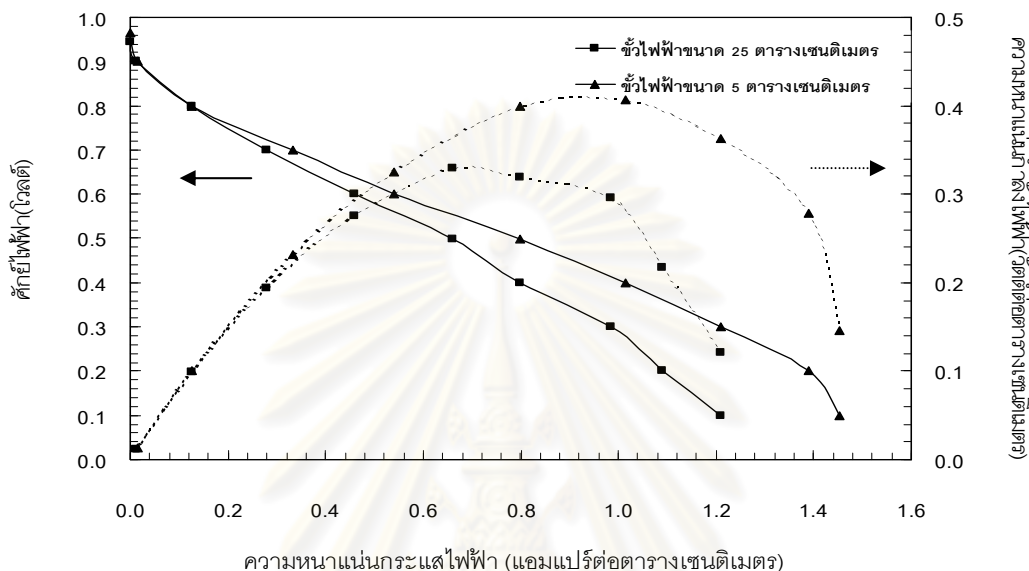
#### 4.2 ผลของการขยายขนาดขั้วอิเล็กโทรด

จากผลการปรับปรุงสมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร พบว่าชั้นแพร์แก๊สที่ใช้คือผ้าคาร์บอน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่นบนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ปริมาณเนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก และเมมเบรนที่ใช้คือ เนฟิออนเมมเบรน 212 จากภาวะดังกล่าวจะให้ค่าสมรรถนะที่ดีและเหมาะสมต่อการนำไปสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นจึงนำภาวะที่ได้มาทำการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะ โดยทำการทดสอบที่ภาวะการทำงานคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนอิมพัลส์ด้วยความเร็ว 100 sccm อุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ



ผลการศึกษาสสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังโพลาริเซชันรูปที่ 4.10 โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน พบว่าการขยายขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร มีสมรรถนะที่ต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร ประมาณร้อยละ 24 โดยที่ขั้วอิเล็กโทรดขนาด 25 ตารางเซนติเมตร ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.46 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และขั้วอิเล็กโทรดขนาด 5 ตารางเซนติเมตรให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.54 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ทั้งนี้การเตรียมขั้วอิเล็กโทรดขนาดใหญ่จะเกิดความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าจึงทำให้สมรรถนะที่ได้มีค่าลดลง โดยเฉพาะในช่วงของการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน อาจเนื่องมาจากการอัดประกอบขั้วอิเล็กโทรด ประกอบเมมเบรนด้วยความร้อนมีค่าแรงอัดประกอบไม่เพียงพอที่จะทำให้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วและเนฟลอนเมมเบรนประกบกันสนิท ทำให้เกิดช่องว่างส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อนำขั้วอิเล็กโทรดขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร ที่เตรียมโดยผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก ทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยการใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ (Array fuel cell) กราฟโพลาริเซชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้างดรูปที่ 4.11 ทำการตัดขั้วอิเล็กโทรดเป็นวงกลมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.71-0.72 ตารางเซนติเมตร จำนวน 16 ชิ้น เรียงตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงจำนวน 4 แถว แถวละ 4 ช่อง แสดงดังรูปที่ 4.12 และอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร อัดประกอบด้วยความร้อนกับเนฟลอนเมมเบรน 115 ขนาด 12×12 ตารางเซนติเมตร และทำการทดสอบสมรรถนะที่ภาวะการทำงาน อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนอัดด้วยความชื้น 200 sccm และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนอัดด้วยความชื้น 1000 sccm ตามคู่มือการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ (Array fuel cell) คุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ พบว่าในแต่ละตำแหน่งของขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้ให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ไม่เท่ากันจึงทำให้เห็นว่าการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่มีความไม่สม่ำเสมอในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้สมรรถนะที่ได้มีค่าน้อยกว่าขั้วอิเล็กโทรดที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดเล็ก อีกทั้งการอัดประกอบด้วยความร้อนตามภาวะที่ใช้กับพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดขนาดเล็กอาจไม่เหมาะสมกับขั้วอิเล็กโทรดขนาดใหญ่จึงทำให้เกิดความต้านทานผิวสัมผัสที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การเตรียมขั้ว

อิเล็กโตรดขนาดใหญ่ขึ้นอาจทำให้การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ดีพอ ดังนั้นจึงได้นำขั้วอิเล็กโตรดทั้งสองไปทำการตรวจสอบสภาพพื้นผิวแสดงดังรูปที่ 4.13

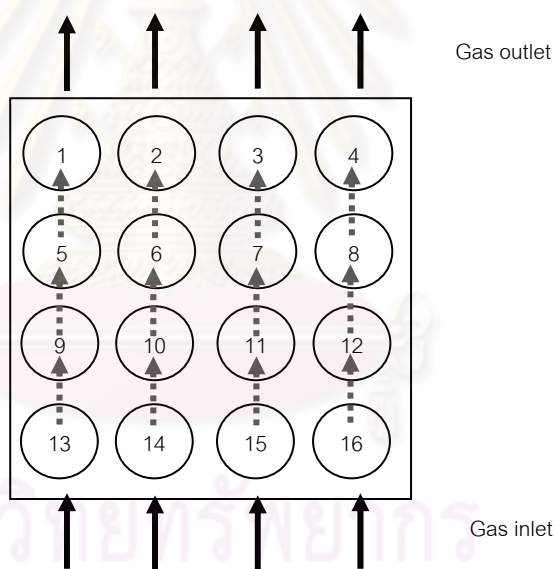


รูปที่ 4.10 โพลาริเซชันของเอ็มอีเอเนื่องจากผลของการขยายขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโตรด ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เทคนิคการพ่น ปริมาณเนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก บนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ เนฟิออนเมมเบรน 115

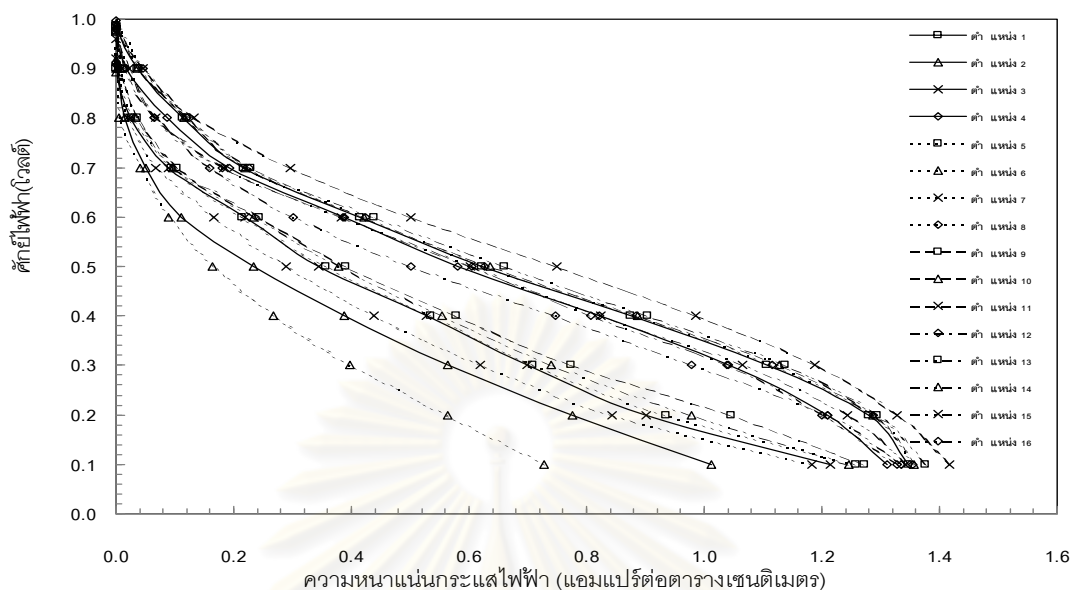
จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโตรด จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDX ของเอ็มอีเอที่ใช้ในการอัดประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแกวลำดับที่ตำแหน่ง 1, 4, 6, 11, 13 และ 16 ที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโตรด 25 ตารางเซนติเมตร โดยพบว่าในแต่ละตำแหน่งของเอ็มอีเอมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโตรดที่ใกล้เคียงกัน โดยตำแหน่งที่ 6 และ 11 ซึ่งเป็นตำแหน่งตรงกลางของเอ็มอีเอมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (0.58 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) มากกว่าบริเวณตำแหน่งขอบของเอ็มอีเอ (0.54-0.55 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) เนื่องจากในตำแหน่งตรงกลางของเอ็มอีเอมีพื้นที่ทำปฏิกิริยาขนาดใหญ่ทำให้ต้องพ่นน้ำหมึกซ้ำบริเวณที่เดิมหลายครั้ง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาบริเวณตรงกลางมีปริมาณมากกว่าตำแหน่งอื่น ดังนั้นแต่ละตำแหน่งของเอ็มอีเอจึงมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDX

ตำแหน่ง	%Pt element	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ด้วยวิธี SEM-EDX (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
1	14.93	0.55
4	14.99	0.55
6	15.71	0.58
11	15.79	0.58
13	14.64	0.54
16	14.68	0.54



รูปที่ 4.11 ลักษณะการจัดวางตำแหน่งจำนวน 16 ตำแหน่งของเอมีเอที่ใช้ในการอัดประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบแกวลำดับที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.12 โพลาริเซชันของขั้วอิเล็กโทรดที่มีชั้นจัดการน้ำโดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบแกวลำดับ ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร เปรียบเทียบ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของขั้วอิเล็กโทรด ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเนฟออนร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เทคนิคการพ่นในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 35 และ 50 เท่า สำหรับผลการศึกษาการขยายขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด ทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนผ้าคาร์บอนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ พบว่าลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนผ้าคาร์บอนที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกว่าเมื่อเทียบกับขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจะมีลักษณะเกาะตัวกันเป็นก้อน เนื่องจากในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ทำให้การพ่นน้ำหมึกมีปริมาณไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่งของขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้ในบางบริเวณมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมเกาะอยู่มากจึงทำให้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดความไม่สม่ำเสมอ และการที่พื้นที่ทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่จึงต้องใช้น้ำหมึกในปริมาณมากเพื่อให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนผ้าคาร์บอนเท่ากับที่ต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพ่นน้ำหมึกซ้ำหลายครั้งซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4.13 (ข) ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกาะอยู่บนผ้าคาร์บอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในปริมาณที่ไม่เท่ากัน ซึ่ง



สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM-EDX ที่บ่งบอกว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบริเวณกึ่งกลางของซั้วอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าที่สูงกว่าบริเวณขอบของซั้วอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM สำหรับผลการศึกษากายขยายขนาดพื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำ ที่กำลังขยาย 50 เท่า (ก) พื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 5 ตารางเซนติเมตร และ (ข) พื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 25 ตารางเซนติเมตร และที่กำลังขยาย 35 เท่า (ค) พื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 5 ตารางเซนติเมตร และ (ง) พื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 25 ตารางเซนติเมตร



เมื่อทำการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของซั้วอิเล็กทรอนิกส์ประกอบเมมเบรนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำที่ขนาดพื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 5 และ 25 ตารางเซนติเมตร จากการวิเคราะห์รูปถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 100 เท่า จากรูปที่ 4.14 พบว่าซั้วอิเล็กทรอนิกส์ประกอบเมมเบรนที่ขนาดพื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 5 ตารางเซนติเมตร จะมีระยะห่างระหว่างตัวผ้าคาร์บอนและเนฟลอนเมมเบรนน้อยกว่าทำให้ความต้านทานผิวสัมผัสระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและเมมเบรนมีค่าน้อยแต่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ประกอบเมมเบรนที่ขนาดพื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 25 ตารางเซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและเนฟลอนเมมเบรนที่มากทำให้เกิดความต้านทานผิวสัมผัสที่สูงกว่า ดังกราฟโพลาริเซชันรูปที่ 4.10 ที่เกิดการสูญเสียในช่วงความต้านทานที่สูงดังนั้นการขยายขนาดของพื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าลดลง จึงควรทำการเพิ่มแรงอัดประกอบหน่วยซั้วอิเล็กทรอนิกส์ประกอบเมมเบรนให้มากขึ้นเพื่อลดระยะห่างระหว่างชั้นแพร่แก๊สและเนฟลอนเมมเบรน

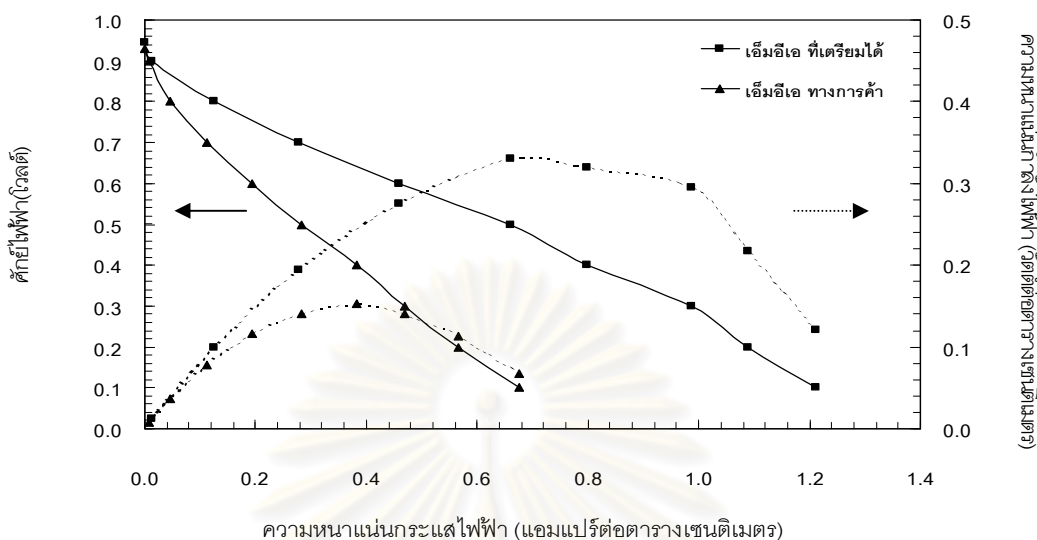


รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ภาคตัดขวางซั้วอิเล็กทรอนิกส์ประกอบเมมเบรนที่ไม่มีชั้นจัดการน้ำด้วยเครื่อง SEM สำหรับผลการศึกษาการขยายขนาดพื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ (ก) พื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 5 ตารางเซนติเมตร และ (ข) พื้นที่ซั้วอิเล็กทรอนิกส์ 25 ตารางเซนติเมตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบซั้วอิเล็กทรอนิกส์ประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ เทคนิคการพ่นบนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เมมเบรนที่ใช้คือ เนฟลอนเมมเบรน 115 ที่ความหนาของเมมเบรน 127 ไมโครเมตร กับ

ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้าของบริษัท Electrochem Inc. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอนที่ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร เนฟิออนเมมเบรน 117 ที่ความหนาของเมมเบรน 183 ไมโครเมตร ภาวะการทำงานเดียวกันคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนอัดตัวด้วยความขึ้น 100 sccm อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ผลการศึกษาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังโพลาริเซชันเปรียบเทียบชนิดของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนรูปที่ 4.15 พบว่าสมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ให้ค่าสมรรถนะที่สูงกว่าขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้และขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้าให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.46 และ 0.19 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้าใช้กระดาษคาร์บอนเป็นชั้นแพร่แก๊สซึ่งมีความเป็นรูพรุนน้อยกว่าผ้าคาร์บอน [27] พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาน้อยทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้น้อยกว่า และขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้าใช้เนฟิออนเมมเบรน 117 ซึ่งมีความหนามากกว่าขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ที่ใช้เนฟิออนเมมเบรน 115 ทำให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของโปรตอนสูง โดยดูได้จากกราฟโพลาริเซชันช่วงของการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานที่ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้าเกิดการสูญเสียที่มาก และการเก็บรักษาที่ระยะเวลาานานของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้าทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมประสิทธิภาพสมรรถนะที่ได้มีค่าลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 โพลาริเซชันของซั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนขนาด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ เทคนิคการพ่น บนผ้าคาร์บอน เนฟลอนเมมเบรน 115 ไมเมนต์การอัด 40 ปอนด์แรง นิ้ว กับซั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน

#### 4.3 การสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาด 25 ตารางเซนติเมตร

ในการนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้งานต้องการค่ากำลังไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ในงานส่วนที่สามของงานวิจัยนี้ทำการสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจำนวน 3 ชั้น โดยนำภาวะที่ได้จากการปรับปรุงสมรรถนะของซั้วอิเล็กโทรดที่ขนาดพื้นที่ซั้วอิเล็กโทรด 5 ตารางเซนติเมตร และทำการขยายขนาดเพื่อทำการสร้างเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ขนาดพื้นที่ซั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร จากผลการศึกษาพบว่าสมรรถนะของซั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนดีขึ้นเมื่อเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ เทคนิคการพ่นบนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ ร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เนฟลอนเมมเบรนที่ใช้คือ เนฟลอนเมมเบรน 212 แต่การนำเนฟลอนเมมเบรน 212 มาใช้พบปัญหาในเรื่องการฉีกขาดของเมมเบรนที่อัตราการใช้ของแก๊สเชื้อเพลิงสูง ดังนั้นจึงนำเนฟลอนเมมเบรน 115 ที่มีความหนามากกว่ามาใช้แทน และนำหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่

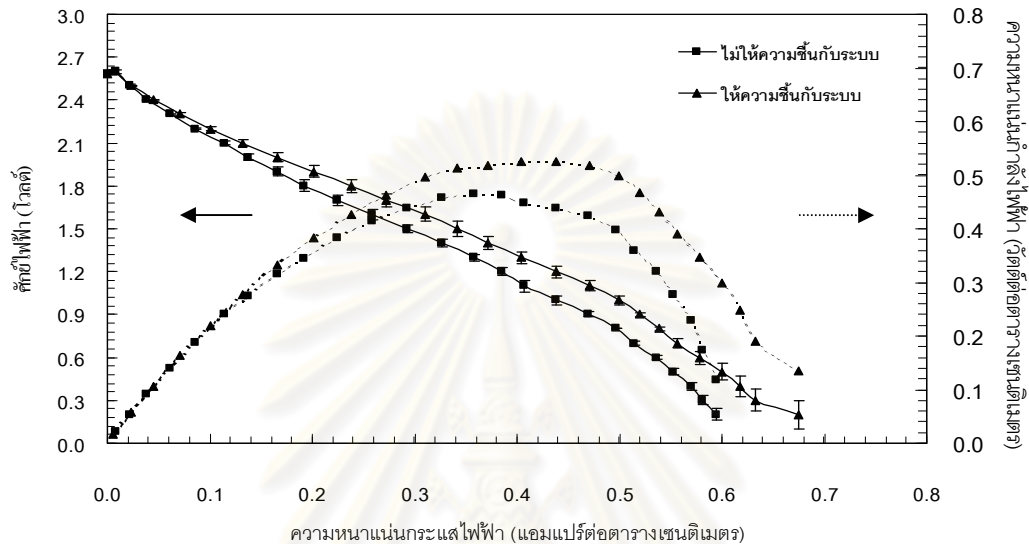
ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 เซลล์ที่สร้างขึ้นมาทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

#### 4.3.1 ผลของความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือ แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้จะผ่านหม้อให้ความชื้นที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส เพื่อให้ความชื้นแก่แก๊สเชื้อเพลิงที่ผ่านเข้าสู่ระบบ โดยความชื้นจากแก๊สเชื้อเพลิงจะส่งผลให้ระบบมีความชื้นเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ดังนั้นในส่วนนี้จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง โดยการให้และไม่ให้ความชื้นต่อแก๊สเชื้อเพลิง ทำการศึกษาที่ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ จำนวน 3 เซลล์ อุณหภูมิของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือ 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 200 sccm (0.0089 โมล/นาที่) และแก๊สไฮโดรเจน 200 sccm (0.0089 โมล/นาที่) โมเมนต์การอัด 50 ปอนด์แรง.นิ้ว โดยที่เลือกโมเมนต์การอัดดังกล่าวเนื่องจากโมเมนต์การอัด 40 ปอนด์แรง.นิ้ว ซึ่งเป็นแรงที่ใช้ในการอัดประกอบเซลล์เดี่ยวมีค่าการอัดที่น้อยเกินไปสำหรับการอัดชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทำให้แก๊สเชื้อเพลิงเกิดการรั่วไหลออกสู่ภายนอกทำให้เกิดอันตราย ผลของสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ แสดงดังโพลาริเซชันรูปที่ 4.16

จากรูปที่ 4.16 แสดงโพลาริเซชันเปรียบเทียบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้และไม่ให้ความชื้นต่อแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ พบว่า หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้ค่าความชื้นต่อแก๊สเชื้อเพลิงจะให้ค่าสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงกว่า เนื่องจากความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิงมีผลต่อการเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของระบบ [1] เพราะในระบบที่ไม่ป้อนความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ได้คือน้ำยังเกิดไม่มากทำให้เมมเบรนยังคงแห้งอยู่ส่งผลต่อความสามารถในการส่งผ่านของโปรตอนไม่ต่อเนื่องทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้ไม่ดี และเมมเบรนที่แห้งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แรงลากออสโมติก (Electro osmotic-drag) [18] แต่ในระบบที่ให้ความชื้นแก่แก๊สเชื้อเพลิงจะทำให้เมมเบรนมีความชุ่มชื้นของน้ำอยู่ เมมเบรนไม่เกิดการแห้งมากส่งผลให้ปรากฏการณ์แรงลากออสโมติกเกิดขึ้นได้ดี โปรตอนป้อนมายังขั้วแคโทดอย่างต่อเนื่อง [18-19, 29] ทำให้ภายในระบบมีสภาพเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.43 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.24 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์ ดังนั้นในการทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง จึงให้ความชื้นต่อแก๊สเชื้อเพลิงที่มีความชื้นอิ่มตัว



รูปที่ 4.16 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้และไม่ให้ค่าความชื้นแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอน โม่เมนต์การอัด 50 ปอนด์แรง.นิ้ว

#### 4.3.2 ผลของเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจน

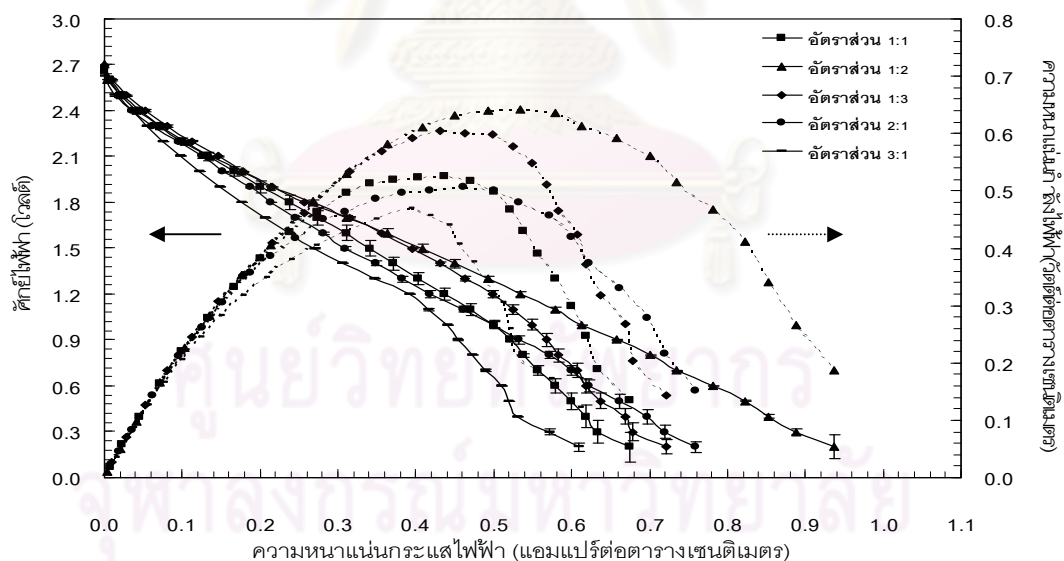
อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงควรจะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงภายในเซลล์เชื้อเพลิงโดยเฉพาะแก๊สออกซิเจนซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราของการเกิดปฏิกิริยาภายในระบบ ดังนั้นถ้าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในระบบมีค่าน้อยจะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าไม่ดี และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมจะสามารถลดปัญหาน้ำท่วมเซลล์ได้เนื่องจากแก๊สจะไล่ผลิตภัณฑ์น้ำที่เกิดขึ้นในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงไม่ให้เกิดการน้ำท่วมเซลล์ และอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงขึ้นกับขนาดของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ในการศึกษาหาอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมจะใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ โม่เมนต์การอัด 50 ปอนด์แรง.นิ้ว ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 เซลล์ อัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจนและ



แก๊สออกซิเจนเริ่มต้น คือ 200 sccm และเปรียบเทียบอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนอิมิตัวด้วยความชื้น 1:1 1:2 1:3 2:1 และ 3:1 ที่อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ

จากรูปที่ 4.17 แสดงโพลาริเซชันเปรียบเทียบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนที่อัตราส่วนต่าง ๆ อัตราส่วนที่ให้ค่าสมรรถนะดีที่สุดคือ ที่อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 1 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 2 ส่วน หรือที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 200 sccm (0.00089 โมล/นาที) และ แก๊สออกซิเจน 400 sccm (0.0178 โมล/นาที) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาด้านแคโทดที่มีแก๊สออกซิเจนเป็นสารออกซิแดนซ์จะเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าด้านแอโนด ดังนั้นจึงควรให้อัตราส่วนของแก๊สออกซิเจนมีค่ามากกว่า นอกจากนี้อัตราการไหลที่สูงยังสามารถช่วยในการผลักดันน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากด้านแคโทดออกจากเซลล์ [8, 21, 30-31] และการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนทำให้ปริมาณออกซิเจนที่จะเข้าทำปฏิกิริยามีมากขึ้นจึงไม่เกิดการขาดแคลนออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยา ดังจะเห็นได้จากสมรรถนะที่มีค่าดีตลอดช่วงของเส้นกราฟ และที่อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 1 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 3 ส่วน มีค่าสมรรถนะที่ช่วงศักย์ไฟฟ้าสูงใกล้เคียงกับอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 1 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 2 ส่วน แต่สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าลดลงโดยเฉพาะที่ช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง เนื่องมาจากอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนมีค่ามากทำให้น้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ถูกไล่ออกจากเซลล์ความชื้นของขั้วอิเล็กโทรดและเมมเบรนมีค่าลดลง ส่งผลให้เมมเบรนแห้งค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนมีค่าลดลงความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนมีค่าสูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียในช่วงของความต้านทานที่สูงกว่า และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแก๊สออกซิเจนทำให้แก๊สเชื้อเพลิงไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งให้สมรรถนะที่ได้มีค่าลดลง ที่อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 3 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 1 ส่วน จะเกิดการสูญเสียเนื่องจากความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนเนื่องจากปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนในระบบมีค่ามากกว่าปริมาณของแก๊สออกซิเจนมากอาจทำให้แก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนน้อยทำให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้าภายในระบบปริมาณน้อย และถูกใช้เรื่อย ๆ ในการเกิดปฏิกิริยาทำให้เหลือแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการนำน้ำออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาออกตันรูพรุนที่ขั้วอิเล็กโทรดหรืออาจทำให้เมมเบรนเกิดการบวมตัวสภาพการแลกเปลี่ยนโปรตอนลดลงซึ่งส่งผลต่อการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง ที่อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 2 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 1 ส่วน และที่อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 1 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 1 ส่วน ทั้งสองอัตราส่วนมีสมรรถนะของเซลล์

เชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 1 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 1 ส่วน มีค่าสมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงน้อยกว่าเนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สทั้งสองชนิดมีค่าน้อยทำให้ไม่สามารถได้น้ำที่เพิ่มขึ้นภายในระบบออกไปได้ จากการทดสอบพบว่าในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงแก๊สทั้งสองชนิดไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้น้อย และที่อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจน 2 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 1 ส่วน สมรรถนะของเซลล์จะมีค่าน้อยกว่าอาจเป็นผลมาจากปริมาณของแก๊สออกซิเจนในระบบมีค่าน้อยและถูกใช้หมดไปในการเกิดปฏิกิริยา อาจจะไม่เพียงพอต่อการนำน้ำออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงทำให้ค่าสมรรถนะที่ได้มีค่าน้อยกว่าที่อัตราส่วนอื่น โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1 ส่วน ต่อแก๊สออกซิเจน 2 ส่วน เท่ากับ 0.27 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.48 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์ ดังนั้นในการทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะเลือกใช้อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 2 ส่วน ในการศึกษาตัวแปรต่อไป



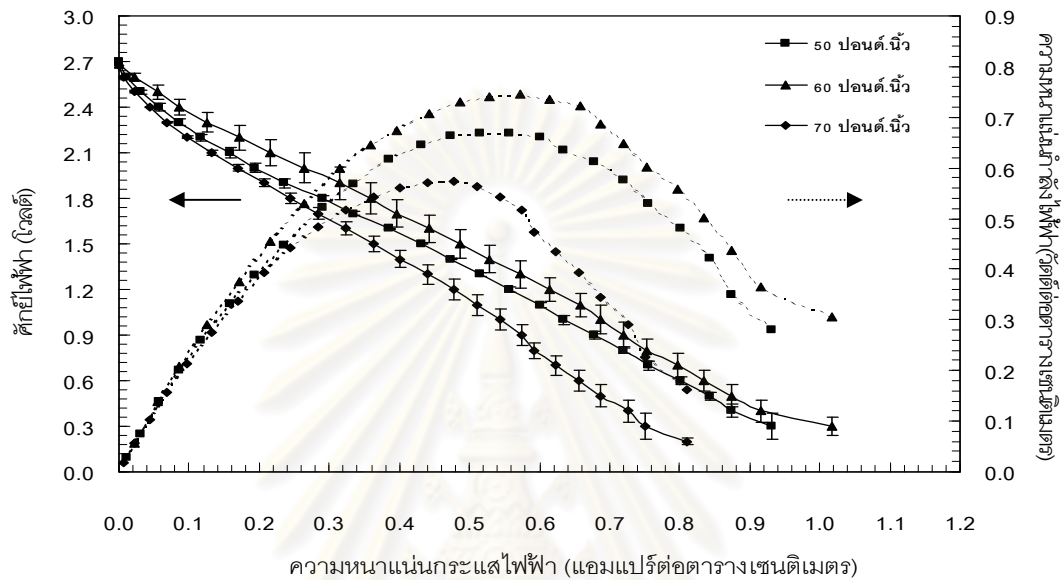
รูปที่ 4.17 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนอิมิตัวต่อแก๊สออกซิเจนอิมิตัวต่าง ๆ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรบนผ้าคาร์บอน โม่เมนต์การอัด 50 ปอนด์แรง.นิ้ว

#### 4.3.3 ผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

การออกแบบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและองค์ประกอบต่าง ๆ มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ค่าแรงอัดที่เหมาะสมช่วยป้องกันการรั่วไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและลดปัญหาการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานผิวสัมผัส แรงอัดประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีแรงเท่ากับแรงที่ต้องการในการอัดปะเก็น ชั้นของเซลล์เชื้อเพลิง และแรงภายใน [16] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแรงอัดที่เหมาะสมเพื่อให้สมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงดี ในการศึกษาหาโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะทำการอัดหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่โมเมนต์การอัด 3 ค่า คือ 50 60 และ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว ในการศึกษาจะใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 เซลล์ อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้น 1 ส่วน ต่อแก๊สออกซิเจนอิ่มตัวด้วยความชื้น 2 ส่วน ความดันบรรยากาศ

จากรูปที่ 4.18 แสดงโพลาริเซชันเปรียบเทียบผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าที่แรงโมเมนต์การหมุนที่ 50 และ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว สมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับที่แรงโมเมนต์การอัด 60 ปอนด์แรง.นิ้ว แต่แตกต่างกันในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากความต้านทาน โดยที่แรงโมเมนต์การอัด 60 ปอนด์แรง.นิ้วจะมีสมรรถนะที่ดีกว่าเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากที่แรงอัด 50 ปอนด์แรง.นิ้ว เกิดความต้านทานผิวสัมผัสระหว่างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วและพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดมาก ซึ่งสอดคล้องกับกราฟโพลาริเซชันที่เกิดการสูญเสียในช่วงของความต้านทานมาก ความชันของเส้นกราฟมีค่ามากกว่าแรงโมเมนต์การอัดที่ 60 ปอนด์แรง.นิ้ว จึงทำให้ค่าสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าลดลง และที่แรงโมเมนต์การอัด 70 ปอนด์แรง.นิ้ว มีค่าแรงอัดที่มากเกินไปทำให้โครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนถูกทำลายและขัดขวางการแพร่ผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงไปเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสมรรถนะที่ได้จึงมีค่าลดลง [20] จะเห็นได้จากช่วงของการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานจากกราฟโพลาริเซชันที่แรงโมเมนต์การอัด 70 ปอนด์แรง.นิ้ว มีค่าการสูญเสียมากที่สุด และแรงโมเมนต์การหมุนที่แรงอัด 60 ปอนด์แรง.นิ้ว ให้ค่าสมรรถนะสูงสุด เนื่องจากแรงโมเมนต์การหมุนที่เหมาะสมจะลดค่าความต้านทานผิวสัมผัสของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วกับผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรด และลดปัญหาด้านการแพร่ผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.36 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.65 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์ ดังนั้นในการ

ทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้โมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ที่ 60 ปอนด์แรง.นิ้ว

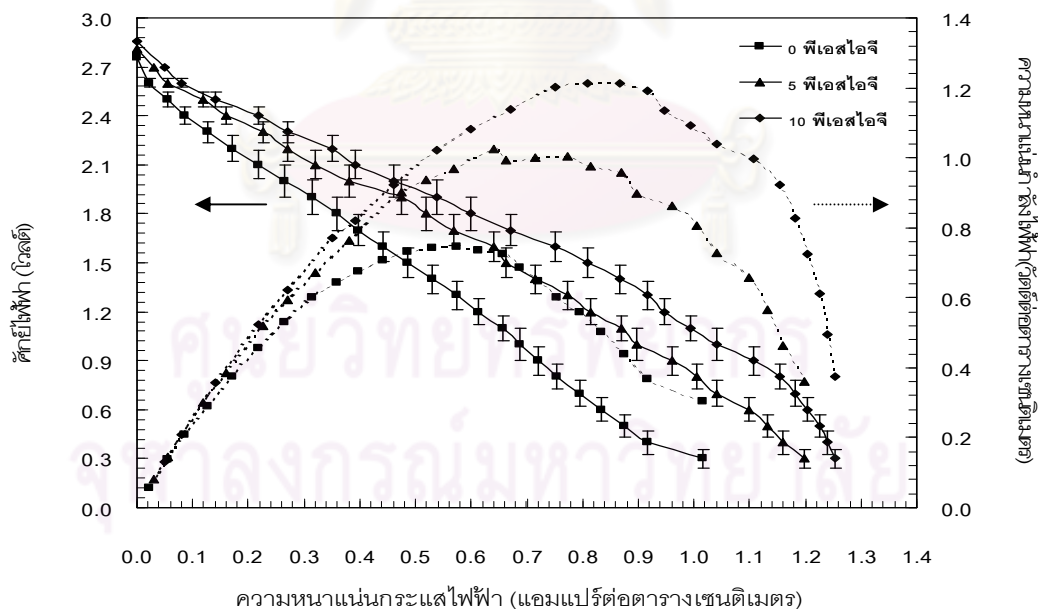


รูปที่ 4.18 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรบนผ้าคาร์บอน

#### 4.3.4 ผลของความดันของระบบ

ภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมส่งผลต่อสมรรถนะที่ดีของเซลล์เชื้อเพลิง โดยระบบที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย คุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง และความดันของระบบ เป็นต้น ความดันของระบบมีส่วนช่วยในเรื่องการจัดการน้ำภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง [17] ในส่วนนี้ทำการศึกษาผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่ 3 ตัวแปรคือ ระบบที่ให้ความดัน 0.5 และ 10 พีเอสไอจี้ในการศึกษาจะใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 เซลล์ อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1 ส่วน ต่อแก๊สออกซิเจน 2 ส่วน แรงอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 60 ปอนด์แรง.นิ้ว

โพลาริเซชันเปรียบเทียบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่เปรียบเทียบผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนแสดงดังรูปที่ 4.19 เมื่อให้ความดันของระบบที่เพิ่มขึ้นจากบรรยากาศจะช่วยเพิ่มค่าอัตราส่วนโมลของแก๊สเชื้อเพลิงให้มีค่าสูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดได้มากขึ้น [17] สมรรถนะของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงมีค่าสูงขึ้น และจากกราฟโพลาริเซชันที่ผลของการเพิ่มความดันระบบจากบรรยากาศเป็น 0 และ 10 พีเอสไอจะช่วยลดการเกิดการความสูญเสียในช่วงของความเข้มข้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแก๊สให้เข้าไปในชั้นเซลล์ได้มากขึ้น ในระบบจึงมีความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นทำให้แก๊สเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา และแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ในระบบนานขึ้นทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อีกเป็นผลให้ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้สมรรถนะที่ได้ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.08 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์ ดังนั้นในการทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะให้ความดันแก่ระบบ 10 พีเอสไอ ในการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

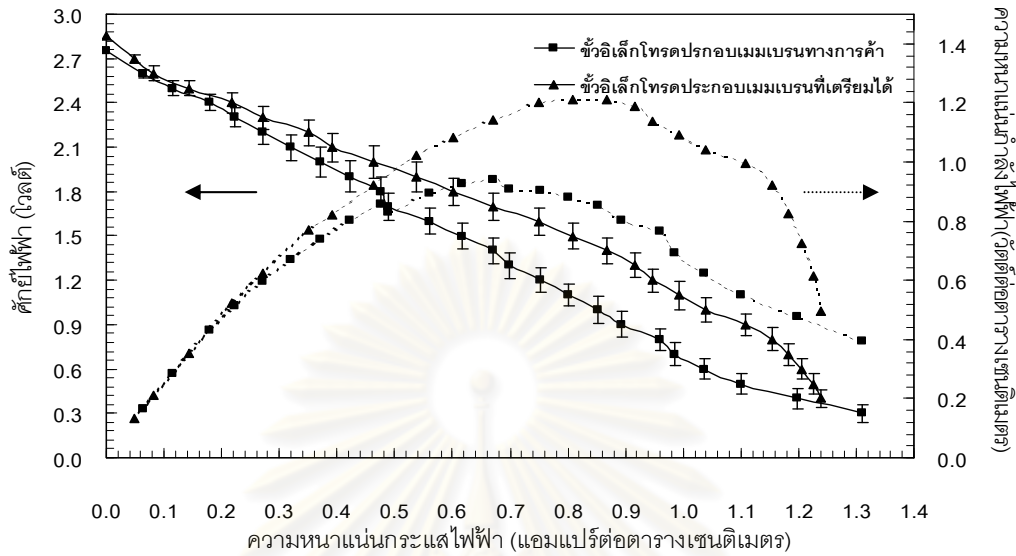


รูปที่ 4.19 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันของระบบต่างกัน โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอน



#### 4.3.5 ผลของการเปรียบเทียบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้กับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดทางการค้า

จากผลการศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทคนิคการพ่นในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก อัตราประกอบกับเนฟลอนเมมเบรน 115 ขนาดพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรด 25 ตารางเซนติเมตร ทำการสร้างเป็นหน่วยชั้นเซลล์ชั้นเพลิงจำนวน 3 เซลล์ และนำมาเปรียบเทียบสมรรถนะกับขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน เนฟลอนเมมเบรน 117 ที่ภาวะการทำงานอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนอิ่มตัวด้วยความชื้น 200 sccm และอัตราการไหลแก๊สออกซิเจนอิ่มตัวด้วยความชื้น 400 sccm ความดันระบบ 10 พีเอสไอจี แรงอัดประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 60 ปอนด์แรง.นิ้ว จากรูปที่ 4.20 แสดงโพลาริเซชันเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทั้งสองชนิด โดยขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้จะให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงกว่าขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า เนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนแบบเซลล์เดี่ยวให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่น้อยกว่าขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ดังนั้นเมื่อนำมาสร้างเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงทำให้สมรรถนะที่ได้มีค่าลดลงเนื่องจากความต้านทานผิวสัมผัสที่เพิ่มมากขึ้น โดยขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้เมื่อนำมาสร้างเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.08 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.47 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.85 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์



รูปที่ 4.20 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบสมรรถนะของคาร์บอนไฟเบอร์ประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1.0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน กับคาร์บอนไฟเบอร์ประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เทคนิคการพ่นในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำอัด ประกอบกับเนฟลอนเมมเบรน 115

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 5 ตารางเซนติเมตร เพื่อนำมาศึกษาผลของการขยายขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่าภาวะการทดลองที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดคือ ใช้เทคนิคการพ่นในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของบนผ้าคาร์บอนที่มีชั้นจัดการน้ำ ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก เนฟลอนเมมเบรนที่ใช้ในการอัดประกอบขั้วอิเล็กโทรดคือ เนฟลอนเมมเบรน 115 ทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนอิ่มตัวด้วยความชื้นในอัตราเท่ากับ 100 sccm อุณหภูมิของเซลล์ 60 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.56 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 0.32 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ และเมื่อนำภาวะการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดสำหรับขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดมาทำการขยายขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็น 25 ตารางเซนติเมตร พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าลดลงเป็น 0.46 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 0.27 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ อาจเนื่องมาจากการเพิ่มขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าทำให้การกระจายของตัวเร่งปฏิกิริยามีความไม่สม่ำเสมอทำให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง

จากภาวะที่ให้ค่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีที่สุดที่ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 5 ตารางเซนติเมตร นำภาวะที่ได้มาสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 25 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 เซลล์ และนำไปทดสอบสมรรถนะที่สภาวะต่าง ๆ แต่เนื่องจากเนฟลอนเมมเบรน 212 มีความบางเกินไป เมื่อทำการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนเพื่อสร้างเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง และนำไปทดสอบสมรรถนะที่อัตราการไหลสูง ๆ ทำให้เมมเบรนเกิดการฉีกขาด ดังนั้นจึงได้ใช้เนฟลอนเมมเบรน 115 ในการสร้างขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนเพื่อนำมาสร้างหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ผลของค่าความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจน แรงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ผลของความดันระบบ และผลของการเปรียบเทียบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้กับ

หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดทางการค้า จากการศึกษาโดยการใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร จำนวน 3 เซลล์ พบว่าการใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีความชื้น ในอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจน 1 ส่วนต่อแก๊สออกซิเจน 2 ส่วน แรงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 60 ปอนด์แรง.นิ้ว ที่การให้ความดันแก่ระบบ 10 พีเอสไอ จะให้สมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.08 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.8 โวลต์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้กับขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้าพบว่าสมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงควรมีการสูญเสียความร้อนจากท่อนำแก๊สให้น้อยที่สุดเพื่อรักษาอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงให้เป็นไปตามที่ตั้งไว้
2. ตรวจสอบสายไฟที่ใช้ในการดึงกระแสให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ต่อการนำไปใช้งาน เนื่องจากระยะเวลาการใช้งานที่นานอาจเกิดการชำรุดได้ง่าย
3. ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของ การขยายขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้า และเพิ่มจำนวนของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าที่มากขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Barbir, F. PEM fuel cells: Theory and Practice. California: Elsevier Academic Press, 2005
- [2] Lister, S., and Mclean, G. PEM fuel cell electrodes. Journal of Power Sources 130 (2004): 61-76.
- [3] Metha, V., and Cooper, J.S. Review and analysis of PEM fuel cell design and Manufacturing, Journal of Power Sources 114 (2003): 32-53.
- [4] Larminie, J., and Dick, A. Fuel cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
- [5] Jian-hua, T., Zhao-yuan, S., Jin-song, S., Zhong-qiang, S. Preparation of water management layer and effects of its composition on performance of PEMFCs. Energy Conversion and Management 49 (2008): 1500–1505.
- [6] Zhang, J. PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers Fundamentals and Applications. Canada: Springer, 2008
- [7] Sasikumar, G., Ihm, J.W., Ryu, H. Optimum Nafion content in PEM fuel cell electrodes, Electrochemical Acta 50 (2004): 601–605.
- [8] Jang, J.H., Chiu, H.C., Yan, W.M., Sun W.L. Effects of operating conditions on the performances of individual cell and stack of PEM fuel cell. Journal of Power Sources 180 (2008): 476–483.
- [9] Mercado H.R.C., Popov B.N. Stability of platinum based alloy cathode catalysts in PEM fuel cells. Journal of power sources 155 (2006): 253-263.
- [10] Cho, Y.H., Park, H, S., Cho, Y.Hw, Jung, D.S., Park. H.Y., Sung, Y.E. Effect of platinum amount in carbon supported platinum catalyst on performance of polymer electrolyte membrane fuel cell. Journal of Power Sources 172 (2007): 89–93.
- [11] Tanga, H., Wanga, S., Jiangb, S.P., Pana M. A comparative study of CCM and hot-pressed MEAs for PEM fuel cells. Journal of Power Sources 170 (2007): 140-144.



- [12] ศศิธร เลิศวิริยะไพศาล. ชั้นย่อยสำหรับอิเล็กโทรดพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551
- [13] Towne, S., Viswanathana, V., Holberya J., Riekea P. Fabrication of polymer electrolyte membrane fuel cell MEAs utilizing inkjet print technology. Journal of Power Sources 171 (2007): 575-584.
- [14] Banyong, N., Kejvalee, P., Pornpote, P. Optimum condition of membrane electrode assembly fabrication for PEM fuel cell, Korean J. Chem. Eng 23 (4) (2006): 570-575.
- [15] Vielstich, W., Hubert, A., Lamm, A. Handbook of fuel cells Fundamentals Technology and Applications. New York: John Willey & Sons, 2003
- [16] Spiegel, C. Designing and Building Fuel Cells. 1<sup>st</sup> edition. New York: Mc Graw Hill, 2007
- [17] Amirinejad, M., Rowshanzamir, S., H. Eikani, M. Effect of operating parameters on performance of a proton exchange membrane fuel cell. Journal of Power Sources 161 (2006): 872-875.
- [18] Sunnoe, K., Hong, I. Effects of humidity and temperature on a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 14 (2008): 357-364
- [19] Karimi, G., Jafapour, F., Li, X. Characterization of flooding and two-phase flow in polymer electrolyte membrane fuel cell stacks. Journal of Power Sources 187 (2009): 156-164.
- [20] Zhou, W., Whu, C.W., Ma, G.J. Influence of clamping force on the performance of PEMFCs. Journal of Power Sources 163 (2007): 874-881.
- [21] Weng, F.B., Su, A., Hsu, C.Y. The study of the effect of gas stoichiometric flow rate on the channel flooding and performance in a transparent fuel cell. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007): 666 – 676.

- [22] Endoo, S., Pruksathorn, S., Piumsomboon, P. Identification of the key variables in membrane electrode preparation for PEM fuel cells by a factorial design. Renewable Energy 35 (2010): 807–813.
- [23] Lee, H.K., Park, J.H., Kim, D.Y., Lee, T.H. A study on the characteristics of the diffusion layer thickness and porosity of the PEMFC. Journal of Power Sources 131 (2004): 200-206.
- [24] Zhan, Z., Xiao, J., Zhang, Y., Pan, M., Yuan, R. Gas diffusion through differently structured gas diffusion layers of PEM fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007): 4443 – 4451
- [25] Lee, D., H, S. Effect of loading and distributions of Nafion ionomer in the catalyst layer for PEMFCs. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008): 2790–2794.
- [26] Li, X. Principles of Fuel Cells. New York: Taylor & Francis
- [27] Escribano, S., Blachot, J.F., Ethève, J. Characterization of PEMFCs gas diffusion layers properties. Journal of Power Sources 156 (2006): 8-13.
- [28] Srinivasan, S. Fuel Cells From Fundamentals to Applications. United States of America: Springer, 2006.
- [29] Pukrushpan, J.T., Stefanopoulou, A.G., Peng, H. Control of Fuel Cell Power System Principle, Modeling, Analysis and Feedback Design. United States of America: Springer, 2003.
- [30] Guvelioglu. G.H., Stenger. H.G. Flow rate and humidification effects on a PEM fuel cell performance and operation. Journal of Power Sources 163 (2007): 882-891.
- [31] Wen, C.Y., Lin, Y.S., Lu, C.H. Experimental study of clamping effects on the performance of a single proton exchange membrane fuel cell and 10-cell stack. Journal of Power Sources 192 (2009): 475-485.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

ก.1 การคำนวณปริมาณเนฟออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

การคำนวณปริมาณเนฟออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีตัวอย่างการคำนวณ ดังนี้

ถ้าต้องการปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเนฟออนร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก

$$\text{ปริมาณเนฟออน} = \frac{\text{น้ำหนักเนฟออนแห้ง (A)}}{\text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (B) + น้ำหนักเนฟออนแห้ง (A)}} \times 100$$

$$33 = \frac{A}{12.5 + A} \times 100$$

โดยที่ น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (B) คิดจาก

ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% Pt/C บนซัพพอร์ทคาร์บอนขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

$$0.5 = \frac{20 \times B}{100 \times 5}$$

$$\text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (B)} = 12.5 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$\text{ดังนั้น น้ำหนักเนฟออนแห้ง (A)} = 6.1567 \text{ มิลลิกรัม}$$

จากน้ำหนักเนฟออนแห้ง คิดเป็นสารละลายเนฟออนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

$$\text{น้ำหนักเนฟออนแห้ง } 5 \text{ มิลลิกรัม ในสารละลาย } 100 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$\text{น้ำหนักเนฟออนแห้ง } 6.1567 \text{ มิลลิกรัม ในสารละลาย } \frac{100 \times 6.1567}{5} \text{ มิลลิกรัม}$$

ดังนั้น น้ำหนักเนฟออนในสารละลาย เท่ากับ 123.134 มิลลิกรัม หรือ 0.1231 กรัม

$$\text{เปลี่ยนเป็นปริมาตร โดย ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}}$$

$$0.87 = \frac{0.1231}{\text{ปริมาตร}}$$

ดังนั้น ปริมาตรสารละลายเนฟออนที่ต้องการ เท่ากับ 0.141 มิลลิตร หรือ 141.53 ไมโครลิตร

### ก.2 การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด

การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดทำได้ 2 วิธี คือ การคำนวณจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX และการคำนวณด้วยวิธีดุลมวล ทั้ง 2 วิธีมีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาหรือในที่นี้คือ แพลทินัม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Pt loading} = \frac{(\%Pt) (CL)_{\text{actual}}}{(A) \times 100}$$

ข้อมูลจากการทดลอง

ร้อยละของแพลทินัมจาก EDX: (%Pt) 14.93

น้ำหนักของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา:  $(CL)_{\text{actual}}$  92.11 มิลลิกรัม

พื้นที่ผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรด: (A) 25 ตารางเซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{Pt loading} &= \frac{(14.93) (92.11)}{(25) \times 100} \\ &= 0.55 \text{ mg/cm}^2 \end{aligned}$$

การคำนวณจากการดุลมวล

ในการเตรียมสารละลายหรือน้ำหมึกเพื่อทำการพ่นหรือทาตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด นอกจากจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแพลทินัม ยังมีส่วนผสมอื่นคือ เอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ สารละลายเนฟลอน (5%wt. Nafion 117, มีความหนาแน่น 0.87 g/ml) สมมติฐาน คือ เอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ ที่ใช้เป็นสารละลายจะระเหยออกไปในกระบวนการทำให้ขั้วอิเล็กโทรดแห้ง และน้ำหนักของสารที่เหลือจะอยู่บนขั้วอิเล็กโทรด

ข้อมูลจากการทดลอง

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (20%wt. Pt/C) ที่ใส่เท่ากับ: (Pt/C)input	12.5 มิลลิกรัม
ปริมาณเนฟลอนที่ใส่เท่ากับ: Nafion input	6.1567 มิลลิกรัม (dry weight.)
น้ำหนักของผ้าคาร์บอนหลังพ่น: after print	103.3 มิลลิกรัม
น้ำหนักของผ้าคาร์บอนก่อนพ่น: before print	85 มิลลิกรัม
พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด: (A)	5.00 ตารางเซนติเมตร
หาน้ำหนักของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาตามทฤษฎี	



น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาตามทฤษฎี

$$\begin{aligned}(\text{CL})_{\text{theory}} &= \text{Nafion input} + \text{Pt/C input} \\(\text{CL})_{\text{theory}} &= 6.1567 + 12.5 \\ &= 18.6567 \text{ มิลลิกรัม}\end{aligned}$$

น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

$$\begin{aligned}(\text{CL})_{\text{actual}} &= \text{wt. Carbon-cloth after print} - \text{wt. Carbon-cloth before print} \\ \text{CL} \text{ actual} &= 103.3 - 85 \\ &= 19.3 \text{ มิลลิกรัม}\end{aligned}$$

การคำนวณหาปริมาณแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดคำนวณจาก

$$P_{t_{\text{actual}}} = \frac{(\text{CL})_{\text{actual}} \times P_{t_{\text{input}}}}{(\text{CL})_{\text{theory}}}$$

โดยที่

$$P_{t_{\text{input}}} = \frac{(12.5)(20)}{(100)} = 2.5 \text{ mg}$$

ดังนั้นแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ

$$P_{t_{\text{actual}}} = \frac{(19.3)}{(18.6567)} \times 2.5 = 2.18 \text{ mg}$$

และปริมาณ Pt loading คำนวณจาก

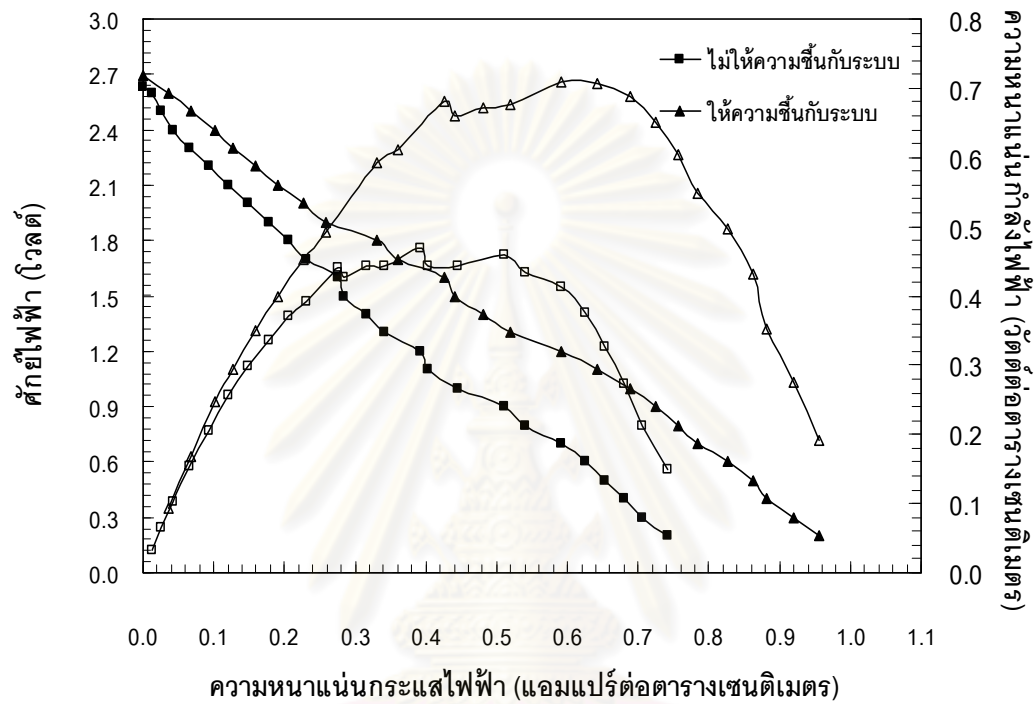
$$P_{t_{\text{loading}}} = \frac{P_{t_{\text{actual}}}}{A}$$

$$P_{t_{\text{loading}}} = \frac{(2.18)}{5} = 0.44 \text{ mg/cm}^2$$

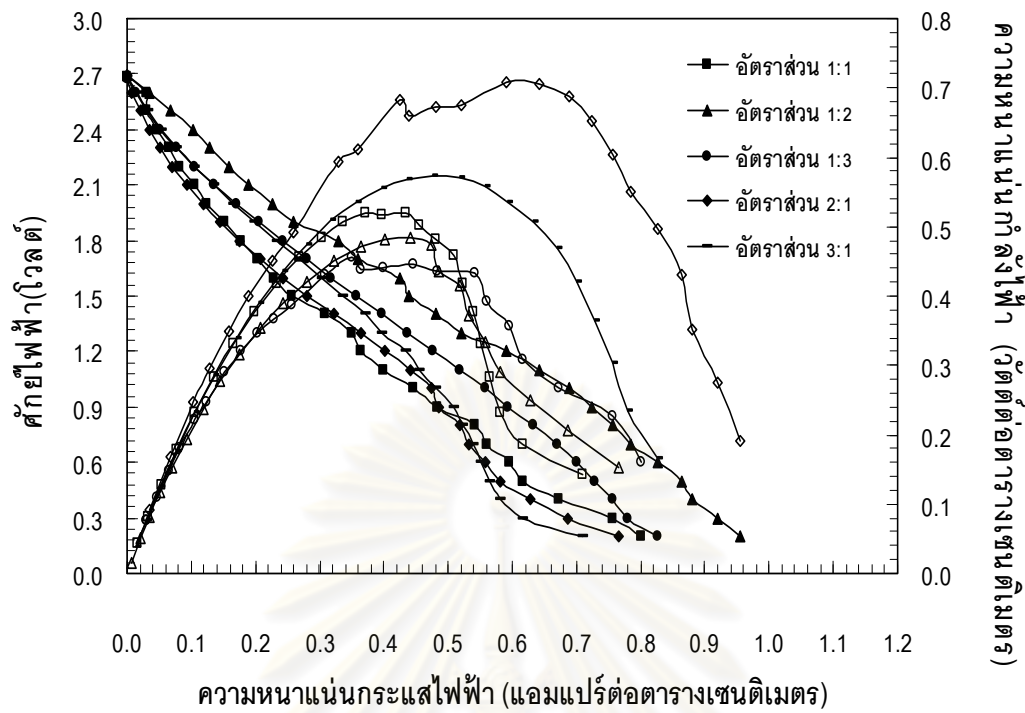
ดังนั้นปริมาณแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.44 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

## ภาคผนวก ข

ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง  
โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า

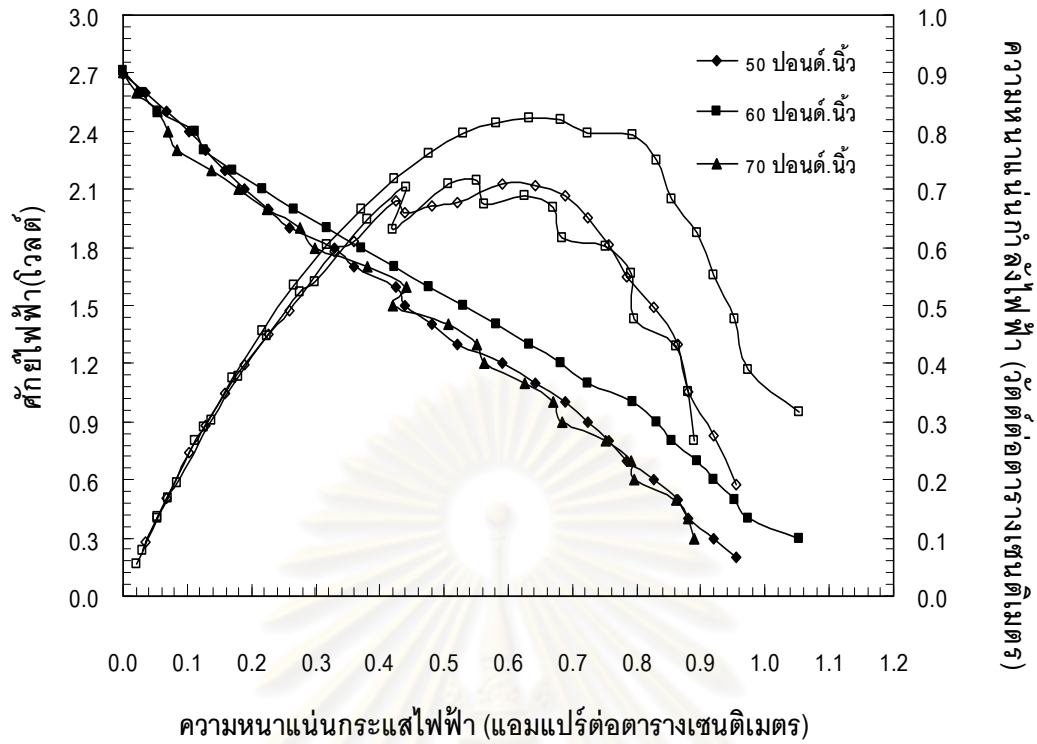


รูปที่ ข.1 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้และไม่ให้ค่าความชื้นแก่แก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน



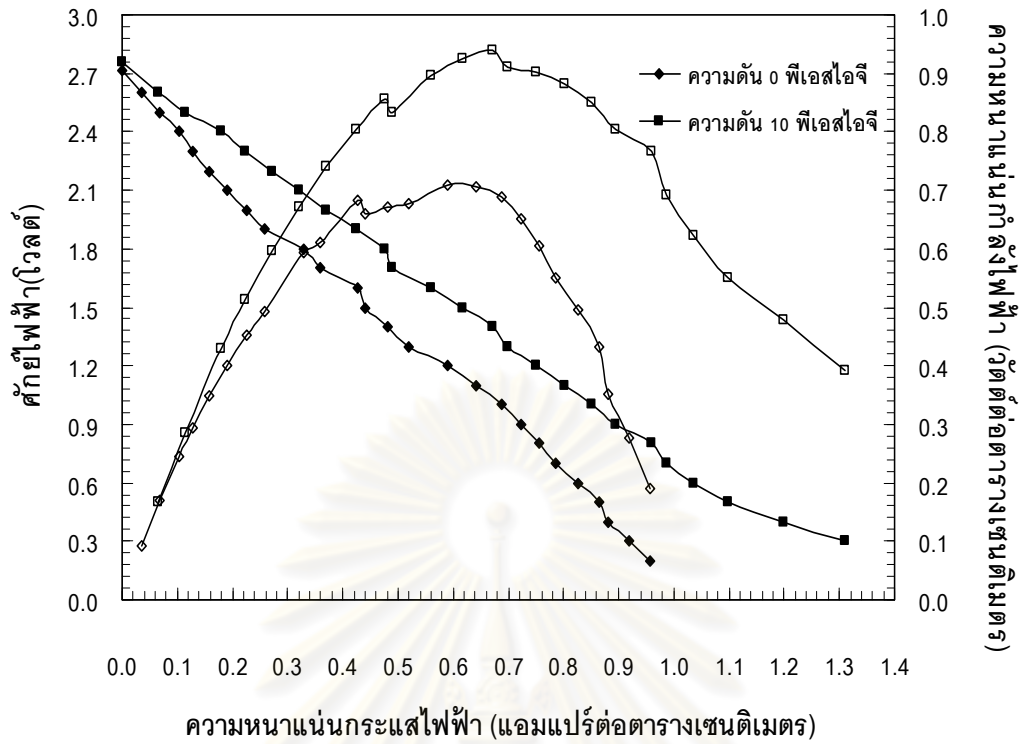
รูปที่ ๑.๒ โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนอิมิตัวต่อแก๊สออกซิเจนอิมิตัวด้วยความชื้นต่างๆ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.3 โฟลาโรเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัด  
 ประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่างๆ โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่ง  
 ปฏิกริยา 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๗.4 โพลาริเซชันของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันของระบบต่างกัน โดยใช้หัวอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนทางการค้า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุภารัตน์ สายยืนยงค์ เกิดวันที่ 1 สิงหาคม 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสตรีรัตนบุรี จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2548 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย