

ผลของตัวแปรต่อการเตรียมเอ็มอีไอในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์



นางสาวศศิگانต์ เอ็นดู

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF VARIABLES ON MEA PREPARATION IN PEM FUEL CELL



Miss Sasikarn Endoo

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of science

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของตัวแปรต่อการเตรียมเอ็มซีเอในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

โดย

นางสาวศศิกันต์ เอ็นดู

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา

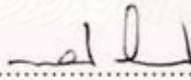
รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวดี พุกษาทร)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สบทิพย์ พงศ์สถาปตี)

ศศิกานต์ เอ็นดู : ผลของตัวแปรต่อการเตรียมเอ็มอีเอในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. (EFFECT OF VARIABLES ON MEA PREPARATION IN PEM FUEL CELL) อ. ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 125 หน้า

ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอ (Membrane electrode assemblies, MEA) ถือเป็นหัวใจสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ได้แก่ ปริมาณเทฟลอน อุณหภูมิการอบขั้วอิเล็กโทรด เวลาของการอบขั้วอิเล็กโทรด แก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรดและปริมาณเนฟิออน เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่ให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุด ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้จะนำไปประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงและวิเคราะห์การทำงานด้วยวิธี Polarization curve, Impedance Spectroscopy, Cyclic voltammetry และทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ SEM EDX และ XRD จากการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด คือ ไม่ใช้เทฟลอน อุณหภูมิการอบขั้วอิเล็กโทรดที่ 80 °C ปริมาณเนฟิออนร้อยละ 10 เวลาในการอบขั้วอิเล็กโทรด 0.5 ชั่วโมง และอบขั้วอิเล็กโทรดในบรรยากาศของอากาศ สมรรถนะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองพบว่า ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 314 mA/cm<sup>2</sup> คิดเป็นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.94 W ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V เมื่อภาวะการเดินกระบวนการที่ 60 °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 จากนั้นนำภาวะที่เหมาะสมที่ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด มาเตรียมเอ็มอีเอขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์ ประกอบเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง และทำการทดสอบพบว่าได้กำลังไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 4.53 วัตต์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...เคมีเทคนิค...  
สาขาวิชา...เคมีเทคนิค...  
ปีการศึกษา 2549...

ลายมือชื่อนิสิต..... น.มิ่งกานต์ เอ็นดู  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

# # 4772493323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: PEMFC / MEA / ELECTRODE

SASIKARN ENDOO: EFFECT OF VARIABLES ON MEA PREPARATION IN PEM FUEL CELL. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 125 pp.

Membrane Electrode Assemblies, MEA, is the heart of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell because it is the component to provide electrochemical reactions. In this work, the effects of parameters on MEA preparation such as PTFE contents, temperature of drying, time of drying, gas for drying and Nafion content were studied. The objective was to find the optimum conditions of these parameters. The prepared MEAs were assembled as a single cell and tested in order to obtain Polarization curve, Impedance Spectroscopy, Cyclic voltammetry. Their physical properties were also analyzed by SEM EDX and XRD. The result indicated that the optimum condition was at the PTFE content 0  $\mu$ L, temperature 80°C, Nafion content 10%, time 0.5 hr. and drying electrodes with air. The best performance was observed when the highest current density and the power were 314 mA/cm<sup>2</sup> and 0.94 W at 0.6 V. respectively, with the running condition of 60 °C, and 100% humidity. Then, employed the best condition of MEA preparation from previous study to prepare a 2-cell fuel cell stack. The stack was run and the maximum obtainable power was 4.53 W at 0.8 V.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ...Chemical Technology... Student's signature... Sasikarn Endoo  
Field of study: ...Chemical Technology... Advisor's signature...  
Academic year: ...2006...



## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาบติ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี ที่มอบทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งพี่กฤติกา จารุทะวีย์และบรรยง นาครำไพ ที่คอยร่วมแก้ไขปัญหาต่างๆ จนงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.1.1 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงและหลักการทำงาน.....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	7
2.2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	7
2.3 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า.....	9
2.4 ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน.....	9
2.4.1 เมมเบรน.....	10
2.4.2 ขั้วอิเล็กโทรด.....	11
2.5 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด.....	14
2.5.1 วิธีการเตรียมน้ำหมึก (Ink) สำหรับขั้วอิเล็กโทรด.....	15
2.5.2 เทคนิคการป้อนน้ำหมึก.....	16
2.6 การวัดด้วยความร้อนในการประกอบขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน.....	18
2.7 โพลาริเซชัน (Polarization).....	18
2.8 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy).....	21

บทที่	ช หน้า
2.8.1	ตัวต้านทาน (Resistance, R)..... 25
2.8.2	ตัวเก็บประจุ (Capacitance, C)..... 26
2.8.3	Constance Phase Element, CPE..... 26
2.8.4	Warburg Impedance, $Z_{war}$ ..... 27
2.8.5	ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, L)..... 27
2.8.6	รูปแบบของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ..... 28
2.9	การประกอบเซลล์เดี่ยว (Single cell) และหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stacks).. 30
2.10	การจัดการน้ำ (Water management)..... 33
2.11	การออกแบบกาทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$ ..... 35
2.11.1	วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติ..... 35
2.11.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวน..... 36
2.11.3	แบบจำลองการถดถอย..... 37
2.11.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง..... 37
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 38
3	อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย..... 40
3.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย..... 40
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 40
3.3	ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว..... 41
3.4	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 41
3.5	ระบบทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง..... 43
3.6	ตัวแปรที่ศึกษา..... 44
3.7	วิธีดำเนินการวิจัย..... 44
3.7.1	การปรับสภาพของเมมเบรน..... 44
3.7.2	การเตรียมขั้วอิเล็กโทรด..... 44
3.8	การวิเคราะห์สมบัติของขั้วอิเล็กโทรด..... 45
3.8.1	การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 46
3.8.2	การหาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด..... 46
3.8.3	การศึกษาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 46
3.9	การประกอบเอ็มอีเอ (Membrane Electrode Assembly, MEA)..... 46



บทที่	ณ	หน้า
3.10 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว.....		47
3.10.1 การประกอบเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว).....		47
3.10.2 ขั้นตอนก่อนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....		47
3.10.3 ขั้นตอนการBreak-In.....		49
3.10.4 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว).....		50
3.10.5 ขั้นตอนภายหลังการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว).....		50
3.11 Cyclic Sweep Voltammetry (CV) measurement.....		51
3.12 การวัดสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง.....		52
3.12.1 การประกอบเต็มอีโคโนของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง จำนวน 2 เซลล์		
3.12.2 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหน่วยชั้นเซลล์ เชื้อเพลิง.....		52
3.12.3 ขั้นตอนภายหลังการทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง		53
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....		54
4.1 การออกแบบการทดลอง (ตอนที่1).....		54
4.1.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด.....		58
4.1.2 ผลของแก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด.....		59
4.1.3 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแก๊สที่ใช้ในการอบขั้ว อิเล็กโทรด.....		60
4.1.4 การตรวจสอบสมมติฐานของการออกแบบการทดลองชุดที่ 1.....		62
4.2 ผลของการทดสอบภายนอก (Ex situ) หรือลักษณะทางกายภาพของขั้ว อิเล็กโทรด.....		63
4.2.1 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM).....		63
4.2.2 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Energy Dispersive X-ray (EDX)....		64
4.3 ผลของการทดสอบภายใน (In situ) หรือการทดสอบสมรรถนะของเซลล์ เชื้อเพลิง.....		66
4.3.1 การศึกษาในรูปโพลาริเซชันของการทดลองตอนที่ 1.....		66
4.3.2 การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนในเซลล์เชื้อเพลิงทำโดย		

บทที่	หน้า
เทคนิคอิมพีแดนซ์ในรูปอิมพีแดนซ์สเปโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) ของการ ทดลองตอนที่ 1.....	68
4.3.3 Cyclic Sweep Voltammetry (CV) measurement.....	70
4.4 การออกแบบการทดลอง (ตอนที่ 2).....	72
4.4.1 ผลของปริมาณเนฟิออน.....	76
4.4.2 การตรวจสอบสมมติฐานของการออกแบบการทดลองชุดที่ 2.....	78
4.5 ผลของการทดสอบภายนอก (Ex situ) ของการทดลองตอนที่ 2.....	79
4.5.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด.....	79
4.6 ผลของการทดสอบภายใน (In situ) หรือการทดสอบสมรรถนะของเซลล์ เชื้อเพลิงตอนที่ 2.....	81
4.6.1 การ Break-In.....	81
4.6.2 การศึกษาโพลาริเซชันของการทดลองตอนที่ 2.....	82
4.6.3 การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนในเซลล์เชื้อเพลิงทำโดย เทคนิคอิมพีแดนซ์ในรูปอิมพีแดนซ์สเปโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) ของการ ทดลองตอนที่ 2.....	86
4.6.4 การศึกษาสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	91
5   สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	93
5.1 การเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอ.....	93
5.1.1 การทดลองตอนที่ 1.....	94
5.1.2 การทดลองตอนที่ 2.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	96
รายการอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก.....	102
ภาคผนวก ข.....	112
ภาคผนวก ค.....	114
ภาคผนวก ง.....	122

บทที่	หน้า
ภาคผนวก จ.....	124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	125



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า.....	25
4.1 ปัจจัยและระดับค่าของการทดลองตอนที่ 1.....	55
4.2 การทดลองและผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง $2^4$ แฟกทอเรียล ตอนที่ 1...	55
4.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) ของการทดลองตอนที่ 1.....	57
4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิงของการทดลองตอนที่ 1 จากรูปที่ 4.10 และ 4.11.....	70
4.5 ปัจจัยและระดับค่าของการทดลองตอนที่ 2.....	72
4.6 ชุดการทดลองและผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง $2^{4-1}$ แฟกทอเรียล ตอนที่ 2.....	73
4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) ของการทดลอง ตอนที่ 2.....	75
4.8 สรุปผลการวิเคราะห์ X-rays diffraction ของซัลโฟลิกโทรดที่เตรียมได้และซัลโฟลิกโทรดทางการค้าที่โครงสร้างแพลทินัม 111.....	81
4.9 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ระหว่างชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2.....	88
4.10 สรุปผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 V จากรูปที่ 4.26.....	90
4.11 สรุปการเปรียบเทียบปริมาณแพลทินัม ปริมาณเนฟิออน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับงานวิจัยอื่นๆ.....	94
ก.1 ผลการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีดุลมวลของชุดการทดลองตอนที่ 1.....	105
ก.2 ผลการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีดุลมวลของชุดการทดลองตอนที่ 2 (replicate 1).....	107
ก.3 ผลการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีดุลมวลของชุดการทดลองตอนที่ 2 (replicate 2).....	108
ก.4 ผลการวัดค่า CV ของชุดการทดลองตอนที่ 1.....	111
ค.1 ผลการทดลองจากชุดการออกแบบการทดลองตอนที่ 1.....	114

ตารางที่	หน้า
ค.2 ผลการทดลองจากชุดการทดลองตอนที่ 1.....	115
ค.3 ผลการทดลองจากชุดการทดลองตอนที่ 2 (replicate1).....	118
ค.4 ผลการทดลองจากชุดการทดลองตอนที่ 2 (replicate2).....	120
ง.1 ผลการวิเคราะห์ X-rays diffraction ของซัลไฟด์ไทเทเนียมและการค้าและซัลไฟด์ไทเทเนียมที่เตรียมได้.....	123



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็ม.....	8
2.2 เซลล์เดี่ยว (Single cell) ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็ม.....	9
2.3 โครงสร้างของ Perfluorosulfonic membrane หรือ Nafion membrane.....	10
2.4 การถ่ายโอนของแก๊ส โปรตอนและอิเล็กตรอนในขั้วอิเล็กโทรด.....	13
2.5 กระบวนการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดด้วยวิธีการสเปรย์.....	17
2.6 กระบวนการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดด้วยวิธีการพิมพ์.....	17
2.7 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็ม.....	20
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี.....	20
2.9 Nyquist plot และ Bode plot.....	23
2.10 รูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเคมีไฟฟ้า.....	28
2.11 รูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง.....	29
2.12 รูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่เกิดน้ำท่วม.....	30
2.13 การประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงฟิวีเอ็ม.....	31
2.14 กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำในเมมเบรน.....	34
3.1 ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยวที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2 เครื่อง Potentiostat/ Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท Autolab.....	41
3.3 Hard ware สำหรับทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว) ของบริษัท Electrochem. Inc.....	42
3.4 ลักษณะช่องทางการไหลใน unipolar plate ของเซลล์เดี่ยว แบบ Serpentine.....	42
3.5 ระบบทดสอบสมรรถนะหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.6 เครื่อง Electronic load รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท Autolab.....	43
3.7 Hard ware หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์ ของบริษัท Electrochem. Inc.....	43
3.8 ลักษณะช่องทางการไหลใน bipolar plate ของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง แบบตรง (Straight channel flow pattern).....	43

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Half Normal %Probability กับปัจจัยต่างๆ.....	56
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิการอบขั้วอิเล็กโทรด.	58
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด.....	59
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด.....	61
4.5 การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง.....	62
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่มาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง	63
4.7 พื้นผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรดวัดด้วยเครื่อง SEM.....	64
4.8 การวิเคราะห์ปริมาณพลทินัมโดยเครื่อง EDX.....	65
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการทดลองลำดับที่ 6 เปรียบเทียบกับ Commercial MEA.....	67
4.10 อิมพีแดนซ์ (Nyquist plot ) ของการทดลองลำดับที่ 6 เปรียบเทียบกับ Commercial MEA.....	68
4.11 กราฟ CV ของการทดลองที่ 6.....	70
4.12 กราฟ CV ของเอ็มอีเอทางการค้า.....	71
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal %Probability กับปัจจัยต่างๆ.....	74
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับปริมาณเนฟิออน.....	76
4.15 ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	77
4.16 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง.....	78
4.17 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าผลผลิตที่ถูกทำนาย (Predicted).....	79
4.18 การวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดทางการค้า โดยเทคนิค XRD.....	79
4.19 การวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ โดยเทคนิค XRD.....	80
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา สำหรับการ Break-In ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.5 V ของเอ็มอีเอที่เตรียมได้ของภาวะการทดลองที่ 1 ของชุดการทดลองที่ 2 (ครั้งที่ 1).....	82

ภาพประกอบ	หน้า
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา สำหรับการ Break-In ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.5 V ของเอมอีเอทีที่เตรียมได้ของภาวะการทดลองที่ 1 ของชุดการทดลองที่ 2 (ครั้งที่ 2).....	83
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการทดลองลำดับที่ 1 ของชุดการทดลองตอนที่ 2 เปรียบเทียบกับเอมอีเอทางการค้า: (■) Commercial MEA; (◆) การทดสอบครั้งที่ 1 ของเอมอีเอทีที่เตรียมได้.....	84
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการทดลองลำดับที่ 1 ของชุดการทดลองตอนที่ 2 เปรียบเทียบกับเอมอีเอทางการค้า: (■) Commercial MEA; (◆) การทดสอบครั้งที่ 1 ของเอมอีเอทีที่เตรียมได้; (▲) การทดสอบซ้ำของเอมอีเอทีที่เตรียมได้.....	85
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการทดลองลำดับที่ 1 เปรียบเทียบกับเอมอีเอทางการค้า: (■) Commercial MEA; (▲) เอมอีเอทีที่เตรียมได้ (Nafion 20%); (◆) เอมอีเอทีที่เตรียมได้ (Nafion 10%).....	86
4.25 อิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ของเอมอีเอทีที่มีปริมาณเนฟิออน 10%.....	87
4.26 อิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ของเอมอีเอทีที่เตรียมได้ (10% Nafion) เปรียบเทียบกับเอมอีเอทางการค้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 V: (■) Commercial MEA; (▲) เอมอีเอทีที่เตรียมได้..	89
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวขนาด 5 ตารางเซนติเมตร.....	91
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์.....	92
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์เดี่ยวที่มีขนาด 5 ตารางเซนติเมตร: (◆), และหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์: (■).....	93
ข.1 ปริมาณแพลทินัม 16.06% คิดเป็น Pt loading เท่ากับ 1.45 mg /cm <sup>2</sup> .....	112
ข.2 ปริมาณแพลทินัม 16.44% คิดเป็น Pt loading เท่ากับ 1.42 mg /cm <sup>2</sup> .....	112
ข.3 ปริมาณแพลทินัม 16.92% คิดเป็น Pt loading เท่ากับ 1.51 mg /cm <sup>2</sup> .....	113
ข.4 ปริมาณแพลทินัม 16.53 %คิดเป็น Pt loading เท่ากับ 1.37 mg /cm <sup>2</sup> .....	113

ภาพประกอบ	หน้า
จ.1	หม้อความชื้นของระบบการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง: (ก) หม้อความชื้นก่อนการปรับปรุง และ (ข) หม้อความชื้นที่ปรับปรุงแล้ว..... 124



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมาพลังงานส่วนใหญ่ได้มาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (ถ่านหิน น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติ) แต่ผลของกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างมากมาย อาทิเช่น ปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งมีสาเหตุมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และยังมีอีกมากของเสียที่เหลือจากการเผาไหม้ รวมไปถึงประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานต่ำ ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าและพัฒนาหาแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานที่มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการผลิตพลังงานแบบเดิม ซึ่งทางเลือกหนึ่งก็คือ เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) คือ อุปกรณ์ที่ใช้กระบวนการเคมีไฟฟ้าในการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่นิยมเป็นปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจนโดยไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ ทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อมลภาวะทางอากาศ ไม่มีเสียงดังรบกวน ทั้งยังมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงกว่า เครื่องยนต์เผาไหม้ 1-3 เท่า [1] ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง และชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton-exchange membrane fuel cell, PEMFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีขนาดเล็ก สามารถทำงานได้รวดเร็วแม้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำคืออยู่ในช่วง 60 – 100 องศาเซลเซียส และ 1-2 บรรยากาศ อิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็งจึงสามารถทนต่อความแตกต่างของแรงดันของแก๊สทั้งสองข้างได้ดี ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้เซลล์ชนิดนี้ยังให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density) สูงที่สุด [1] เมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในยานพาหนะ

เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว และเมมเบรน (ซัลโฟเนตพอลิเอเทอเรฟลูออโรเอทิลีน) ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ คือเป็นตัวกลางการเคลื่อนย้ายโปรตอนไปยังขั้วแคโทด ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้วมีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ แพลทินัม ประกอบส่วนประกอบทั้งสามชิ้นนี้เข้าด้วยกันเรียกว่าขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอ (Membrane electrode assemblies, MEA) เชื้อเพลิงที่ใช้คือแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยป้อนเข้าไปที่ขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ นอกจากนี้เพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สามารถ



ทำได้โดยการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมเรียกว่าหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Stack) การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดขึ้นโดยที่โมเลกุลของไฮโดรเจนแตกตัวที่ขั้วอิเล็กโทรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและทำให้เกิดเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ตามลำดับ) เมื่อโปรตอนไหลผ่านเมมเบรนและอิเล็กตรอนไหลออกไปตามวงจรไฟฟ้า ทำให้เกิดความต่างศักย์และนำไปสู่การไหลของกระแสไฟฟ้าในที่สุด การส่งผ่านของโปรตอนจะเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอาศัยโมเลกุลของน้ำที่ช่วยพาโปรตอนข้ามระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ในเมมเบรนผ่านไปยังขั้วแคโทด ถ้ามีน้ำมากเกินไปจะทำให้หน้าท่อมเซลล์ ซึ่งทำให้เกิดความต้านทานจากการถ่ายโอนมวลส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อจัดการน้ำในเซลล์ให้มีปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาแพงเนื่องจากการใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและยังมีปัญหาในทางเทคนิคอีกมากมายที่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขปรับปรุงก่อนที่จะนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ได้จริงในทางการค้า โดยเฉพาะปัญหาการจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งถ้าสามารถเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพและมีการจัดการน้ำที่ดีได้จะเป็นพัฒนาการอีกขั้นตอนของการพัฒนาเซลล์ไปสู่การพัฒนาเซลล์ในทางการค้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน
2. ศึกษาสมบัติและสมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้แบบเซลล์เดี่ยวและหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีเตรียมอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ที่มีการจัดการน้ำที่ดีและทราบตัวแปรที่มีผลต่อการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนและการจัดการน้ำใน เซลล์เชื้อเพลิง
2. สามารถเพิ่มสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมสารเคมีและอุปกรณ์เพื่อใช้ในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดและขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนเพื่อนำมาออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  factorial
4. เตรียมขั้วอิเล็กโทรดและขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ตามภาวะที่ทำการออกแบบการทดลอง
5. ทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิเล็กโทรดและทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน
6. นำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อหาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองเพื่อหาภาวะที่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะที่ดีที่สุด
7. เตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนจากภาวะที่ให้ค่าสมรรถนะที่ดีที่สุด ประกอบเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 หน่วยและทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง
8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1. เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)[2]

โดยทั่วไปกระบวนการการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงจะต้องผ่านขั้นตอนหลายขั้นตอน ดังนี้

1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นความร้อน
2. ความร้อนที่ได้ไปต้มน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ
3. จากนั้นไอน้ำจะไปหมุนกังหันเพื่อเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกล
4. พลังงานกลที่ได้ไปหมุนเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป

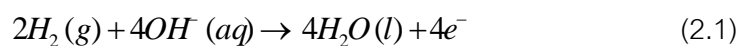
เซลล์เชื้อเพลิงเป็น อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ในการเปลี่ยนพลังงานเคมี (chemical energy) ของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยไม่ผ่านกระบวนการเผาไหม้เช่นเดียวกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม จึงทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงกว่ากระบวนการดั้งเดิม

##### 2.1.1. ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงและหลักการทำงาน[3]

ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกตามสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ได้ 5 ชนิด คือ

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cells, AFC)

สารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้จะอยู่ในรูปสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เซลล์ประเภทนี้จะมีประสิทธิภาพสูงมาก เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาแคโทดได้รวดเร็วในอัลคาไลน์อิเล็กโทรไลต์ อย่างไรก็ตามข้อเสียที่เกิดขึ้นมักจะมีคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่ออิเล็กโทรไลต์ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากเชื้อเพลิงและอากาศที่จะผ่านเข้าไปในเซลล์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จึงมักใช้ในเครื่องมือทางทหารและเครื่องมือในอวกาศซึ่งไม่มีปัญหาด้านค่าใช้จ่ายแต่เน้นประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์ที่สูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดเป็นดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ





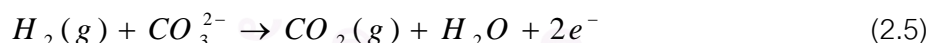
## 2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)

อิเล็กโทรไลต์ของเซลล์เชื้อเพลิงนี้คือ กรดฟอสฟอริก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดเป็นดังสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ อุณหภูมิในการทำงานอยู่ระหว่าง 150 ถึง 220 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังสามารถใช้ไฮโดรเจนที่ไม่บริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงในเซลล์ได้ แต่เซลล์ประเภทนี้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีราคาสูง และยังให้กระแสและ Power density ที่ต่ำจึงเป็นข้อจำกัดของการนำเซลล์ประเภทนี้ไปใช้ เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้จึงมักใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าบางประเภทและในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งบางชนิด



## 3. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC)

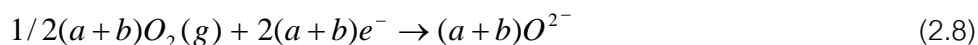
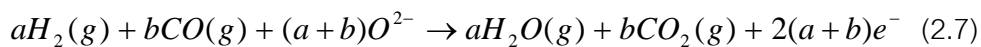
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารประกอบของแอลคาไลน์ (ลิเทียม โซเดียม หรือโพแทสเซียม) กับคาร์บอเนตเป็นอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการทำงานอยู่ระหว่าง 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงเช่นนี้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เร็ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้โลหะมีตระกูล เช่น แพลทินัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะถูกพัฒนาต่อไปให้เป็นแหล่งผลิตพลังงานพื้นฐานต่อไป



## 4. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)

เซลล์ชนิดนี้จะมีส่วนคล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว คือการทำงานของเซลล์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ( ประมาณ 600-1000 องศาเซลเซียส ) เซลล์ชนิดนี้จะใช้เซอร์รามิกส์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นเซอร์โคเนียออกไซด์ (Zirconium Oxide) ที่เติมยิตเรียม (Yttrium) จำนวนเล็กน้อย ไม่มีผลกระทบจากการกัดกร่อนของอิเล็กโทรไลต์เหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว แต่ก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับส่วนประกอบของเซลล์อันเกิดจากอุณหภูมิภายในเซลล์ที่สูง เซลล์ชนิดนี้คาดหวังไว้ว่าจะสามารถนำไปใช้เป็น

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในศตวรรษที่ 21 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)



5. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells, PEMFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์ของแข็ง (Solid polymer fuel cells, SPFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้แผ่นเมมเบรนพอลิเมอร์ที่สามารถนำไอออนได้เป็นอิเล็กโทรไลต์ มีข้อดีคือ ไม่เกิดการกัดกร่อน ไม่เกิดปัญหาในการกำจัดสารอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง และสามารถทำงานได้รวดเร็วแม้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ นอกจากนี้เซลล์ชนิดนี้ยังให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในยานพาหนะ อย่างไรก็ตามเซลล์อาจมีราคาสูงเนื่องจากการใช้แพลทินัมที่มีราคาสูงเป็นตัวเร่งปฏิริยาในเซลล์ สำหรับรายละเอียดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ได้กล่าวในหัวข้อ 2.2

นอกจากการแยกประเภทของเซลล์ตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์แล้ว ยังสามารถแยกเซลล์ออกเป็น 2 กลุ่มตามอุณหภูมิการทำงานได้ดังนี้

- เซลล์เชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิต่ำจะทำงานที่อุณหภูมิ 80 - 200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งเหมาะที่จะใช้กับยานอวกาศและรถยนต์

- เซลล์เชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิสูงจะทำงานที่อุณหภูมิ 600-1000 องศาเซลเซียส ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอม เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง เป็นต้น ซึ่งเหมาะในกรณีที่ต้องการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนในปริมาณมาก

นอกจากเซลล์เชื้อเพลิงที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเซลล์อีกชนิดที่เรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ใช้เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) ซึ่งปฏิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดคล้ายกับปฏิริยาที่ขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน แต่ต่างกันที่ปฏิริยาที่ขั้วแอโนด คือ โมเลกุลเมทานอลจะแตกตัวออกเมื่อสารละลายผสมระหว่างน้ำกับเมทานอลถูกส่งผ่านไปขั้วแอโนด โดยอะตอมของคาร์บอนจะรวมตัวกับออกซิเจนอะตอมที่มาจากน้ำเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนจะถูกออกซิไดซ์ที่ขั้วแอโนดและโปรตอนจะวิ่งผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทดทำให้เกิดน้ำขึ้นที่ขั้วแคโทด



## 2.2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEMFC)

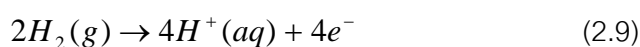
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานที่มีการเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง และมีภาวะการทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำ คือ 60 -100°C, 1-2 บรรยากาศ

เซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ประกอบด้วยแผ่นโพลีเมอร์ของแข็ง (ซัลโฟเนทโพลีเตตระฟลูออโรเอทีลิน) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ คือเป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนโปรตอน จะถูกนำมาประกบกับขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่มีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแพลทินัมเกาะอยู่ น้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกกำจัดออกจากเซลล์ไปกับแก๊สทางด้านแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น ประสิทธิภาพของเมมเบรนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายไอออนของไฮโดรเจน ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ใช้ต้องทำให้มีความชื้น เพราะกระบวนการนำไอออนของเมมเบรนจะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าเมมเบรนไม่มีน้ำหรือความชื้น เซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ไม่สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ เพราะจะมีความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาอันได้แก่ แพลทินัม

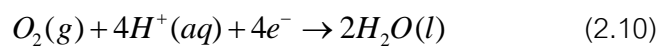
### 2.2.1. หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 2.1 เริ่มต้นโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าทางขั้วแอโนดและป้อนแก๊สออกซิเจนเข้าทางขั้วแคโทด ที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ของไฮโดรเจนได้เป็นอิเล็กตรอนและโปรตอน ดังสมการที่ (2.9) อิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอกมายังขั้วแคโทดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันโปรตอนที่ได้จะแพร่ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด ที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ระหว่างโปรตอน อิเล็กตรอนและแก๊สออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและความร้อน ดังสมการที่ (2.10) และได้ปฏิกิริยารวม แสดงดังสมการที่ (2.11)

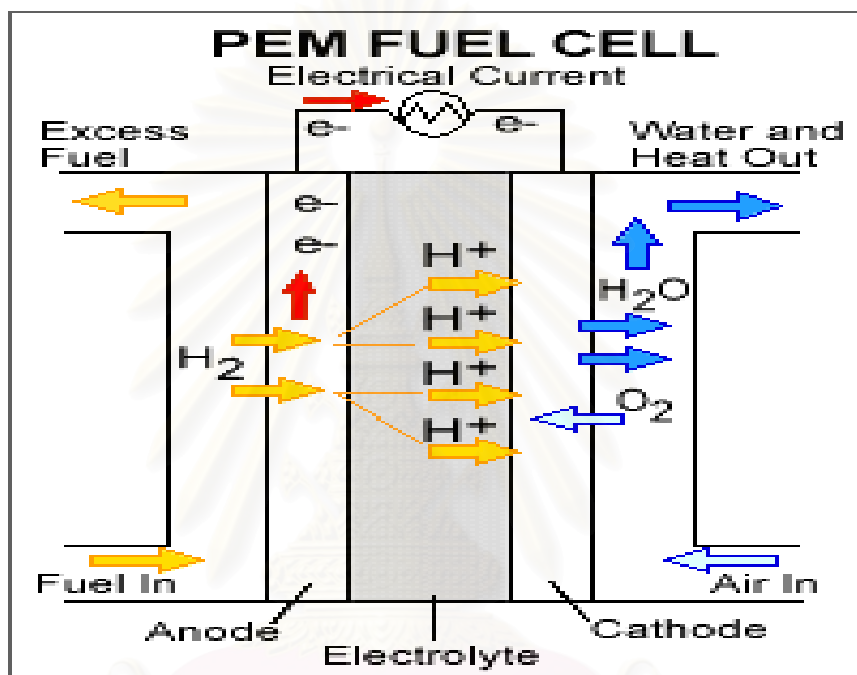
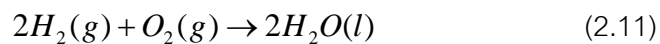
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



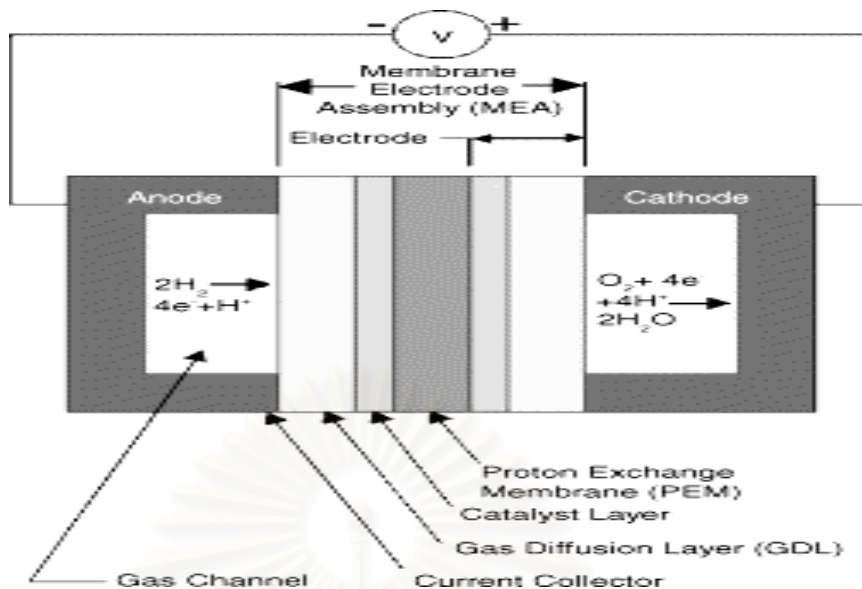
ปฏิกิริยารวม



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพื้เอ็ม[4]

เซลล์เชื้อเพลิงพื้เอ็มมีส่วนประกอบหลักได้แก่แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าและขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (Membrane Electrode Assembly, MEA) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 เซลล์เดี่ยว (Single cell) ของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [5]

### 2.3 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate) [6]

แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเป็นส่วนที่คั่นอยู่ระหว่างเซลล์แต่ละเซลล์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Unipolar plate) และแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stack cell) แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ออกจากเซลล์ และเป็นช่องทางการไหลของแก๊ส (Gas flow field plate) ช่วยในการป้องกันการรั่วของแก๊ส การระบายความร้อน และการจัดการน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา ช่องทางการไหลของแก๊สจะอยู่บริเวณผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า โดยรูปแบบของช่องทางการไหลคำนึงถึงทิศทางและอัตราการไหลที่เหมาะสมกับเซลล์เชื้อเพลิง รูปแบบที่นิยมใช้ เช่น Serpentine, Parallel และ Spiral เป็นต้น วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็นแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น แกรไฟต์ พอลิเมอร์ผสม โลหะ เป็นต้น

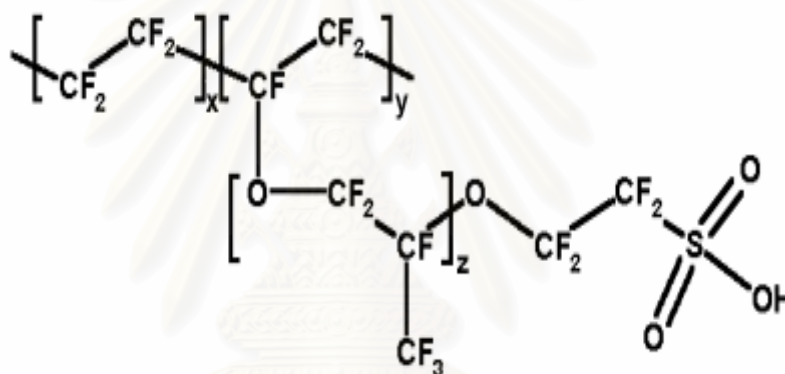
### 2.4 ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (Membrane Electrode Assembly, MEA) [7]

ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอคือเป็นหัวใจสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เนื่องจากเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาและการถ่ายโอนประจุ เอ็มอีเอประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ เมมเบรนซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์และขั้วอิเล็กโทรดที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา การประกอบเอ็มอีเอทำได้โดยการนำขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) มาประกบเข้ากับ

เมมเบรน โดยใช้วิธีการอัดด้วยความร้อน (Hot pressing) จะได้เอ็มซีเอ 1 ชุดเพื่อประกอบเป็น เซลล์เดี่ยว (Single cell) สำหรับนำไปใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 องค์ประกอบหลักของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน มีรายละเอียดดังนี้

#### 2.4.1 เมมเบรน (Membrane) [8-9]

อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มคือ เปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิค เมมเบรน (Perfluorosulfonic membrane) หรือชื่อทางการค้าคือ เนฟิออน เมมเบรน (Nafion membrane) เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Tetrafluoroethylene (Teflon) กับ Perfluoro-3,-6-dioxo-4-methyl-7-octene sulfonic acid โครงสร้างของเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิคแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Perfluorosulfonic membrane หรือ Nafion membrane [2]

ในส่วนของเทฟลอน(Teflon) ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอนซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง จึงทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรงทนทาน ต้านการกัดกร่อนได้ดี และเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในส่วนของโมเลกุลกรดซัลโฟนิค จะสร้างพันธะที่ปลายของพอลิเมอร์กลายเป็นหมู่  $\text{SO}_3^-$  ซึ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) สามารถดูดซับน้ำได้ถึง 13 โมเลกุลต่อหมู่  $\text{SO}_3^-$  1 หมู่ (ในบางกรณีสามารถดูดซับน้ำได้ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) โดยบริเวณที่ดูดซึมน้ำจะเกิดพันธะของการยึดกันระหว่างหมู่  $\text{SO}_3^-$  กับ  $\text{H}^+$  แบบอ่อนๆ จึงทำให้  $\text{H}^+$  สามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้เนฟิออนเมมเบรน (Nafion membrane)[2] มีขนาดและความหนาแตกต่างกัน โดยระบุด้วยตัวอักษร N ตามด้วยตัวเลข 3 หรือ 4 ตัว โดยตัวเลข 2 ตัวแรกแทนค่าของน้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) หารด้วย 100 และตัวเลขตัวสุดท้ายหรือสองตัวสุดท้ายแทนค่าของความหนาของเมมเบรนในหน่วยมิลล์ (mills) (1 mill = 1/1000 inch =

0.0254 mm.) โดยความหนาของเมมเบรนมีตั้งแต่ 2, 3.5, 5, 7 และ 10 mills (50, 89, 127, 178, 254  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ) เช่น Nafion 117 มีน้ำหนักสมมูลเท่ากับ 1100 และ มีความหนา 7 mills (178  $\mu\text{m}$ ) เป็นต้น

คุณสมบัติของเมมเบรนพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์[11]

1. มีค่าการนำไอออนสูงแต่มีค่าการนำอิเล็กตรอนต่ำ
2. มีค่าการแพร่ของแก๊สต่ำ
3. มีขนาดที่แน่นอน
4. มีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง
5. มีการแพร่ของน้ำต่ำ
6. มีความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำ(Dehydration)
7. มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชันและไฮโดรไลซิส
8. มีค่าการถ่ายเทไอออนบวก (Cation) สูง
9. พื้นผิวของเมมเบรนต้องสามารถเชื่อมตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกาะบนพื้นผิวได้ดี

### 2.3.2. ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode)

ขั้วอิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ชั้นแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer) และชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ชั้นแพร่ของแก๊ส (Gas Diffusion layer, GDL)[2] เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ชั้นแพร่ของแก๊สมีความสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงดังนี้

- (i) เป็นทางผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงจากช่องการไหลของแก๊ส (Flow field channel) ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา
- (ii) เป็นทางผ่านสำหรับน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องทางการไหลของแก๊ส
- (iii) เป็นทางผ่านของอิเล็กตรอนจากชั้นแคตตาลิสต์ไปยังแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเพื่อเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า
- (iv) เป็นตัวรองรับเพื่อนำความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า

โดยทั่วไปชั้นแพร่ของแก๊สทำมาจากเส้นใยคาร์บอน(Carbon fiber) นำมาทำเป็นกระดาษเรียกว่า กระดาษคาร์บอน (Carbon paper) หรือนำมาทอเป็นผ้าเรียกว่า ผ้าคาร์บอน (Carbon

cloth) โดยมีความหนาอยู่ในช่วง 100-300  $\mu\text{m}$  ก่อนนำมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพ (Wet proofed) เรียกกระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอนที่ผ่านการปรับสภาพแล้วว่า wet-proofed carbon paper หรือ wet-proofed carbon cloth โดยการปรับสภาพทำโดยการนำกระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอนจุ่มในสารละลายเทฟลอน เพื่อให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งจะผลัดน้ำที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาออกไป ทำให้ไม่เกิดน้ำท่วมบริเวณขั้วอิเล็กโทรด [8]

## 2. ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) [6]

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ในอุณหภูมิปกติจะไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากโมเลกุลมีความเสถียรมาก จำเป็นจะต้องมีตัวกระตุ้นเพื่อให้เกิดการแตกตัว เช่น การเพิ่มอุณหภูมิหรือเติมสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดพลังงานกระตุ้น (Activation Energy,  $E_a$ ) จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นโลหะมีสกุล (Noble metal) เช่น แพลตินัม (Pt) พาลาเดียม (Pd) หรือ นิกเกิล (Ni) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแพลตินัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์มากที่สุด เนื่องจากสามารถทนต่อการกัดกร่อนและว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแก๊สออกซิเจน (ด้านแคโทด) และแก๊สไฮโดรเจน (ด้านแอโนด) ได้ดีกว่าโลหะอื่น แพลตินัมจะถูกเตรียมให้มีขนาดอนุภาคเล็กๆ โดยวางอยู่บนอนุภาคที่ใหญ่กว่าของผงคาร์บอน ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้ผงคาร์บอน XC72 (Cabot)

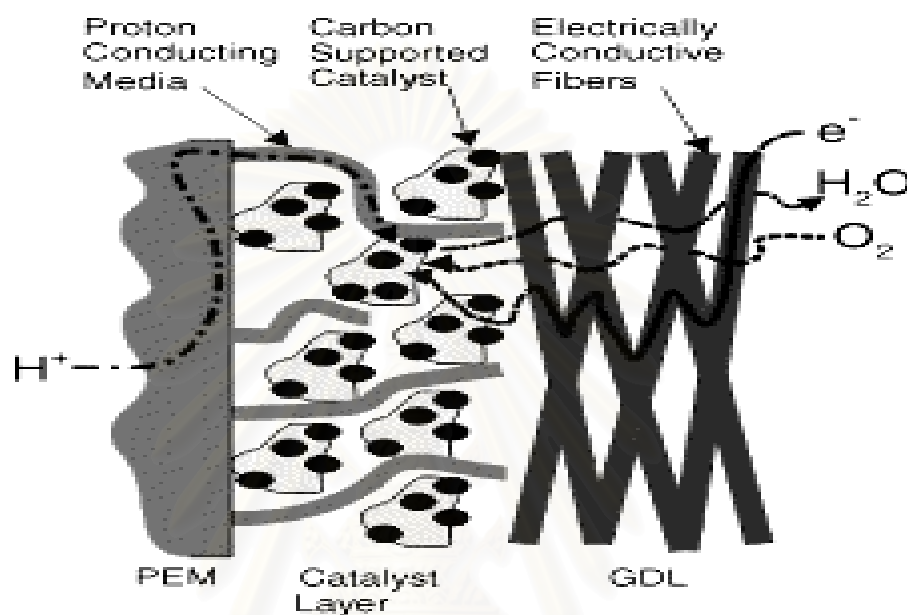
ขั้วอิเล็กโทรดที่ดีต้องมีความต้านทานต่ำ (low resistance) หรือความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าสูง (high conductivity) ต้องเป็นทางผ่านของส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic pathways) เพื่อช่วยกำจัดน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ออกไป สำหรับอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องนำอิเล็กตรอน เพื่อเชื่อมโยงกับวงจรไฟฟ้าภายนอก และต้องมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำเพื่อส่งผ่านแก๊สเชื้อเพลิงและให้แก๊สแพร่กระจายไปยังอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา และต้องมีความพรุนสูงเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด และช่วยให้การเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเป็นไปด้วยดี โดยการเคลื่อนที่ของสารแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน [11] ดังนี้

- (i) โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่จากชั้นแก๊สแพร่ไปยังบริเวณผิวหน้าระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและอิเล็กโทรไลต์
- (ii) เกิดการดูดซับของแก๊สบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการดูดซับจะขึ้นกับพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (Specific surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา



- (iii) โมเลกุลของแก๊สเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา ไอออนบวกหรือโปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปอีกด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้า ซึ่งการเคลื่อนที่ของโปรตอนจะขึ้นอยู่กับความหนาของอิเล็กโทรไลต์

นอกจากนี้ควรมีกระบวนการถ่ายโอนมวลและประจุที่ดีในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงกำลังทำงานแสดงดังรูปที่ 2.4 ดังนี้



รูปที่ 2.4 การถ่ายโอนของแก๊ส โปรตอนและอิเล็กตรอนในขั้วอิเล็กโทรด [5]

กระบวนการถ่ายโอนของแก๊ส โปรตอนและอิเล็กตรอนในขั้วอิเล็กโทรด เป็นดังนี้

1. โปรตอนเคลื่อนที่จากเมมเบรนไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา
2. อิเล็กตรอนจากแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านทางชั้นแก๊สแพร่
3. แก๊สตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้ (น้ำ) จะเคลื่อนที่เข้าและออก จากตัวเร่งปฏิกิริยาและช่องทางเดินแก๊ส

ประเภทของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง มีดังนี้

1. ขั้วอิเล็กโทรดแบบพรุน (Porous electrode)

เป็นขั้วอิเล็กโทรดแบบแก๊สแพร่ (Gas diffusion electrode) ผลิตจากวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า มีความบางและมีรูพรุน โดยจะสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบริเวณที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ (Active site) โดยขั้วอิเล็กโทรดประเภทนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าร้อยละ 90 และจะเกิดได้ดีมากขึ้นหากชั้นอิเล็กโทรไลต์บาง อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้มักมีความหนาอยู่ในช่วง 10

-100 มิลลิเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเรียบของพื้นผิว ลักษณะการกระจายตัวและความหนาของชั้นปฏิกิริยา

## 2. ขั้วอิเล็กโทรดแบบโลหะพรุน (Porous Metal Electrode)

ขั้วอิเล็กโทรดโลหะพรุนเกิดจากการเผาผงโลหะ ผงโลหะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ โดยความแข็งแรงของขั้วอิเล็กโทรดขึ้นกับกระบวนการผลิตและขนาดรูพรุนของขั้วอิเล็กโทรดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของขั้วอิเล็กโทรด ขั้วอิเล็กโทรดที่ได้จะต้องยอมให้แก๊สหรืออิเล็กโทรไลต์ผ่านได้

## 3. Porous Screen Electrode

เป็นขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ในกลุ่มขั้วอิเล็กโทรดแบบพรุน ขั้วอิเล็กโทรดชนิดนี้เตรียมจากการผสมตัวรองรับที่มีสมบัติการนำไฟฟ้ากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชอบน้ำ เช่น แพลทินัมดำ โลหะอัลลอยด์ โดยการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดชนิดนี้เริ่มจากการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่ชอบน้ำ จากนั้นนำไปอัดเย็นทั้งสองข้างตัวรองรับ โดยใช้ความดัน 70 – 210 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ต่อมานำขั้วอิเล็กโทรดที่ได้ไปอัดรีดด้วยความดัน 300-700 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียส เวลา 7.5 นาที และนำไปประกบกับแผ่นเทฟลอน (Teflon) เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊สและเพิ่มความไม่ชอบน้ำ โดยการอัดจะเป็นตัวกำหนดรูพรุนและความหนาของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งจะส่งผลต่อความต้านทานและการเคลื่อนที่ของแก๊ส อิเล็กตรอน และน้ำในขั้วอิเล็กโทรด ขั้วอิเล็กโทรดชนิดนี้นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟอสฟอริกและแอลคาไลน์

ขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มเป็นขั้วอิเล็กโทรดแบบพรุนนิยมใช้กระดาษคาร์บอน (Carbon paper) หรือผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) ที่มีความเป็นรูพรุน เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี

## 2.5 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด

การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเริ่มต้นจากการเตรียมโลหะมีตระกูล (Pt, Pd หรือ Ru เป็นต้น) บนตัวรองรับ (Supporter) เช่น ผงแกรไฟต์ หรือผงคาร์บอน ที่มีความเป็นรูพรุนสูง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจึงนำไปเตรียมเป็นสารละลายผสมหรือน้ำหมึก (Ink) เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

## 2.5.1 วิธีการเตรียมน้ำหมึก (Ink) สำหรับขั้วอิเล็กโทรด [8]

ในกระบวนการเตรียมน้ำหมึกโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จะให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระจายตัวอยู่ อิมตัวด้วย ionomer ส่วนที่ 2 จะให้คาร์บอนรวมตัวกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ จากนั้นจึงนำทั้งสองส่วนมาผสมกันในอัตราส่วนที่ได้ทำการคำนวณแล้วผสมเข้าด้วยกัน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมน้ำหมึก คือ อัตราส่วนระหว่าง ionomer กับคาร์บอน (I/C) ปริมาณที่เหมาะสมและการกระจายตัวของ ionomer ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีความสมดุลเพื่อให้ขั้วอิเล็กโทรดมีความต้านทานน้อย ionomer สัมผัสกับอนุภาคของแพลทินัมมากที่สุดและทางเข้าของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องผ่านรูพรุนของแก๊สมากที่สุด โดยปริมาณที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวหน้าของคาร์บอน เพราะเหตุนี้จึงต้องเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ I/C มากกว่าอัตราส่วนของ I/ (Pt+C) เช่น พื้นที่ผิวหน้าของ Vulcan คาร์บอนมี ionomer ที่เหมาะสมในขั้วอิเล็กโทรด 30 wt.%

เนฟิออน ionomer ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มพื้นที่ three-dimensional zone ของความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic activity) โดยเนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้การสัมผัสของ 3 เฟสของแก๊สเชื้อเพลิง อิเล็กโทรไลต์ (เนฟิออน) และตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยรักษาความชื้นและป้องกันการสูญเสียน้ำของเมมเบรน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญต่อสมรรถนะที่ดีของเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากสามารถช่วยลดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic) และค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการถ่ายโอนมวล (Mass transport overpotential) ในอิเล็กโทรดได้ ถ้าปริมาณของเนฟิออนน้อยมากๆ จะส่งผลให้การสัมผัสของอิเล็กโทรไลต์กับตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ดีและส่งผลให้สมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดไม่ดี และถ้าปริมาณของเนฟิออนมากเกินไปก็เป็นสาเหตุให้สมรรถนะของขั้วอิเล็กโทรดลดลง เนื่องจากจะเป็นตัวขัดขวางตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา ขัดขวางรูพรุนของขั้วอิเล็กโทรด ลดความสามารถในการซึมผ่านได้ของแก๊ส (Gas permeability) และเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการถ่ายโอนมวล

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาสูตรการคำนวณหาปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมในขั้วอิเล็กโทรด เช่น G. sasikumar และคณะ [12] ได้เสนอสูตรการหาปริมาณเนฟิออน ดังแสดงในสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$\text{Wt. \% Nafion} = \frac{\text{dry wt. of Nafion} \times 100}{\text{wt. of Pt/C catalyst} + \text{dry wt. of Nafion}} \quad 2.12$$

และ Antolini และคณะ [13] ได้เสนอสูตรการคำนวณหาปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสม ดังสมการที่ 2.13 คือ

$$\text{Nafion loading (mg/cm}^2\text{)} = 56 \times \frac{L_{Pt}}{P_{Pt}} \quad 2.13$$

โดยที่  $L_{Pt}$  คือ ปริมาณแพลทินัม (Platinum loading, mg/cm<sup>2</sup>) และ  $P_{Pt}$  คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของแพลทินัมในคาร์บอน (wt.% Pt/C)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการคำนวณจากงานวิจัยของ G. sasikumar และคณะ มาใช้ในการคำนวณหาปริมาณเนฟิออน เพื่อนำไปศึกษาผลของปริมาณเนฟิออน

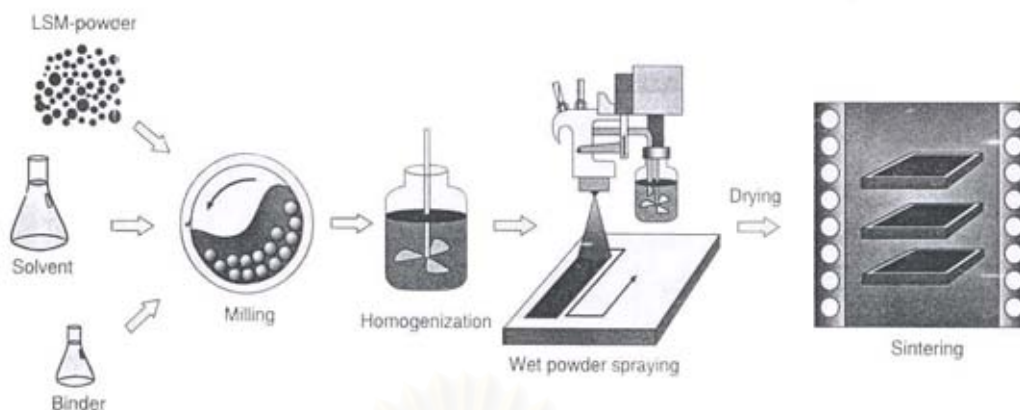
### 2.5.2 เทคนิคการป้อนน้ำหมึก [8]

มีเทคนิคต่างๆ มากมายที่จะป้อนน้ำหมึกลงบนเมมเบรนหรือชั้นแก๊สแพร์ เช่น การทาหรือการระบาย (Painting) การสเปรย์ (Spraying) การสกรีน (Screen painting) การเคลือบ (Coating) และการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) เป็นต้น

#### 1. การสเปรย์ (Spray)

ในกระบวนการสเปรย์ สารละลายที่ใช้จะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ตัวเร่งปฏิกิริยามีความละเอียด ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำไปสเปรย์บนแผ่นรองรับ แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่ก็ได้ โดยทั่วไปมักใช้กระดาษคาร์บอน หรือผ้าคาร์บอน ขั้นตอนการทำแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเริ่มจากนำผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับตัวทำละลายและส่วนผสมอื่น ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปพ่นบนตัวรองรับ หลังจากนั้นนำไปประเหยให้แห้ง ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมด้วยวิธีนี้คือ ความหนืด (Viscosity) ของสารผสมก่อนการสเปรย์และระยะเวลาในการแห้ง (Drying time) ของตัวเร่งปฏิกิริยา

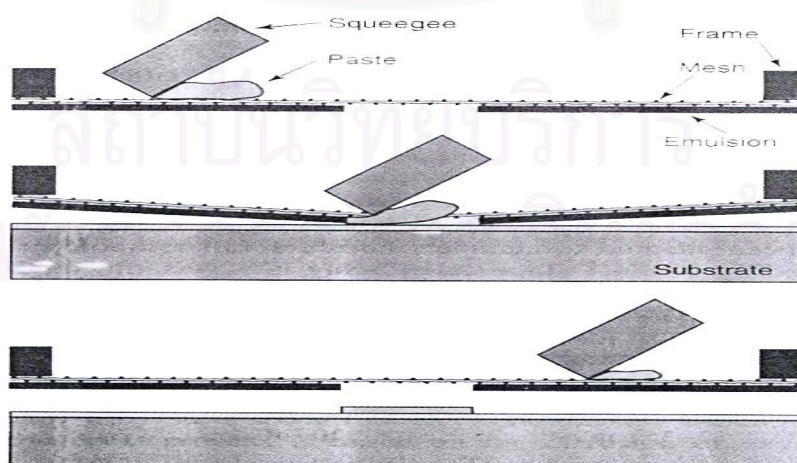
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 กระบวนการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดด้วยวิธีการสเปรย์ [14]

## 2. การทาหรือการระบาย (Painting or brushing)

กระบวนการทำให้สารละลายที่มีส่วนผสมเหมือนกับการสเปรย์แต่สารผสมจะมีความหนืดสูงกว่าการสเปรย์ และต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง แล้วนำไปทาบนแผ่นรองรับด้วยแปรงหรือแม่พิมพ์ แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่ก็ได้ แผ่นรองรับที่มีความพรุนที่นิยมใช้ได้แก่ กระดาษคาร์บอน หรือ ผ้าคาร์บอน เป็นต้น ถ้ามีการใช้แผ่นรองรับเป็นขั้วอิเล็กโทรดจะมีชั้นแพร่ (Diffusion layer) เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงและรักษาระดับน้ำในเซลล์ แต่ถ้าไม่ใช้แผ่นรองรับหรือใช้แผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุน เมื่อทำการอัดขั้วอิเล็กโทรดเข้ากับเมมเบรนจะต้องนำแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนออก โดยทั่วไปแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนที่นิยมใช้จะเป็นพอลิเอทิลีนที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอน โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดด้วยวิธีการพิมพ์ [8]



### 3. การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) [15]

วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าอาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า คือการทำให้โลหะไปเกาะบนผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการ ในที่นี้คือขั้วอิเล็กโทรดหรือกระดาษคาร์บอน ขั้นตอนการพอกพูนเริ่มจากจุ่มกระดาษคาร์บอนลงในสารละลายที่มีโลหะที่ต้องการให้เกิดการพอกพูน จากนั้นป้อนกระแสไฟฟ้าให้ชิ้นงานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ได้เป็นชั้นโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพอกพูนบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จากนั้นจึงนำไปล้างให้ปราศจากไอออนต่างๆ แล้วทำให้แห้ง และชั่งน้ำหนัก

### 2.6 การอัดด้วยความร้อนในการประกอบขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (Hot pressing/ assembly of MEA [8])

โดยทั่วไปขั้วอิเล็กโทรดหรือชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำขึ้นโดยเทคนิคการอัดพิมพ์ (Decal method) หรือการเคลือบ (Coating) โดยตรงบนเมมเบรนหรือชั้นแก๊สแพร่ โดยอุณหภูมิที่ใช้อัดด้วยความร้อนควรมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วของเนฟลอนเมมเบรนคือประมาณ  $150^{\circ}\text{C}$  (อุณหภูมิที่เมมเบรนเนฟลอนเริ่มเสื่อมสภาพ) เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว เมมเบรนจะมีการแลกเปลี่ยนโปรตอนและการสัมผัสของไอออนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างดี และที่อุณหภูมิสูงกว่า  $150^{\circ}\text{C}$  จะทำให้เมมเบรนสูญเสียคุณสมบัติในการกักน้ำ (Water retention) ทำให้มีความเป็นกรดมากขึ้น ส่งผลให้ ionomer มีสมบัติแย่งและทำให้ขั้วอิเล็กโทรดแยกออกจากเมมเบรน ดังนั้นการอัดด้วยความร้อนโดยทั่วไปจะใช้ความดันในช่วง 5000 – 15000 kPa อุณหภูมิ 120 –  $160^{\circ}\text{C}$  และเวลา ประมาณ 1 – 5 นาที ในการอัดขั้วอิเล็กโทรดบนเมมเบรนต้องแน่ใจว่าขั้วอิเล็กโทรดยึดติดกับเมมเบรนอย่างแข็งแรง และเพื่อป้องกันไม่ให้เมมเบรนแห้งเกินไปขณะอัดด้วยความร้อน จึงมีกระบวนการที่เรียกว่า การอัดด้วยไอน้ำ (Steam pressing) โดยการนำเมมเบรนจุ่มในน้ำและทำการป้องกันไม่ให้น้ำไหลออก จากนั้นนำไปอัดด้วยความร้อนที่ความดันไอน้ำ

### 2.7 โพล่าไรเซชัน (Polarization)

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงอธิบายได้จากกราฟโพล่าไรเซชัน (Polarization curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่อเข้ากับวงจรภายนอกและมีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ แต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จาก



เซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าที่ลดลงไม่เท่ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี หรือที่ได้จากกระบวนการผันกลับได้ (Reversible process) ซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนจะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีประมาณ 1.299 โวลต์ ซึ่งผลต่างระหว่างค่าความต่างศักย์จริงที่จ่ายให้กับวงจรภายนอกกับค่าความต่างศักย์ตามกระบวนการผันกลับได้ตามหลักของอุณหพลศาสตร์ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Over potential) การลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงเกิดในกระบวนการที่เรียกว่า โพลาริเซชัน (Polarization) โดยการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง ( $E_{cell}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E_{cell} = E_{cell}^o - |\varepsilon_c| - |\varepsilon_a| - IR \quad 2.14$$

โดยที่  $E_{cell}^o$  คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (โวลต์)

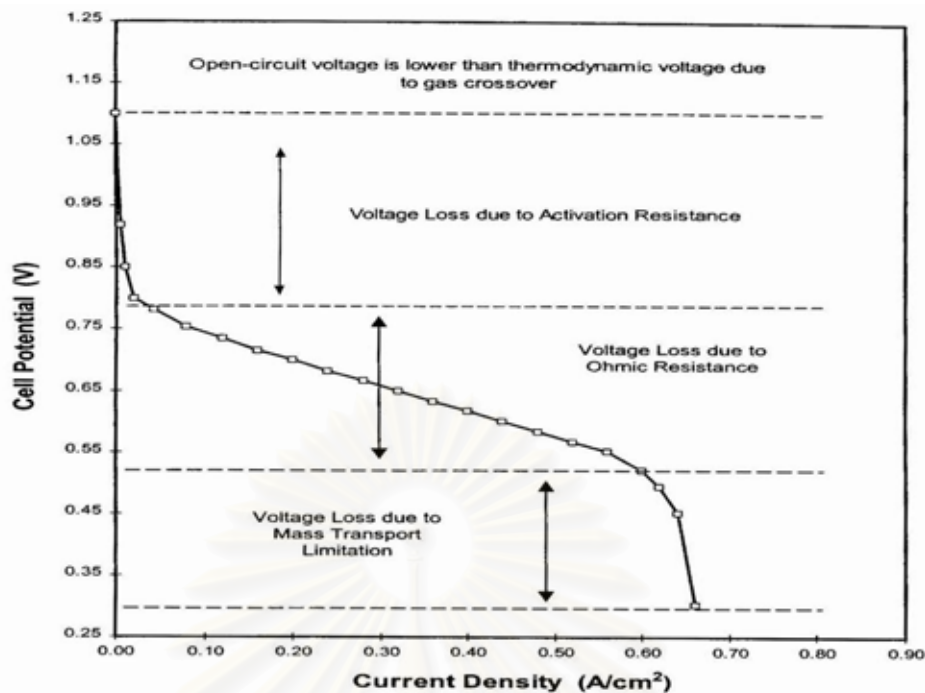
$\varepsilon_c$  คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด (โวลต์)

$\varepsilon_a$  คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด (โวลต์)

$IR$  คือ เทอมของศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง มาเขียนกราฟโพลาริเซชันจะได้กราฟแสดงในรูปที่ 2.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 โพล่าไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ [6]

รูปที่ 2.7 พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับศูนย์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี โดยเรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open-circuit potential) ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดจากการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (crossover) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเมมเบรน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งหนึ่งจะมีการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนทางฝั่งขั้วแคโทด จึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันภายในขั้วแคโทดเดียวกัน ส่งผลให้เกิดกระแสภายใน (internal current) [3] ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินขึ้นที่ขั้วแคโทด เช่นเดียวกันกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของแก๊สออกซิเจน ก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง

เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.7 พบว่าเกิดการลดลงของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากกลไกต่างๆ โดยเมื่อสังเกตจากรูปจะพบว่าสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพล่าไรเซชันได้เป็น 3 ช่วงคือ

1. โพล่าไรเซชันทางเคมี (Chemical Polarization) หรือ Activation losses เป็นค่าการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงไปเนื่องมาจากการเอาชนะพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และความดัน ถ้าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะเกิดโพล่าไรเซชันทางเคมีมาก การลดค่าโพล่าไรเซชันทางเคมีสามารถทำได้

โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง การเพิ่มความดัน เป็นต้น

2. โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization) เกิดจากความต้านทานในแต่ละองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดและที่บริเวณแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเมมเบรน

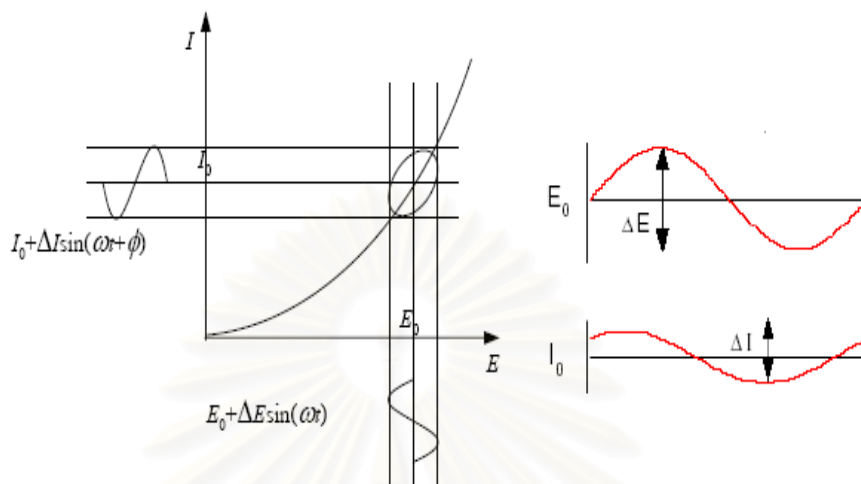
3. โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization) เกิดเนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดส์ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วจนไม่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรด ทำให้ความเข้มข้นหรือความดันของสารตั้งต้นขาดแคลน เป็นผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนิร์นสต์ ในกรณีที่ใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์มักจะไม่มีปัญหาที่เกิดขึ้น แต่เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์จะเกิดปัญหานี้ขึ้นเนื่องจากในอากาศมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยกว่ามาก ดังนั้นเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์จำเป็นจะต้องมีการออกแบบช่องทางเดินแก๊สให้อากาศสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ เพื่อให้ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศสามารถแพร่เข้าไปยังบริเวณขั้วอิเล็กโทรดให้มากที่สุด ทางด้านไฮโดรเจนก็มีโอกาสที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้เช่นกัน อาจเกิดจากกรณีที่ไฮโดรเจนที่ใช้ได้มาจากกระบวนการรีฟอร์มมิง (Reforming) โดยกระบวนการผลิตไม่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบได้อย่างต่อเนื่องทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนบริเวณขั้วอิเล็กโทรดลดลงทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินมากขึ้น

## 2.8 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) [17-18]

อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าหรือ EIS เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ระบบเคมีไฟฟ้า โดยช่วยแยกแยะบทบาทของลักษณะทางกายภาพและปรากฏการณ์ทางเคมีไฟฟ้าในระหว่างการทำงาน ด้วยการทดลองเพียงขั้นตอนเดียว โดยรวบรวมการตอบสนองของระบบตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน

หลักการของเทคนิค EIS มีหลักการคล้ายกับวิธีอิมพีแดนซ์ทั่วไป โดยทำการป้อนสัญญาณกระตุ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าแอมพลิจูดต่ำไปยังระบบภายใต้การวิเคราะห์และวัดการตอบสนองในรูปของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า หรือสัญญาณอื่นๆ ที่สนใจ จากรูปที่ 2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า ของระบบไฟฟ้าเคมีในเชิง

ทฤษฎี โดยที่  $I_0$  คือ กระแสไฟฟ้ากระแสตรง  $E_0$  คือ ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม  $t$  คือ เวลา และ  $\phi$  คือ การเลื่อนเฟส (Phase shift)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี [17]

ค่าอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อนระหว่างขนาดและการเลื่อนเฟสซึ่งขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ โดยทั่วไปในระบบเคมีไฟฟ้าจะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 100 กิโลเฮิรตซ์ ไปจนถึง 0.1 เฮิรตซ์ โดยสามารถเขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = |Z(\omega)|e^{j\varphi(\omega)} \quad (2.15)$$

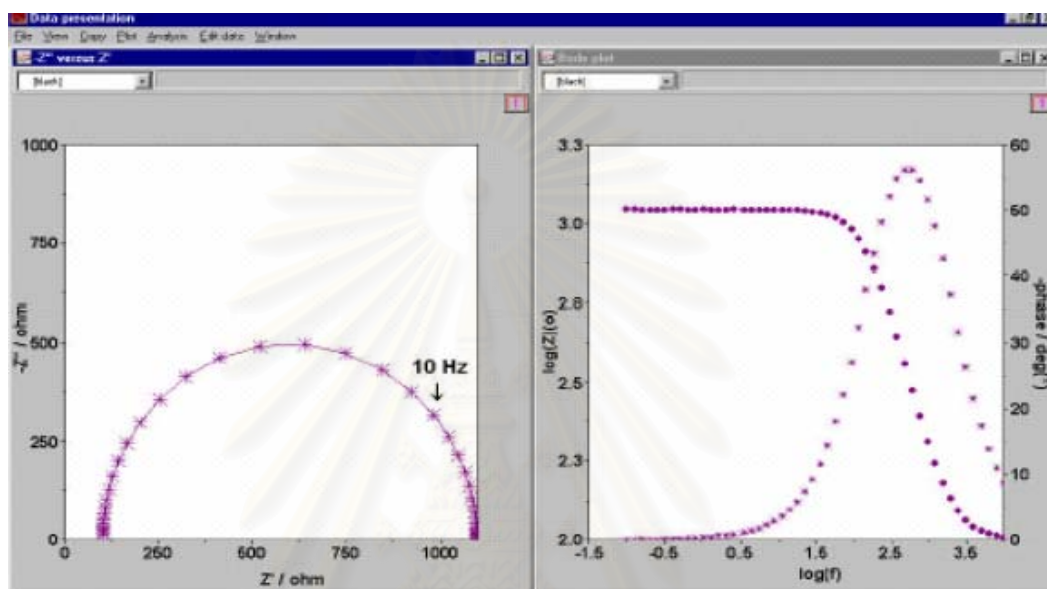
เมื่อ  $|Z(\omega)|$  คือขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่  $\omega$  และ  $\varphi(\omega)$  คือการเลื่อนเฟสที่ความถี่  $\omega$  สำหรับฟังก์ชันที่เขียน อิมพีแดนซ์เขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ_j(\omega) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $Z_r(\omega)$  คือส่วนจริง (Real part) ของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่  $\omega$  และ  $Z_j(\omega)$  คือส่วนจินตภาพ (Imaginary part) ที่ความถี่  $\omega$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เรียกว่า Nyquist plot ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ข้อดีของ Nyquist plot คือสามารถแสดงภาพรวมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและยังสามารถอธิบายได้ในเชิงคุณภาพ โดยที่แกนของส่วนจริงจะมีค่าเท่ากับแกนของส่วนจินตภาพเพื่อจะไม่ไปปิดเป็นรูปร่างของเส้นกราฟ ทั้งนี้รูปร่างของเส้นกราฟมี

ความสำคัญในการอธิบายเชิงคุณภาพของข้อมูล ข้อเสียของ Nyquist plot คือการไม่ได้แสดงมิติของความถี่ ทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการระบุค่าความถี่ลงบนกราฟ ส่วนค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์และการเลื่อนของเฟสจะเขียนได้ในรูปฟังก์ชันของความถี่โดยทั้งสองกราฟสามารถเขียนรวมกันได้ในรูปแบบของ Bode plot ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) ซึ่งจะทำให้การแสดงผลของข้อมูลมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.9 Nyquist plot (ก) และ Bode plot (ข) [18]

เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอิมพีแดนซ์ จะประกอบไปด้วยขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 2, 3 หรือ 4 ขั้ว เซลล์พื้นฐานที่สุดจะประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 2 ขั้ว โดยปกติขั้วอิเล็กโทรดภายใต้การวิเคราะห์จะเรียกว่า ขั้วอิเล็กโทรดทำงาน (Working Electrode) และขั้วอิเล็กโทรดที่ทำให้วงจรไฟฟ้าครบวงจรเรียกว่า ขั้วอิเล็กโทรดสมทบ (Counter Electrode) ขั้วอิเล็กโทรดมักจะจุ่มอยู่ในสารพาประจุที่เป็นของเหลว สำหรับระบบของแข็งก็อาจใช้สารพาประจุซึ่งเป็นของแข็ง หรืออาจไม่มีสารพาประจุก็ได้

ในที่นี้จะขอลงถึงโครงสร้างของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 3 ขั้ว ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุด ขั้วอิเล็กโทรดชนิดที่สามนี้ คือขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการกำหนดศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดทำงานให้มีความแน่นอน เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าสัมบูรณ์ของขั้วอิเล็กโทรดเดี่ยวไม่สามารถวัดค่าได้ การวัดค่า



ศักย์ไฟฟ้าในระบบเคมีไฟฟ้าจึงใช้ขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงเป็นหลักในการทำงาน เพราะฉะนั้นขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงจึงควรมีความผันกลับ (Reversible) ไปมาได้ และศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงควรมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการวัด

โดยทั่วไปการทดลองอิมพีแดนซ์จะทำภายใต้การควบคุมศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยก็ใช้วิธีการนี้ รูปแบบของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะทำการทดลองโดยการกำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง แล้วเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในรูปฟังก์ชันไซน์เข้าไปรบกวนศักย์ไฟฟ้าและนำไปใช้กับเซลล์ ค่ากระแสไฟฟ้าจะถูกวัดเพื่อนำไปประมวลค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่จะทำงานในรูปกระแสไฟฟ้าสลับ โดยทั่วไปการวัดจะทำในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์ฟังก์ชันเดียว แต่หากใช้ฟังก์ชันไซน์แบบหลายฟังก์ชันจะช่วยให้ประหยัดเวลาเมื่อทำการวัดที่ความถี่ต่ำมากๆ โดยสัญญาณกระตุ้นที่ใช้มักมีขนาดเล็กๆ ประมาณ 10 mV ภายใต้ช่วงความถี่ที่ใช้ถูกกำหนดโดยข้อจำกัดของเครื่องมือและระบบ ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดของแต่ละค่าความถี่คือส่วนกลับของค่าความถี่นั่นเอง ดังนั้น เมื่อความถี่ต่ำมากๆ จะใช้เวลายาวมากเช่นกันในการอ่านข้อมูลอย่างสมบูรณ์ เช่น การวัดข้อมูลที่ค่าความถี่ 1 mHz จะใช้เวลา 1000 วินาที โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 100 kHz - 0.1 Hz ซึ่งจะใช้เวลาในการวัดทั้งสิ้นประมาณ 10 นาที อิมพีแดนซ์ที่ได้สามารถแปลให้อยู่ในรูปของวงจรมุมลทางไฟฟ้า (Equivalent circuit) และแบบจำลองของกระบวนการ ซึ่งจะช่วยให้สามารถประมาณขอบเขตที่ใช้อธิบายข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้อย่างเหมาะสม และยังสามารถช่วยในการคาดการณ์พฤติกรรมของระบบภายใต้ภาวะที่หลากหลายได้

วงจรมุมลทางไฟฟ้าได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในการแปลข้อมูลอิมพีแดนซ์ โดยวงจรมุมลทางไฟฟ้าสร้างขึ้นมาจากองค์ประกอบที่เป็นที่รู้จักกันดี เช่น ความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และ ขดลวดเหนี่ยวนำ รวมไปถึงองค์ประกอบอื่นๆ เช่น Constant Phase Element อิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์กและอิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะต่อกันแบบอนุกรมหรือขนาน เพื่อให้วงจรมุมลทางไฟฟ้ามีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้องค์ประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

องค์ประกอบของวงจร	อิมพีแดนซ์	การเลื่อนของเฟส
ความต้านทาน (Resistance, $R$ )	$R$	0
ตัวเก็บประจุ (Capacitance, $C$ )	$\frac{1}{j\omega C}$	-90
ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, $L$ )	$j\omega L$	+90
Constant Phase Element, $CPE$	$\frac{1}{(j\omega C)^\alpha}$	-
อิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์ก (Warburg Impedance)	$\frac{R}{\sqrt{j\omega}}$	-
อิมพีแดนซ์แบบแทนเจนต์ (Tangent Impedance)	$R \frac{\tanh \sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}}$	-

### 2.8.1. ตัวต้านทาน (Resistance, $R$ )

ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน แสดงได้ดังสมการที่ 2.17 คือ

$$Z = R \quad (2.17)$$

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะไม่ขึ้นกับค่าความถี่ และไม่มีส่วนจินตภาพ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานจะมีเฟสเดียวกับศักย์ไฟฟ้าเสมอ ตัวอย่างตัวต้านทานที่ใช้อธิบายระบบเคมีไฟฟ้า ได้แก่

- Ohmic Resistance,  $R_\Omega$  คือความต้านทานที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด อ่างอิงบางครั้งอาจแทนด้วย  $R$  นอกจากนี้ค่าความต้านทานนี้ยังขึ้นกับการเหนี่ยวนำของเมมเบรนและลักษณะของขั้วอิเล็กโทรด

- Polarization Resistance,  $R_p$  จากการที่ขั้วอิเล็กโทรดมีความเป็นขั้วมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดถูกบังคับให้เลื่อนไปจากศักย์ไฟฟ้าขณะวงจรเปิดเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้านั้นจะทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของขั้วอิเล็กโทรด ขนาดของกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยพลศาสตร์ของปฏิกิริยา และการแพร่เข้า-ออกของสารตั้งต้นที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรด

### 2.8.2. ตัวเก็บประจุ (Capacitance, C)

ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ แสดงได้ดังสมการที่ 2.18 คือ

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.18)$$

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ขึ้นขึ้นอยู่กับค่าความถี่และจะมีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้น และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสเลื่อนไป  $-90^\circ$  เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า ตัวอย่างของตัวเก็บประจุที่ใช้อธิบายระบบเคมีไฟฟ้า เช่น Double Layer Capacitance,  $C_{dl}$  ซึ่ง double layer เปรียบเสมือนที่เก็บประจุจากสารละลายที่จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากบริเวณรอยต่อของขั้วอิเล็กโทรดและเมมเบรนมี Electrical double layer เกิดขึ้น ค่า double layer capacitance ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด อุณหภูมิ ความหนาแน่นของประจุ ชนิดของประจุ ความบริสุทธิ์ของสาร การดูดซึม เป็นต้น

### 2.8.3 Constance Phase Element, CPE

ในการอธิบายระบบเคมีไฟฟ้ามักใช้ตัวเก็บประจุอุดมคติ นั่นคือสมมติให้ลักษณะของพื้นผิวที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเดียวกันตลอดทั้งแผ่น ซึ่งปกติแล้วจะเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงมีการใช้ CPE อธิบายในส่วนที่พื้นผิวไม่เป็นลักษณะเดียวกัน แสดงดังสมการที่ 2.19

$$Z = \frac{1}{(j\omega C)^\alpha} \quad (2.19)$$

เมื่อ C คือตัวเก็บประจุอุดมคติ และ  $\alpha$  คือ ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 โดยที่ค่า  $\alpha = 1$  CPE จะทำหน้าที่เสมือนตัวเก็บประจุอุดมคติ

### 2.8.4 Warburg Impedance, $Z_{\text{war}}$

ในระบบเคมีไฟฟ้าจะมีการแพร่ของประจุระหว่างรอยต่อเกิดขึ้น จึงได้มีการพัฒนา Warburg Impedance ขึ้นเพื่ออธิบายปรากฏการณ์นี้ โดยมีการตั้งค่า Warburg Impedance ไว้หลายแบบ โดยแบ่งตามสมมติฐานที่ใช้ เพื่อใช้อธิบายค่าอิมพีแดนซ์ของการแพร่ที่เกิดขึ้น

กรณีที่สมมติฐานเป็นชั้นการแพร่ที่ไม่จำกัดขอบเขต (Infinite diffusion or Warburg diffusion) ค่าอิมพีแดนซ์แสดงดังสมการที่ 2.20

$$Z = \frac{R}{\sqrt{j\omega}} \quad (2.20)$$

กรณีที่สมมติฐานเป็นชั้นการแพร่ที่จำกัดขอบเขตค่าอิมพีแดนซ์แสดงดังสมการที่ 2.21

$$Z = R \frac{\tanh \sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}} \quad (2.21)$$

$$\tau = \frac{\delta^2}{D} \quad (2.22)$$

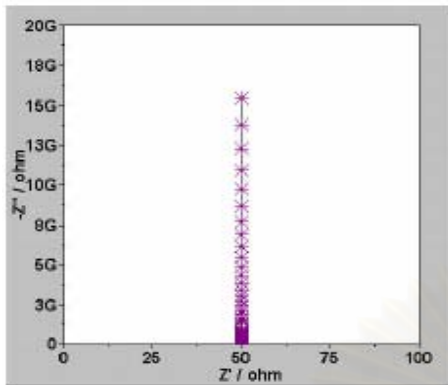
### 2.8.5 ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, $L$ )

ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำดังสมการ (2.23) โดยค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น และจะมีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้นเหมือนตัวเก็บประจุ แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะมีเฟสเลื่อนไป  $+90^\circ$  เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า  $\phi$

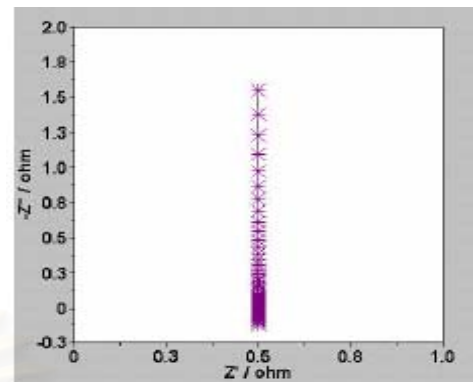
$$Z = j\omega L \quad (2.23)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีบางครั้งก็เป็นผลมาจากการดูดซับของสารตั้งต้นบนพื้นผิว ซึ่งจะสามารถสร้างแบบจำลองโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำแทนได้นั่นเอง นอกจากนี้การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า การตอบสนองที่ช้าของขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง

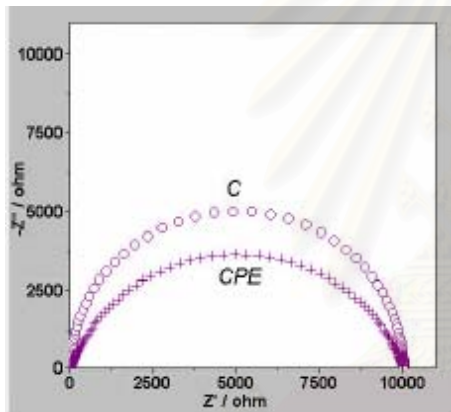
### 2.8.6 รูปแบบของอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ



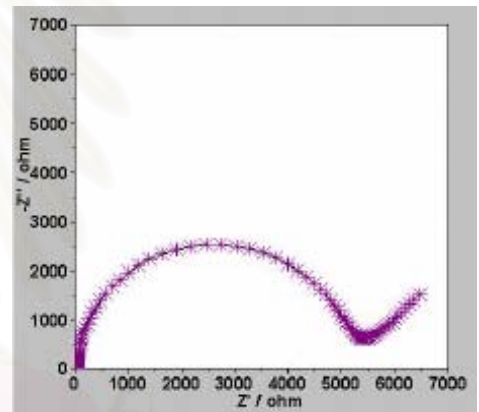
(ก)



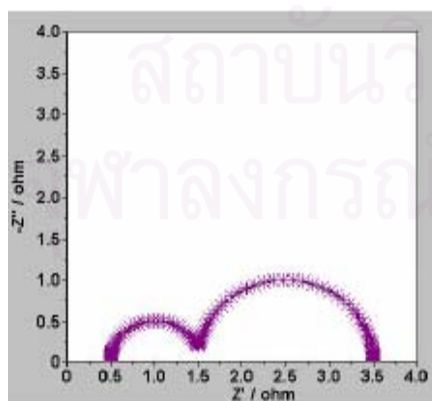
(ข)



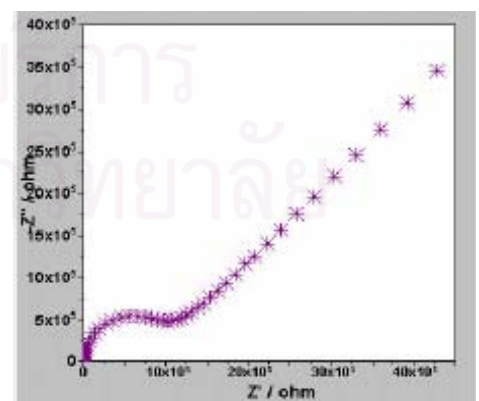
(ค)



(ง)



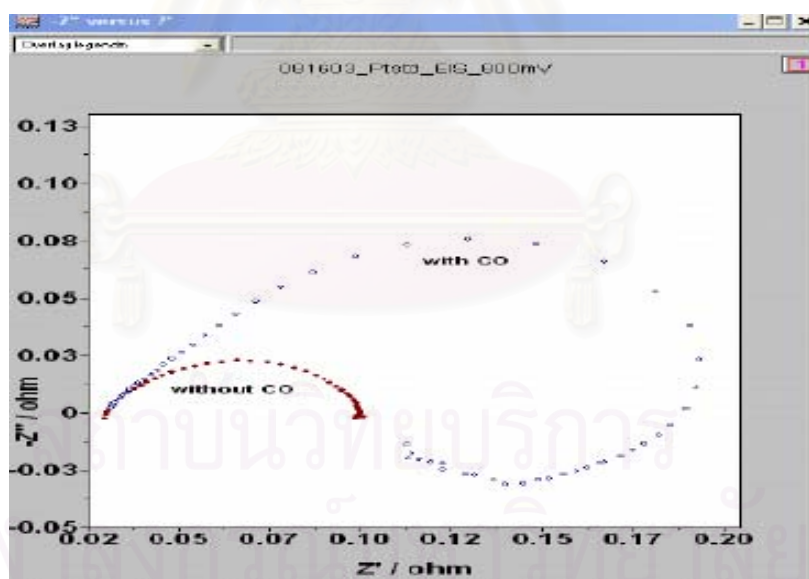
(จ)



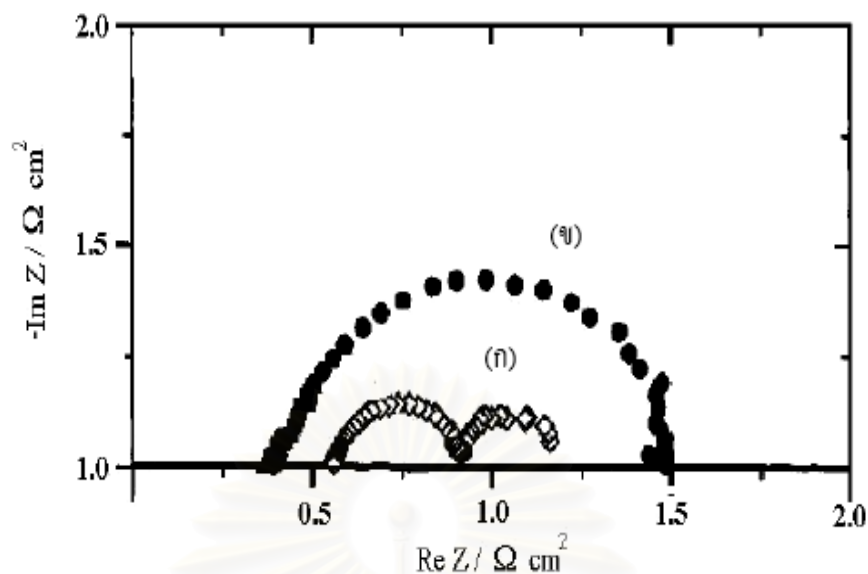
(ฉ)

รูปที่ 2.10 รูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเคมีไฟฟ้า [17]

รูปที่ 2.10 (ก) แสดงถึง Nyquist plot ของระบบที่ประกอบไปด้วยความต้านทานไอห้มีก ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุเท่านั้นโดยรูปแบบนี้จะเกิดขึ้นกับระบบที่เกี่ยวกับการเคลือบโลหะ (Coating) รูปที่ 2.10 (ข) เป็นระบบที่ประกอบไปด้วยความต้านทานไอห้มีก ตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำโดยที่ทั้ง 3 ตัวต่ออนุกรมกัน สำหรับอิมพีแดนซ์ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นกับระบบของตัวเก็บประจูง่วงรูปที่ 2.10 (ค) เป็นรูปแบบพื้นฐานที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงและระบบการกัดกร่อน (Corrosion) ซึ่งจะประกอบไปด้วยความต้านทานไอห้มีก ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุและตัวเก็บประจุหรือ CPE รูปที่ 2.10 (ง) แสดงถึงลักษณะของอิมพีแดนซ์ที่สัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดและการแพร่ของสารตั้งต้นที่เข้าไปทำปฏิกิริยาโดยดูได้จากบริเวณความถี่ต่ำจะเห็นเส้นตรงทำมุม 45 องศา ซึ่งเรียกอิมพีแดนซ์บริเวณความถี่ต่ำนี้ว่าอิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์ก รูปที่ 2.10 (จ) เป็นอิมพีแดนซ์ของระบบเคมีไฟฟ้าที่มีขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว เช่น แบตเตอรี่และเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น รูปที่ 2.10 (ฉ) เป็นอิมพีแดนซ์ของการเคลือบสารอินทรีย์บนผิวของโลหะโดยการจุ่มลงในสารละลาย รูปที่ 2.11 เป็นรูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง และรูปที่ 2.12 (ก) และ (ข) เป็นรูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่เกิदन้าท่วม



รูปที่ 2.11 รูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง [18]



รูปที่ 2.12 รูปแบบอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่เกิดน้ำท่วม [18]

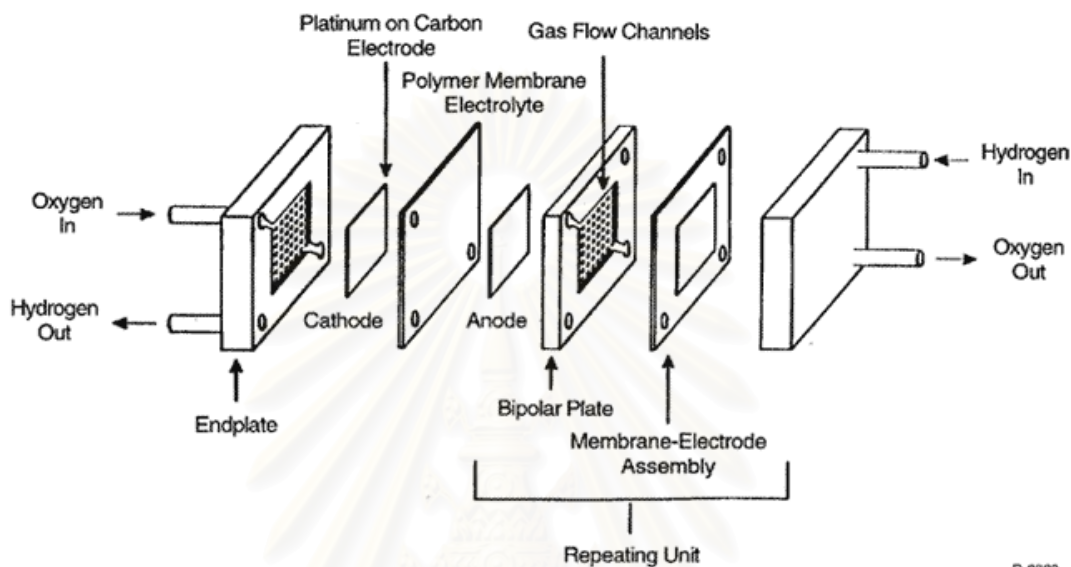
## 2.9 การประกอบเซลล์เดี่ยว (Single cell) และหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stacks)

จากทฤษฎีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจนและออกซิเจนของเซลล์เชื้อเพลิงพีเอ็ลมี 1 เซลล์ เท่ากับ 1.23 โวลต์ แต่ในการทำงานจริงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า 1 โวลต์ ถ้าเซลล์เดี่ยวต้องการที่จะผลิตกำลังไฟฟ้าที่ 1 กิโลวัตต์ จำเป็นต้องผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 1000 แอมแปร์ โดยต้องมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า 1000 ตารางเซนติเมตร และต้องใช้สายไฟที่มีความหนามากในการดึงกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงผ่านตัวดึงกระแสไฟฟ้า (Load) เพื่อให้มีการสูญเสียจากความต้านทานน้อยที่สุด ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำเซลล์เชื้อเพลิงหลายๆเซลล์มาต่อกันแบบอนุกรม เรียกว่า หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stack) [2]

หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีเอ็ลมีประกอบด้วยเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์เรียงซ้อนกันแบบอนุกรม โดยองค์ประกอบของเซลล์เดี่ยวประกอบด้วยแผ่นเอ็มอีเอที่ถูกระบายด้วยแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า โดยป้องกันการรั่วของแก๊สในแต่ละด้านของแผ่นเอ็มอีเอด้วยประเก็น (Gasket) และแก๊สที่ให้กับเซลล์เชื้อเพลิงจะกระจายไปทั่วผิวหน้าของเอ็มอีเอโดยผ่านช่องทางเดินแก๊สบนผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า ซึ่งแผ่นประเก็นจะประกบในแต่ละด้านของเอ็มอีเอโดยจะเว้นช่องไว้สำหรับขั้วอิเล็กโทรดหรือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Active area) การป้องกันการรั่วของแก๊สที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีพื้นที่ของเมมเบรนตรงบริเวณขอบของแผ่นเอ็มอีเอเหลือพอสำหรับการประกบกับแผ่นประเก็นพร้อมกับการยึดตรึงที่แน่นหนา โดยระหว่างแผ่นสะสมกระแสจะมีแผ่นปิดท้าย (End plate) ในแต่ละด้านของตัวเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงอีกชั้นหนึ่ง สำหรับ



การประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ทำโดยการเพิ่มแผ่นสะสมกระแสที่มีหน้าของช่องทางเดินแก๊ส ทั้งสองหน้าหรือ Bipolar plate แทรกอยู่ระหว่างเซลล์เดี่ยวซึ่ง Bipolar plate ทำหน้าที่เป็นทั้ง ขั้วบวกและขั้วลบในเวลาเดียวกัน ซึ่งจำนวนหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับจำนวนของ Bipolar plate ที่แทรกระหว่างเซลล์เดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2. 13



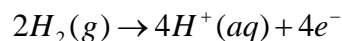
รูปที่ 2.13 การประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ [19]

สำหรับปริมาณเชื้อเพลิงที่เซลล์เชื้อเพลิงใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดยตรงจากปริมาณกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตออกมา เพื่อเกิดปฏิกิริยาสุดท้ายได้น้ำออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ และสามารถทราบปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาได้จากการคำนวณปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปโดยตัวต้านทานภายนอก

อัตราการใช้แก๊สไฮโดรเจนในปฏิกิริยาเป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าที่ให้ออกมา (Output current) ซึ่งกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์ (Ampere) หมายถึง จำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าต่อวินาที ในแต่ละโมเลกุลของไฮโดรเจนจะประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว ดังนั้นการวัดกระแสไฟฟ้า ก็คือ การวัดจำนวนของโมเลกุลของไฮโดรเจนที่แตกตัวให้อิเล็กตรอนออกมา ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอัตราการใช้แก๊สไฮโดรเจนสามารถคำนวณได้ดังนี้ [20]

จากความรู้พื้นฐานทางเคมีในการคำนวณปริมาณของสารจากสมการเคมี ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารในสมการเคมี มีดังนี้

พิจารณาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด ดังนี้



จากปฏิกิริยาจะเห็นว่าแก๊สไฮโดรเจน 1 โมลจะแตกตัวให้อิเล็กตรอน 2 โมลอิเล็กตรอนหรือ 1 โมลอิเล็กตรอน จะต้องใช้แก๊สไฮโดรเจน 1/2 โมล และ

1 ampere of current = 1 coulomb of electron per second

1 coulomb of electron per second =  $6.242 \times 10^{18}$  electrons per second

ดังนั้น 1 ampere of current =  $6.242 \times 10^{18}$  electrons per second

จะได้ว่า มีจำนวนอิเล็กตรอน  $6.242 \times 10^{18} / 6.022 \times 10^{23}$  เท่ากับ  $1.037 \times 10^{-5}$  mole/ second

ดังนั้นจะต้องใช้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ  $1/2 \times 1.037 \times 10^{-5} = 5.183 \times 10^{-6}$  moles/ second แต่แก๊ส 1 โมลเท่ากับ  $22.429 \times 10^3$  cc

และสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ อัตราการใช้แก๊สไฮโดรเจนต่อปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เท่ากับ  $5.183 \times 10^{-6}$  mole/ second  $\times 22.429 \times 10^3$  cc/ second ซึ่งเท่ากับ 0.116 cc/ second

ดังนั้นอัตราการใช้แก๊สไฮโดรเจนสำหรับ Single cell คำนวณได้ดังนี้

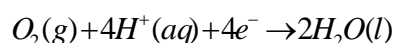
$$\text{Hydrogen consumption rate} = 0.116 \times \text{Amps} \quad \text{cc/ second} \quad (2.24)$$

ในกรณี Stack cell สามารถคำนวณอัตราการใช้แก๊สไฮโดรเจนได้ดังนี้

$$\text{Hydrogen consumption rate} = 0.116 \times n_{\text{cell}} \times \text{Amps} \quad \text{cc/ second} \quad (2.25)$$

โดยที่  $n_{\text{cell}}$  คือ จำนวน Single cell ที่นำมาต่ออนุกรม

ต่อมาพิจารณาปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดเพื่อคำนวณหาปริมาณน้ำที่ได้จากปฏิกิริยา



น้ำที่ได้จากปฏิกิริยา 1 โมล จะใช้อิเล็กตรอน 2 โมล หรือ อิเล็กตรอน 1 โมล จะได้น้ำ 1/2 โมล

จำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับ  $6.242 \times 10^{18} / 6.022 \times 10^{23}$  เท่ากับ  $1.037 \times 10^{-5}$  mole/second ดังนั้น น้ำที่ได้จากปฏิกิริยาเท่ากับ  $1/2 \times 1.037 \times 10^{-5}$  mole/second =  $5.183 \times 10^{-6}$  mole/ second

ดังนั้นปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ จ่ายกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เท่ากับ 93.294

$\frac{\mu g}{sec}$  และสามารถคำนวณอัตราการเกิดน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ จากผลคูณระหว่าง

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงจ่ายให้กับวงจรโหลดภายนอกกับอัตราการเกิดน้ำขึ้นภายในเซลล์ได้ตามสมการดังนี้

$$\text{Water production rate} = 93.294 \times \text{Amps} \frac{\mu g}{sec} \quad (2.26)$$

และในกรณี Stack cell สามารถคำนวณอัตราการเกิดน้ำได้ดังนี้

$$\text{Water production rate} = 93.294 \times n_{\text{cell}} \times \text{Amps} \frac{\mu g}{sec} \quad (2.27)$$

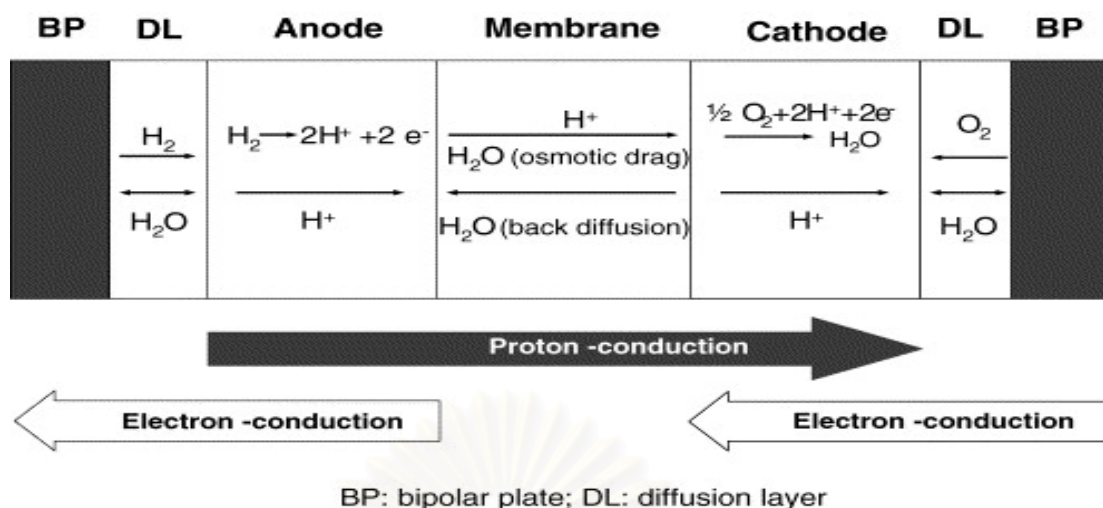
## 2.10 การจัดการน้ำ (Water management) [3]

การจัดการน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากคุณสมบัติการนำโปรตอน (Proton conductivity) ของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์หรือเมมเบรนจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีน้ำหรือความชื้นที่พอเหมาะเพื่อให้การนำโปรตอนเป็นไปด้วยดี แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะทำให้ น้ำท่วมรูพรุนในขั้วอิเล็กโทรดหรือชั้นแก๊สแพร่ ดังนั้นจึงควรจัดการน้ำในเซลล์ให้มีความสมดุลเพื่อให้เซลล์สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง

ความชื้นหรือน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงได้มาจาก 2 แหล่ง คือ

1. น้ำหรือความชื้นที่ได้รับจากอุปกรณ์กำเนิดความชื้น (Humidifier)
2. น้ำหรือความชื้นที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

โดยปริมาณน้ำที่เข้าไปในเซลล์เนื่องจากได้รับความชื้นจากอุปกรณ์กำเนิดความชื้นจะทำให้แก๊สแห้งจากถังจ่ายแก๊สกลายเป็นแก๊สเปียก (Liquid gas) และปริมาณน้ำที่เข้าสู่เซลล์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหลของแก๊ส สำหรับปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดนั้น จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) ที่เซลล์ผลิตออกมา น้ำหรือความชื้นจากอุปกรณ์กำเนิดความชื้นจะเคลื่อนที่ไปกับแก๊สเชื้อเพลิงผ่านขั้วอิเล็กโทรดและเมมเบรน โดยจะเกิด 2 ปฏิกิริยาการขึ้นภายในเมมเบรน ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำในเมมเบรน [21]

ในระหว่างที่เซลล์ทำงาน โปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด และดึงโมเลกุลน้ำไปด้วย กระบวนการนี้เรียกว่า Electro-osmotic drag และค่าเฉลี่ยจำนวนโมเลกุลของน้ำที่ถูกโปรตอน 1 ตัว ดึงไปเรียกว่า Electro-osmotic drag coefficient โดยโปรตอน 1 โมเลกุลจะดึงน้ำ 1-5 โมเลกุล และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จะทำให้เกิดการสะสมน้ำที่ขั้วแคโทด เมื่อความเข้มข้นของน้ำที่ขั้วแคโทดมากกว่าที่ขั้วแอโนด ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำ (Water concentration gradient) ระหว่างแต่ละด้านของเมมเบรน จึงทำให้น้ำที่ขั้วแคโทดสามารถไหลผ่านช่องทางเดินแก๊สผ่านเข้าไปในชั้นแพร์ของแก๊สและผ่านเมมเบรนกลับไปยังขั้วแอโนดได้ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Back diffusion

การควบคุมความชื้นที่ขั้วแอโนด สามารถทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำความชื้นด้านแก๊สไฮโดรเจน แต่สำหรับการควบคุมความชื้นที่ขั้วแคโทดจะค่อนข้างยากและซับซ้อนกว่าที่ขั้วแอโนดเนื่องจากน้ำที่ขั้วแคโทดเกิดจากปฏิกิริยาภายในเซลล์และความชื้นที่ได้รับจากอุปกรณ์ทำความชื้น ทำให้เกิดการสะสมของน้ำมากเกินไปจนความต้องการของเซลล์หรือเกิดน้ำท่วมเซลล์ (Flooding) โดยปกติอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำความชื้นของแก๊สจะสูงกว่าอุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เสมอเพื่อให้แก๊สที่เข้าสู่เซลล์เป็นแก๊สที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ ซึ่งจะทำให้เมมเบรนไม่สูญเสียความชื้นให้กับแก๊สที่ไม่อิ่มตัว ปริมาณความต้องการความชื้นขึ้นอยู่กับความหนาของเมมเบรน โดยเมมเบรนที่มีความบางจะมีความต้องการความชื้นน้อยกว่าเมมเบรนที่มีความหนากว่า เนื่องจากเมื่อใช้เมมเบรนที่มีความบางจะทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดสูงมาก ดังนั้นจึงสามารถเกิดกระบวนการ Back diffusion ของน้ำจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดได้ โดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ทำความชื้นจากภายนอก เรียกกระบวนการนี้ว่า

Self humidifying ซึ่งจะเกิดเฉพาะเมมเบรนที่บางเท่านั้น สำหรับเมมเบรนที่หนาจำเป็นต้องอาศัยความชื้นจากอุปกรณ์ทำความชื้นภายนอก

## 2.11 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$ [22-23]

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าการทดลองแบบทีละปัจจัย โดยเฉพาะเมื่อมีอันตรกิริยา (Interaction) เกิดขึ้น ทำให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ และสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องการศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  ซึ่งเป็นการออกแบบที่ประกอบด้วยปัจจัย  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือ คนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ซึ่งจะแทนระดับทั้งด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” ตามลำดับ

การออกแบบ  $2^k$  มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง  $k$  ชนิด ดังนั้นการออกแบบ  $2^k$  จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง อย่างไรก็ตามเนื่องจากแต่ละปัจจัยของการออกแบบ  $2^k$  ประกอบด้วย 2 ระดับ จึงขอสมมติว่าผลตอบที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานเช่นนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเมื่อเราเพิ่งเริ่มต้นทำการศึกษาระบบ

### 2.11.1 วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ  $2^k$  มีลำดับขั้นตอนดังนี้คาดเดาผลกระทบที่จะเกิดจากตัวแปรต่างๆ (Estimate factor effect) ในขั้นตอนแรกจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบ



โดยเบื้องต้นว่า ปัจจัยและอันตรกิริยาตัวใดที่มีความสำคัญ และควรปรับให้อยู่ในทิศทางใด เพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบ

- (i) สร้าง Model เริ่มต้น (Form initial model) ในการสร้างแบบจำลองเริ่มต้น ควรเลือกแบบจำลองเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด
- (ii) ดำเนินการทดสอบทางสถิติ (Perform statistical testing) โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา
- (iii) ชัดเกล้า Model (Refine model) เป็นการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ
- (iv) วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Analyze residual) เพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น บางครั้งการชัดเจนแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง เนื่องจากแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้ไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง
- (v) อธิบายผลการวิเคราะห์ (Interpret results) โดยการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟของผลหลักและอันตรกิริยา เพื่อประมาณค่าของผลหรือค่าผลรวมของกำลังสองของผล

### 2.11.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

คำว่า “การวิเคราะห์ความแปรปรวน” มาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ จะได้ว่า Total Corrected Sum of Square คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (2.28)$$

โดยที่  $y_{ij}$  คือ ค่าผลตอบสนองที่ได้จากการสังเกต

$\bar{Y}$  คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมดของค่าผลตอบสนองโดยที่ ใช้สำหรับวัดความแปรผันทั้งหมดของข้อมูล เป็นการเหมาะสมถ้าหาร  $SS_T$  ด้วยระดับขั้นความเสรีที่เหมาะสม (ในกรณีนี้  $an-1 = N-1$ ) จะได้ความแปรปรวนของตัวอย่าง  $y$  จากสมการที่ (2.13) สามารถเขียนได้ดังนี้



$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - Y_{..}^-)^2 = n \sum_{i=1}^a (y_i^- - y_{..}^-)^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_i^-)^2 \quad (2.29)$$

โดยที่  $y_i^-$  คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองในแถวที่  $i$

$a$  คือ จำนวนระดับการทดลอง

$n$  คือ จำนวนการทดลองในแต่ละระดับ

### 2.11.3 แบบจำลองการถดถอย (Regressive model)

ในการออกแบบ  $2^k$  สามารถหาแบบจำลองถดถอยได้ดังนี้

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.30)$$

โดยที่  $x$  คือ ตัวแปรที่ถูกเข้ารหัส

$\beta$  คือ สัมประสิทธิ์ของการถดถอย

พจน์ต่างๆ ในสมการได้มาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนหรือ ANOVA ค่าพารามิเตอร์  $\beta_0$  ได้มาจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด และค่าสัมประสิทธิ์  $\beta_{1..k}$  จะเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่า effect estimate และสัมประสิทธิ์ของการถดถอยจะเป็นตัววัดผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $x$  หนึ่งหน่วยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของ  $y$  และผลที่ประมาณได้นี้ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลง 2 หน่วย (จาก -1 ไป +1)

แบบจำลองของการถดถอยสามารถใช้ในการหาค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) หรือค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ได้ และค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของการออกแบบจะเท่ากับผลต่างของค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งค่าส่วนตกค้างนี้จะสามารถนำไปวิเคราะห์ Model adequacy โดยการทำ Normal probability plot

### 2.11.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

#### 1. สมมติฐานของความเป็นปกติ

การออกแบบ  $2^k$  จะต้องมีสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติที่ยอมรับได้ ดังนั้นจะต้องทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติโดยการพล็อตฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง คือ การสร้าง Normal probability plot ของส่วนตกค้างซึ่งหากการแจกแจงของความผิดพลาดเป็นแบบปกติ

กล่าวคือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่ค่าหนึ่ง กราฟที่พล็อตจะเป็นกราฟเส้นตรง

## 2. การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

ถ้าแบบจำลองมีความถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้ว ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ควรมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด รวมถึงค่าผลตอบที่ถูกทำนาย (Predicted response) การตรวจสอบอย่างง่าย ๆ คือ การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตและกราฟที่ได้จากการพล็อตนี้ไม่ควรจะมีรูปร่างเฉพาะแต่อย่างใด

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G. sasikumar และคณะ [12]: ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแพลทินัมที่ใช้ (Platinum loading) กับปริมาณที่เหมาะสมของ Nafion ionomer ในขั้วอิเล็กโทรดและพบว่าปริมาณที่เหมาะสมของเนฟิออนขึ้นอยู่กับปริมาณแพลทินัมโดยเมื่อเพิ่มปริมาณเนฟิออนจะต้องลดปริมาณของแพลทินัมลง โดยขั้วอิเล็กโทรดที่มีปริมาณแพลทินัม 0.5, 0.25, และ 0.1 mg/cm<sup>2</sup> จะต้องใช้ปริมาณของเนฟิออน 20, 40 และ 50 % ตามลำดับ จึงจะให้สมรรถนะที่ดีที่สุด

E. Antolin และคณะ [13]: ได้ศึกษาผลของปริมาณเนฟิออนในช่วง 0 – 1.5 mg/ cm<sup>2</sup> ที่มีต่อปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนโดยใช้เทคนิค Galvanostatic polarization (GP) ในสภาวะคงที่, Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), และการวัด Cyclic Voltammetry (CV) พบว่าปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมในขั้วอิเล็กโทรดจะต้องให้ค่าโอห์มิก (Ohmic) และค่าศักย์ไฟฟ้าของการถ่ายโอนมวล (Mass transport overpotential) น้อย และการขยายขอบเขตของ 3 เฟสด้วยปริมาณเนฟิออนใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าด้านแคโทดกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) และเทคนิค Cyclic voltammetry

Z. Qi และคณะ [24]: ได้ศึกษาการจัดการน้ำด้วยการสร้างชั้นของส่วนผสมของโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) กับคาร์บอน เพื่อใส่ระหว่างชั้นของกระดาษคาร์บอนและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นได้ทำการทดสอบชั้นของส่วนผสม PTFE กับคาร์บอนที่มีความหนาและส่วนผสมที่มีปริมาณของ PTFE ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 24%, 35% และ 45% แล้วนำไปทดลองกับ หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม 4 ชั้น โดยไม่ให้ความชื้นทั้งอากาศและแก๊สไฮโดรเจน จากผลการทดลองพบว่าชั้นของส่วนผสม PTFE ที่มีปริมาณ 35% เป็นส่วนผสมที่ทำให้เซลล์มีสมรรถนะที่สูงที่สุดและ 45% PTFE เป็นส่วนผสมที่ทำให้เซลล์มีสมรรถนะต่ำที่สุด

J. Chen และคณะ [25]: ได้ศึกษาการจัดการน้ำด้วยการพัฒนาเอมอีเอเพื่อให้มีการรักษาปริมาณน้ำและการกระจายของน้ำในเซลล์ได้เป็นอย่างดีด้วยการออกแบบชั้นการจัดการน้ำ (Water Management Layer, WML) ในระหว่างชั้นแพร่ของแก๊สและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มและได้ทำแบบจำลอง เพื่อศึกษาการแทรกซึมของไอน้ำของ เอ็มอีเอ ภายใต้สภาวะที่คล้ายกับการทำงานในเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งพบว่าการจัดการน้ำด้วยการปรับปรุงเอมอีเอโดยใช้ WML สามารถจัดการน้ำในเซลล์ได้

G. Janssen และคณะ [26]: ได้ศึกษาการถ่ายเทของน้ำในเมมเบรนด้วยการวัดค่า effective หรือ net drag ในหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม โดยทำการทดลองในช่วงสภาวะการทำงาน (ความหนาแน่นกระแส, อุณหภูมิ, ความดัน, ค่าสัมประสิทธิ์และความชื้นของแก๊ส) และทดลองหาความแตกต่างของเอมอีเอ ผลที่ได้พบว่าความชื้นและค่าสัมประสิทธิ์มีผลต่อค่า drag และในส่วนของเอมอีเอ ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับ Nafion112 และ Nafion115 พบว่าความหนาของเมมเบรนมีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดย Nafion112 ที่มีความบางกว่ามีการแทรกซึมของน้ำได้ดีกว่า

B. Yang และคณะ [21]: ได้ศึกษาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ที่จะให้เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มทำงานที่สภาวะที่ไม่มี ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง โดยได้มีการทำชั้นบาง ๆ ของเยื่อแผ่น (Thin-double layer composite membrane) ซึ่งประกอบด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนคาร์บอน (Pt/C) กระจายตัวอยู่บน Nafion เปรียบเทียบกับชั้นของ Nafion เพียงอย่างเดียว โดยใช้เป็นขั้วแอโนดและแคโทด จากนั้นนำไปประกอบเป็นเอมอีเอ ซึ่งอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกผสมกับแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปในเยื่อแผ่น จากแอโนดไปยังแคโทดเพื่อผลิตน้ำน้ำจะเป็นตัวให้ความชื้นแก่เมมเบรนโดยตรงจึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานได้โดยไม่ต้องให้ความชื้นแก่แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนและเมื่อนำไปทดสอบสมรรถนะก็พบว่า Thin-double layer composite membrane ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

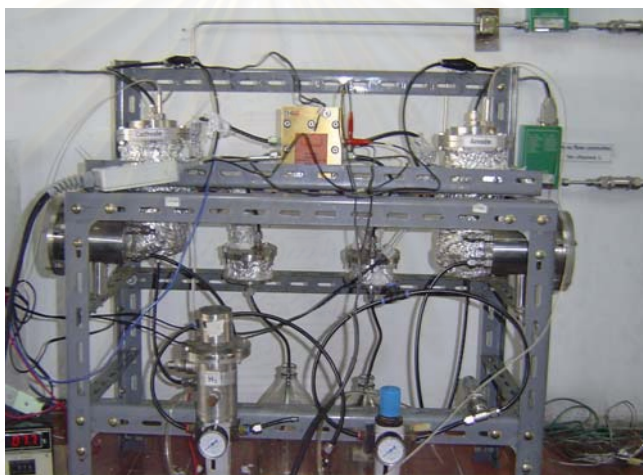
ชื่อสาร	บริษัท
ตัวเร่งปฏิกิริยา (20%wt. Pt/ VXC72)	E-TEK
เนฟิออน (5%wt. Nafion 117)	Fluka
เนฟิออนเมมเบรน (Nafion 115)	Fluka
กระดาษคาร์บอน (Carbon-paper)	E-TEK
โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (60 %wt. Polytetrafluoroethylene)	Aldrich
เอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ (Ethylene glycol dimethyl ether)	Fluka
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	Merck
กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid)	BDH
แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen 99.995%)	Praxair
แก๊สออกซิเจน (Oxygen 99.999%)	Praxair
แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen 99.99%)	Praxair

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ตู้อบ
2. เต้าเผา
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
5. ไมโครปิเปต
6. ออโต้ปิเปต
7. โถดูดความชื้น
8. เครื่องแก้วอื่นๆ ในห้องปฏิบัติการ

### 3.3 ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 3.1 - 3.4 ประกอบด้วย

- อุปกรณ์ทำความชื้น (humidifier)
- อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)
- อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
- อุปกรณ์ควบคุมความดันแก๊ส (Back pressure)
- เครื่อง Potentiostat/ Galvanostat
- เครื่องคอมพิวเตอร์
- Hard ware สำหรับใส่เอ็มอีเอเพื่อทดสอบสมรรถนะ

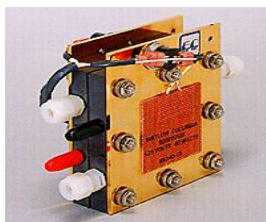


รูปที่ 3.1 ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยวที่ใช้ในการทดลอง

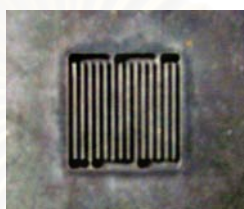


รูปที่ 3.2 เครื่อง Potentiostat/ Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท Autolab





รูปที่ 3.3 Hard ware สำหรับทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว) ของบริษัท Electrochem. Inc



รูปที่ 3.4 ลักษณะช่องทางการไหลใน unipolar plate ของเซลล์เดี่ยว แบบ Serpentine

### 3.4 ระบบทดสอบสมรรถนะหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 -3.8 ประกอบด้วย

- อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller)
- อุปกรณ์ควบคุมความดันแก๊ส (Back pressure)
- เครื่อง Electronic load
- เครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.5 ระบบทดสอบสมรรถนะหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง





รูปที่ 3.6 เครื่อง Electronic load รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท Autolab



รูปที่ 3.7 Hard ware หน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์ ของบริษัท Electrochem. Inc.



รูปที่ 3.8 ลักษณะช่องทางไหลใน bipolar plate ของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง แบบตรง (Straight channel flow pattern)

### 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท Autolab
2. โปรแกรม Frequency Response Analysis, FRA version 4.9
3. เครื่อง Electronic load รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท Autolab

4. เครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น JSM 6400 ของบริษัท Jeol
5. เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Discover ของบริษัท Bruker AXS

### 3.6 ตัวแปรที่ศึกษา

1. ปริมาณสารละลายเทฟลอนและเนฟิออนที่เหมาะสมในการนำไปเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด
2. ชนิดของแก๊สที่เหมาะสมต่อการอบขั้วอิเล็กโทรด โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างแก๊สไนโตรเจน กับอากาศ
3. เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรด

### 3.7 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.7.1 การปรับสภาพของเมมเบรน[14]

1. นำเมมเบรนแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 100 ml ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์
2. นำเมมเบรนแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำเมมเบรนแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 M ปริมาตร 100 ml ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดไอออนของโลหะ
4. นำเมมเบรนแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อล้างคลอไรด์ไอออน
5. นำเมมเบรนที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว แช่ในน้ำกลั่นเก็บไว้ เพื่อรอการนำไปใช้งาน

#### 3.7.2 การเตรียมขั้วอิเล็กโทรด

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดด้วยวิธีการพิมพ์ (Printing หรือ Painting) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่ง 20 % wt. Pt/C ใส่ในขวดที่มีฝาปิด

2. ปิเปตสารละลายเอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ลงในขวดข้างต้น 1.5 ml ปิดฝาขวดอย่างรวดเร็ว
3. นำขวดตัวอย่างใส่อ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
4. ปิเปตสารละลายเนฟิออนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ลงในขวดตัวอย่างโดยปริมาตรที่ทำการปิเปตให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในแผนการออกแบบการทดลอง
5. นำขวดตัวอย่างใส่อ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
6. ใช้ไมโครปิเปต ปิเปตสารละลายพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ลงในขวดตัวอย่าง 10  $\mu\text{L}$
7. นำขวดตัวอย่างใส่อ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
8. ตัดกระดาษคาร์บอนขนาด 2.3 x 2.3 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนัก
9. นำแผ่นกระดาษคาร์บอนวางบนแผ่นพลาสติก ใช้ฟู่กันจุ่มสารละลายตัวอย่างทาบนกระดาษคาร์บอน ทิ้งให้แห้งแล้วจึงทำซ้ำทำจนกระทั่งสารตัวอย่างหมด โดยในขณะที่ทำสารละลายตัวอย่างเสร็จทุกครั้ง จะต้องนำขวดตัวอย่างใส่อ่างอัลตราโซนิก จนสารตัวอย่างหมด
10. นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิและเวลาตามที่กำหนดในแผนการออกแบบการทดลอง

สำหรับการเตรียมหัวอิเล็กโทรดขนาด 50 ตารางเซนติเมตร ทำเช่นเดียวกับการเตรียมหัวอิเล็กโทรดขนาด 5 ตารางเซนติเมตร โดยตัดกระดาษคาร์บอนขนาด 7.4 x 7.4 เซนติเมตร และเพิ่มปริมาตรของสารละลายเอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ และสารละลายเนฟิออนเป็น 10 เท่าของปริมาตรเดิม

### 3.8 การวิเคราะห์สมบัติของหัวอิเล็กโทรด

จากที่กล่าวมาแล้วว่าสมบัติของหัวอิเล็กโทรดมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ ดังนั้นสมบัติพื้นฐานของหัวอิเล็กโทรดที่ควรศึกษาประกอบด้วยสมบัติต่างๆ ดังนี้

### 3.8.1 การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา

ศึกษาการกระจายตัวของโลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy, SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า

### 3.8.2 การหาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด

ศึกษาการหาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้เครื่อง Energy Dispersive X-ray (EDX)

### 3.8.3 การศึกษาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด

ศึกษาโครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

## 3.9 การประกอบเอ็มซีเอ

1. นำแผ่นพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอนหรือยูรีเทนที่มีความหนาไม่มาก ตัดตรงกลางให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.25 x 2.25 เซนติเมตร
2. นำกาวสองหน้ามาแปะที่มุมทั้ง 4 ของแผ่นพลาสติก แล้วนำไปแปะลงบนแผ่นสแตนเลส 1 อัน
3. ทาสารละลายเนฟิออนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก บนผิวหน้าขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียม 1 แผ่น โดยทาด้านที่มีชั้นแคตตาลิสต์เคลือบอยู่ประมาณ 5  $\mu\text{L}$  ทั่วผิวหน้าขั้วอิเล็กโทรด
4. แล้วนำแผ่นขั้วอิเล็กโทรดที่ทาสารละลายเนฟิออนแล้วมาวางบนแผ่นยูรีเทน
5. จากนั้นนำเมมเบรนที่ปรับสภาพแล้ว วางบนขั้วอิเล็กโทรดโดยให้ขั้วอิเล็กโทรดอยู่ที่กึ่งกลางของเมมเบรน
6. นำขั้วอิเล็กโทรดอีก 1 แผ่น ทำตามขั้นตอนที่ 3
7. นำมาประกบกับอีกด้านของเมมเบรน โดยวางให้ตรงกับขั้วอิเล็กโทรดที่ประกบกับเมมเบรนในขั้นตอนที่ 5
8. จากนั้นนำแผ่นสแตนเลสอีก 1 แผ่น มาประกบทับบนเมมเบรนกับขั้วอิเล็กโทรดก่อนกดอัดด้วยเครื่อง Compression mold

9. วางแผ่นสแตนเลสทั้งสองบนแท่นกดอัดของเครื่อง Compression mold
10. เปิดเครื่อง Compression mold และอัดด้วยความเย็นและความร้อน โดยใช้ความดัน  $65 \text{ kg/cm}^2$  ที่อุณหภูมิ  $137^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 5 นาที [27]
11. เก็บชุดเอ็มอีเอที่เตรียมได้ เพื่อรอการทดสอบสมรรถนะต่อไป

### 3.10 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว

#### 3.10.1 การประกอบเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

1. ประกอบแผ่นเอ็มอีเอขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา  $5 \text{ cm}^2$  เข้ากับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน
2. ใช้แผ่นยางซิลิโคนบางเพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส โดยนำมาวางไว้ระหว่างเมมเบรนกับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน
3. ยึดตรึงแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าที่ประกบกับแผ่นเอ็มอีเอทั้งสองด้านเข้าด้วยกัน โดยใช้หนีต และถัดจากแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าจะมีแผ่นปิดท้าย (End plate) ประกบอยู่ทั้ง 2 ด้าน จากนั้นจึงใช้ประแจปอนด์เพื่อทำการอัดส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันโดยใช้โมเมนต์การหมุนที่ 40 ปอนด์แรงนิ้ว
4. นำเซลล์เดี่ยวที่ได้ไปติดตั้งในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (Test station) และทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

#### 3.10.2 ขั้นตอนก่อนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว)

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้าของแก๊สแต่ละชนิดให้ปิดเปิดอยู่ในทิศทางตามต้องการ เพื่อป้องกันการไหลปนกันของแก๊สชนิดต่างๆ และวาล์วขาออกให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. ตรวจสอบความเรียบร้อยของข้อต่อต่างๆ ในหน่วยทดสอบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทำการทดลอง
3. ตรวจสอบระดับน้ำภายในส่วนระเหยน้ำของระบบให้สูงขึ้น โดยดูจากส่วนจัดหาน้ำให้อยู่ในระดับที่ไม่ต่ำกว่าขีดบอกระดับน้ำเดิมมากนัก เมื่อระดับน้ำลดจากระดับเดิมมาก ควรเติมน้ำให้ได้เท่ากับขีดบอกระดับน้ำเดิม
4. ตรวจสอบเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังแก๊สทุกถังให้อยู่ในตำแหน่งปิด

5. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อจากขั้วอิเล็กโทรดที่เซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 2 ขั้วที่ต่อมายังเครื่อง Potentiostat/ Galvanostat ว่าให้อยู่ในสภาพที่ต่อเรียบร้อย
6. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
7. เปิดเครื่องตรวจแก๊สไฮโดรเจนเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในกรณีที่เกิดการรั่วของแก๊สไฮโดรเจน
8. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 15 นาทีก่อนทำการทดลอง
9. เปิดสวิตช์เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาที ก่อนทำการทดลอง กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด จากนั้นเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับทำหน้าที่บันทึกข้อมูลจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat
10. ปิดสวิตช์ที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์หลัก (Main Switch) แล้วจึงเปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง แล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส และเปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ตั้งค่าอุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำของด้านแอโนด 65 องศาเซลเซียสและแคโทด 60 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามค่าที่ตั้งไว้
11. ตั้งค่าอัตราการไหลตามต้องการที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สที่ 100 sccm ซึ่ง Channel 2 คือ แก๊สออกซิเจน และ Channel 4 คือ แก๊สไฮโดรเจน ส่วนของแก๊สไนโตรเจนจะใช้ทั้งสอง Channel โดยเปลี่ยนทางเดินของแก๊สโดยใช้วาล์วขาเข้าเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของแก๊ส
12. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดแก๊สที่ต้องการใช้ที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออกตามต้องการ ซึ่งโดยปกติเท่ากับ 20 psi แล้วจึงมาเปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหลแต่ละ Channel เพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ
13. ก่อนจะทำการทดลอง ควรผ่านแก๊สไนโตรเจนกับหน่วยทดสอบประมาณ 20 นาที โดยตั้งอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 2 Channel ไว้ที่ 100 sccm ก่อนด้วยสาเหตุดังนี้
  - (i) เพื่อเป็นการไล่สิ่งสกปรกค้างอยู่ในหน่วยทดสอบออกก่อน
  - (ii) เพื่อตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำยาในการตรวจสอบการรั่วภายในหน่วยทดสอบ



(iii) เพื่อใช้วัดค่าความชื้นภายในแก๊สก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ส่วนวัดความชื้น

14. ก่อนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ควรมีการทำให้เอมอีเอทีเตรียมได้นั้นมีความพร้อมก่อนการทดสอบ โดยทำการ Break -In เพื่อให้เอมอีเอทีมีความพร้อมหรือมีความชื้นที่เพียงพอก่อนการทดสอบจริง ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อ 3.8.3 โดยการตั้งค่าศักย์ไฟฟ้า 1 step ที่ 0.5 V เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง แต่เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและแก๊ส จึงทำการเพิ่มค่าความดันภายในระบบ โดยการหมุน regulator ประมาณ 2 รอบ เพื่อเพิ่มความดันภายในระบบประมาณ 14.7 psi และใช้เวลาเพียง 6 ชั่วโมง จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 60 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำทางด้านแอโนด 65 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของส่วนระเหยด้านแคโทด 60 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับการทดสอบจริง
15. เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งค่าความต่างศักย์ในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟของเซลล์เชื้อเพลิง (Open circuit voltage) ที่ได้มีค่าคงที่ กดปุ่ม Cell Enable ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด จึงกดปุ่ม start ที่โปรแกรม GPES เพื่อเริ่มบันทึกค่ากระแสที่ได้ ณ ที่ค่าความต่างศักย์ต่างๆ ที่ตั้งไว้

### 3.10.3 ขั้นตอนการ Break-In [28]

การ Break-In มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เมมเบรนและอิเล็กโทรดมีความชื้นเพียงพอก่อนการนำไปทดสอบสมรรถนะ โดยกระบวนการ Break In ควรกระทำที่ความดันของระบบ 2-8 psig ทั้งทางด้านแคโทดและแอโนด อุณหภูมิของเซลล์ 65-70 องศาเซลเซียส ไม่แนะนำให้กระทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการ Break-In ควรจะมีค่ามากกว่า  $0.6 \text{ A} / \text{cm}^2$  โดยเฉพาะอย่างยิ่งควรจะมีค่ามากกว่า  $0.8 \text{ A} / \text{cm}^2$  เนื่องจากจะทำให้เมมเบรนและขั้วอิเล็กโทรดมีความชื้นที่เพียงพอ

ภาวะของการ Break -In ที่ขอแนะนำ คือ กระทำที่อุณหภูมิเซลล์ 65 -70 องศาเซลเซียส โดยให้ความชื้นทั้งทางด้านแอโนดและแคโทด (100% RH) โดยควรให้อุณหภูมิที่หม้อความชื้นของแอโนดสูงกว่าอุณหภูมิของเซลล์ และกระทำภายใต้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 0.6 V ถ้าไม่สามารถกระทำได้ที่ 0.6 V ควรจะกระทำที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงหรือที่ศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำลง สำหรับเวลาใน

การ Break-In ควรใช้เวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง หลังจากการ Break-In สามารถนำเซลล์ไปทดสอบที่ภาวะเดียวกับการ Break-In ได้

### 3.10.4 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว)

หลังจากทำการ Break In เพื่อให้เอ็มอีเอ็มมีความชื้นที่เพียงพอสำหรับการทดสอบจริง แล้ว ปรับความดันในระบบให้เหลือประมาณ 6 psi จากนั้นจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งทำได้ 2 รูปแบบ คือ

1. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) โดยใช้โปรแกรม GPES เลือกวิธีแบบ Chrono methods (interval time > 0.1 sec) และเลือกวิธีแบบ Amperometry จากนั้นตั้งค่าความต่างศักย์เพื่อให้เครื่องวัดค่ากระแสจากเซลล์เชื้อเพลิง ตั้งค่าความต่างศักย์ 1 step โดยที่ 0.95 -0.8 ใช้เวลาประมาณ 200s และที่ 0.7 -0.1 ใช้เวลา step ละ 500s จากนั้นทำการทดสอบซ้ำโดยตั้งค่าเหมือนเดิม ทำจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าที่ได้คงที่ นำผลการทดลองไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า
2. การศึกษาในรูปของอิมพีแดนซ์ (Impedance) โดยใช้โปรแกรม Frequency Respond Analyzer (FRA) เลือกวิธีแบบ Potential และเลือกวิธีแบบ Single potential ตั้งช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 mHz – 10 kHz ตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0.6 V จากนั้นกด Cell Enable และกด Start ที่ตัวโปรแกรม

### 3.10.5 ขั้นตอนภายหลังการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (เซลล์เดี่ยว)

1. เมื่อเสร็จสิ้นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้
2. ปิดสวิทช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล แล้วจึงปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สทุกถัง
3. ปิดวาล์วขาเข้าทุกตัว และค่อยๆ เปิดวาล์วขาออกทีละตัว เพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอจนกระทั่งเกจที่วัดความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลงจนถึง 0 ทั้งขาเข้าและขาออก แล้วจึงเปิดวาล์วขาออกของแก๊สอีกถังหนึ่ง ทำในลักษณะเดียวกัน

4. เมื่อลดความดันในท่อแก๊สหมด จึงทำการปิดวาล์วขาออกของแก๊สทุกตัว
5. ปิดสวิทช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวที่แผงสวิทช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า
6. ปิดสวิทช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผงสวิทช์ควบคุมแหล่งไฟฟ้า แล้วจึงปิดสวิทช์หลัก
7. กดปุ่ม Stop ที่โปรแกรม Lab-View ที่ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิในส่วนระเหยน้ำ แล้วจึงปิดโปรแกรม
8. ปิดโปรแกรม GPES แล้วจึงปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ ต่อจากนั้นจึงปิดสวิทช์ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat

### 3.11 Cyclic Sweep Voltammetry (CV) measurement [29]

การวัด CV เป็นการทดสอบอีกรูปแบบหนึ่งนอกเหนือจากการทดสอบโพลาริเซชัน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Surface Area, ECA หรือ ESA) ของขั้วแคโทด โดยพื้นที่ผิวหน้าของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วแคโทดคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวหน้าและการดูดซับประจุของแก๊สไฮโดรเจน โดยประจุของการดูดซับของแก๊สไฮโดรเจนบนขั้วอิเล็กโทรดที่เรียบและมีแพลทินัมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ  $210 \text{ mC cm}^{-2}$  Pt

ขั้นตอนการทดสอบทำโดยนำเอ็มอีเอมาประกอบเป็นเซลล์เดี่ยว แล้วทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ตั้งค่าอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด 100 sccm และตั้งค่าอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ขั้วแคโทด 100 sccm
2. ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องทั้งอุณหภูมิเซลล์และอุณหภูมิของหม้อความชื้น
3. เปิดเครื่อง Potentiostat จากนั้นเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์
4. เปิดโปรแกรม GPES เลือก Method จากนั้นเลือก Cyclic Voltammetry (staircase) และเลือก Normal
5. ตั้งค่า Sweep rate ที่  $20 \text{ mVs}^{-1}$  จากนั้นตั้งค่า Number of scan เท่ากับ 5 และตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.01 – 0.80 V
6. เปิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สไนโตรเจน จากนั้นกด cell enable และกด start
7. หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น ทำการบันทึกผล และสามารถหาค่าประจุไฟฟ้าจากหน้า Data presentation เลือก Analysis จากนั้นเลือก Integrate between markers และเลือกจุด 2 จุด เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำการอินทิเกรตหาค่าประจุ

ไฟฟ้า (Charge) หน่วยเป็นคูลอมบ์ และนำค่าประจุที่ได้ไปคำนวณหาค่า ECA (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.4)

### 3.12 การวัดสมรรถนะการทำงานของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

#### 3.12.1 การประกอบเอ็มอีเอของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง จำนวน 2 เซลล์

1. เตรียมแผ่นสะสมกระแสแบบ unipolar จำนวน 2 แผ่น และ bipolar จำนวน 1 แผ่น พร้อมกับแผ่น end plate สำหรับยึดตรึงโครงสร้างของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง
2. เตรียมแผ่นเอ็มอีเอขนาดพื้นที่ 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น พร้อมกับแผ่น gasket สำหรับป้องกันการรั่วของแก๊สจำนวน 2 คู่
3. ประกอบแผ่น gasket เข้ากับแผ่นเอ็มอีเอ โดยเรียกรวมกันว่า Membrane Electrode Gasket Assembly (MEGA)
4. ประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์ โดยเริ่มซ้อนกันตามลำดับดังนี้ end plate/ unipolar plate/ MEGA1/ bipolar plate/ MEGA2/ unipolar plate/ end plate
5. ยึดข้อต่อประกอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้ประแจปอนด์อัดด้วยแรงอัด 70 ปอนด์แรงนิ้ว
6. นำหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้ไปติดตั้งและทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานต่อไป

#### 3.12.2 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้าของแก๊สแต่ละชนิดให้อยู่ในทิศทางที่ต้องการ เพื่อป้องกันการไหลผสมกันของแก๊สต่างๆ และวาล์วขาออกให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. เปิดเครื่องตรวจแก๊สไฮโดรเจนเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในกรณีที่เกิดการรั่วของแก๊สไฮโดรเจน
3. เปิดสวิทช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 15 นาทีก่อนทำการทดลอง

4. เปิดสวิตช์เครื่อง Electronic load เลือกรการใช้งานแบบ CV (Constant- Voltage) กดปุ่ม Input off เพื่อให้เครื่องอยู่ในสถานะ disable
5. เปิดสวิตช์เครื่อง E-corder พร้อมกับเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับทำหน้าที่บันทึกข้อมูลที่ได้จากเครื่องแปลงสัญญาณ
6. เปิดโปรแกรม eDAG chart เพื่อทำการบันทึกข้อมูล
7. ตั้งค่าอัตราการไหลตามต้องการที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สที่ 300 sccm ซึ่ง Channel 1 คือ แก๊สไฮโดรเจน และ Channel 2 คือ แก๊สออกซิเจน ส่วนของแก๊สไนโตรเจนจะใช้ทั้งสอง Channel โดยเปลี่ยนทางเดินของแก๊สโดยใช้วาล์วขาเข้าเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของแก๊ส
8. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดแก๊สที่ต้องการใช้ที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออกตามต้องการ ซึ่งโดยปกติเท่ากับ 20 psi แล้วจึงมาเปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหลแต่ละ Channel เพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ
9. เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งค่าความต่างศักย์ในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟของเซลล์เชื้อเพลิง (Open circuit voltage) ที่ได้มีค่าคงที่ กดปุ่ม Input on ที่เครื่อง Electronic load แล้วใส่ค่าความต่างศักย์ที่ต้องการตั้งกระแส แล้วจึงกดปุ่ม start ที่โปรแกรม eDAG chart เพื่อเริ่มบันทึกค่ากระแสที่ได้ ณ ที่ค่าความต่างศักย์ต่างๆ ที่ตั้งไว้

### 3.12.3 ขั้นตอนภายหลังการทดสอบสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

1. เมื่อทำการทดลองเสร็จ กดปุ่ม stop ที่โปรแกรม eDAG chart แล้วบันทึกผลการทดลองที่ได้
2. กดปุ่ม Input off ที่เครื่อง Electronic load แล้วปิดสวิตช์หลักที่เครื่อง Electronic load
3. ปิดสวิตช์เครื่องวัดอัตราการไหล จากนั้นปิดวาล์วที่หัวถังแก๊ส
4. ปิดโปรแกรม eDAG chart แล้วจึงปิดสวิตช์ที่เครื่อง E-corder
5. ปิดคอมพิวเตอร์



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอมอีเอ โดยทำการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล และนำเอมอีเอที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับเอมอีเอทางการค้า

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกทำการศึกษาปัจจัยของปริมาณเทฟลอน อุณหภูมิที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด แก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรดและเวลาที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด จากนั้นทำการทดลองต่อในช่วงที่ 2 โดยการปรับค่าและตัดปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญจากการทดลองในช่วงที่ 1 และเพิ่มปัจจัยอีกปัจจัยหนึ่งคือ ปริมาณเนฟลอนเพื่อปรับปรุงให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น

#### 4.1 การออกแบบการทดลอง (ตอนที่ 1)

การออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียลเป็นการออกแบบทดลองเพื่อทำการคัดกรองตัวแปรที่มีความสำคัญต่อค่าการตอบสนองที่ผู้ทดลองสนใจจากตัวแปรหลายตัว การเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอมอีเอ มีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง การออกแบบการทดลองในตอนต้นที่ 1 เลือกตัวแปรที่ต้องการศึกษา 4 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณเทฟลอน อุณหภูมิการอบขั้วอิเล็กโทรด ระยะเวลาในการอบขั้วอิเล็กโทรด และแก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด โดยกำหนดให้

A คือ ปริมาณเทฟลอนต่ำสุดที่ 0 ไมโครลิตร (-) และสูงสุดที่ 10 ไมโครลิตร (+)

B คือ อุณหภูมิการอบต่ำสุดที่ 140 องศาเซลเซียส (-) และสูงสุดที่ 300 องศาเซลเซียส (+)

C คือ ระยะเวลาในการอบต่ำสุดที่ 0.5 ชั่วโมง (-) และสูงสุดที่ 1 ชั่วโมง (+)

D คือ แก๊สที่ใช้ในการอบ โดยให้ค่าต่ำสุด คือ อากาศ (-) และสูงสุดคือ แก๊สไนโตรเจน (+)

ดังตารางที่ 4.1 ดังนี้



ตารางที่ 4.1 ปัจจัยและระดับค่าของการทดลองตอนที่ 1

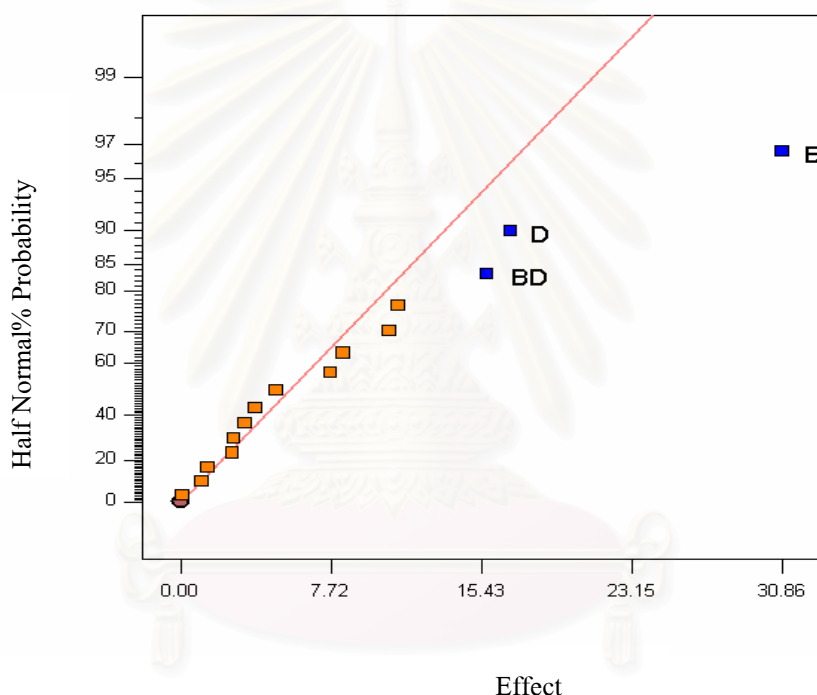
ปัจจัย	ระดับ (-1)	ระดับ (+1)
A= ปริมาณเทฟลอน ( $\mu\text{L}$ )	0	10
B =อุณหภูมิการอบ ( $^{\circ}\text{C}$ )	140	300
C = เวลาการอบ (hr.)	0.5	1
D= แก๊สที่ใช้ในการอบ	อากาศ	ไนโตรเจน

ตารางที่ 4.2 ชุดการทดลองและผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง  $2^4$  แฟกทอเรียลตอนที่ 1

ลำดับที่	A	B	C	D	Current density ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) at 0.6V	Power (W) at 0.6V
1	-	-	-	-	85.05	0.26
2	+	-	-	-	82.92	0.25
3	-	+	-	-	39.91	0.20
4	+	+	-	-	33.80	0.10
5	-	-	+	-	67.86	0.20
6	+	-	+	-	91.17	0.27
7	-	+	+	-	23.01	0.07
8	+	+	+	-	44.08	0.13
9	-	-	-	+	40.42	0.12
10	+	-	-	+	55.67	0.17
11	-	+	-	+	49.31	0.15
12	+	+	-	+	28.32	0.085
13	-	-	+	+	67.86	0.20
14	+	-	+	+	32.68	0.10
15	-	+	+	+	21.25	0.06
16	+	+	+	+	37.02	0.11

ตารางที่ 4.2 แสดงชุดการทดลองและผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง  $2^4$  แฟกทอเรียล ดังนั้นการทดลองจึงมีทั้งหมด 16 การทดลอง พบว่าการทดลองที่ 6 ซึ่งภาวะการทดลองที่ใช้คือ ปริมาณเทฟลอน 10  $\mu\text{L}$ , อุณหภูมิ 140  $^{\circ}\text{C}$ , เวลา 1 ชั่วโมง และอบด้วยอากาศ ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 91.17  $\text{mA}/\text{cm}^2$  และกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.27 W ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V

จากนั้นนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองซึ่งในที่นี้คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยนำมาสร้างกราฟ Normal Probability Plot แสดงในรูปที่ 4.1 ดังนี้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Half Normal %Probability กับปัจจัยต่างๆ

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normal %Probability กับปัจจัยต่างๆ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนอง คือปัจจัยที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรง และปัจจัยที่อยู่ห่างจากแนวเส้นตรงมากที่สุดแสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองมากที่สุด ซึ่งจากกราฟพบว่าปัจจัย B หรืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบซั้วอิเล็กโทรด มีผลต่อค่าตอบสนองมากที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เป็นเพียงการหาแนวโน้มของปัจจัยที่มีต่อค่าตอบสนองเท่านั้น เพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น จึงนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวนหรือ ANOVA

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) ในการทดลองนี้มีการคำนวณค่าแจกแจงทางสถิติแบบ F ( $F_0$ ) ซึ่งจะแสดงผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัว โดยพิจารณาค่า  $F_0$  ของแต่ละ

ตัวแปรเทียบกับค่า F ณ จุดวิกฤต หรือ  $F_{\alpha, v_1, v_2}$  โดยมีค่า  $\alpha$  คือระดับความเชื่อมั่น ซึ่งในการทดลองครั้งนี้พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % หรือระดับความสำคัญเท่ากับ 0.05 โดยที่  $v_1$  คือ degree of freedom ของตัวแปรที่ศึกษา และ  $v_2$  คือ degree of freedom ของความคลาดเคลื่อน จะได้ว่าค่าวิกฤตของการทดลองนี้เท่ากับ  $F_{0.05, 1, 12} = 4.75$  [42] โดยเมื่อค่า  $F_0$  ของตัวแปรที่ศึกษา มีค่ามากกว่า 4.75 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลกระทบต่อตัวแปรการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แสดงผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) ของการทดลองตอนที่ 1

Source	Sum of Square	DF	Mean Square	F value	Prob>F
Model	5938.06	3	1979.35	13.77	0.0003
B	3810.48	1	3810.48	26.52	0.0002
D	1143.31	1	1143.31	7.95	0.0154
BD	984.26	1	984.26	6.85	0.0225
Residual	1723.94	12	143.66		
Cor total	7662.01	15			

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร จากตารางพบว่าตัวแปร B D และ BD มีค่า F-value สูงกว่าค่า F ณ จุดวิกฤตคือมากกว่า 4.75 [22] แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ได้แก่ B D และ BD ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด (B) แก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด (D) และ สหสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างอุณหภูมิกับแก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด (BD) มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลจึงนำตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มาจัดในเทอมของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากการทดลองจะได้แบบจำลองถดถอย (The Regression Model) ดังนี้

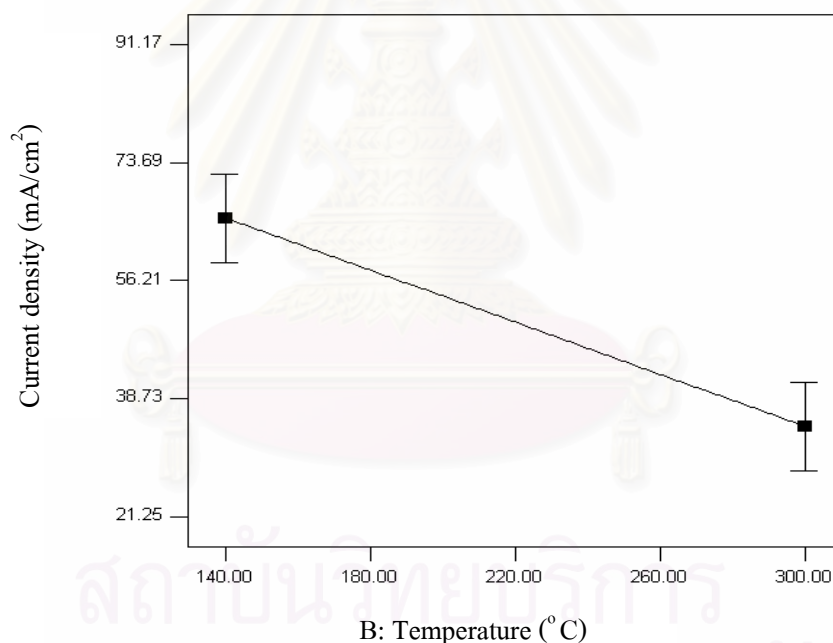
$$\hat{y} = + 50.02 - 15.43 * B - 8.45 * D + 7.84 * B * D \quad (4.1)$$

โดยที่  $\hat{y}$  คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA/cm}^2$ )

เมื่อทราบว่าตัวแปรใดบ้างมีผลต่อค่าตอบสนองแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ต่อไปว่าตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อค่าตอบสนองเช่นไร โดยการนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนอง ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบซั้วอิเล็กโทรด แก๊สที่ใช้ในการอบซั้วอิเล็กโทรด และสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแก๊สที่ใช้ในการอบซั้วอิเล็กโทรด

#### 4.1.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบซั้วอิเล็กโทรด

จากตาราง ANOVA พบว่า อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าปัจจัยอื่นๆ จึงได้นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบซั้วอิเล็กโทรด แสดงในรูปที่ 4.2 ดังนี้



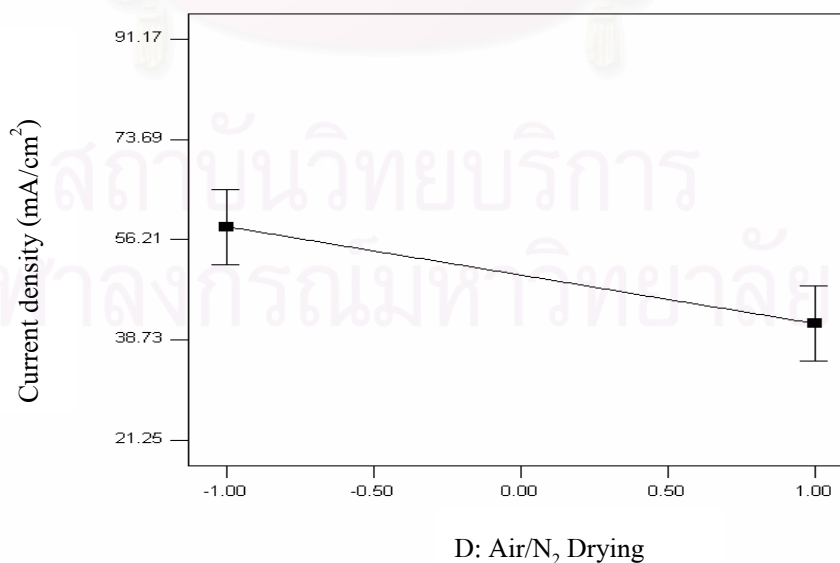
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิการอบซั้วอิเล็กโทรด

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิการอบซั้วอิเล็กโทรด จากกราฟพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส อบซั้วอิเล็กโทรดจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงควรอบซั้วอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

สาเหตุที่ทำให้การอบซ้ำอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วของเนฟิออนที่เป็น ionomer ในชั้นแคตตาลิสต์ คือประมาณ 150° C จึงอาจส่งผลให้การสัมผัสของ 3 เฟสของแก๊สเชื้อเพลิง อิเล็กโทรไลต์ (เนฟิออน) และตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้ไม่ดี และทำให้ไม่สามารถช่วยรักษาความชื้นและป้องกันการสูญเสียน้ำของเมมเบรนได้ ดังนั้นอุณหภูมิการอบซ้ำอิเล็กโทรดจึงมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ Z. Qi, และคณะ[24] ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิของการอบซ้ำอิเล็กโทรด พบว่าการอบซ้ำอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เนฟิออนกลับมามีความชื้นอีกครั้งได้ยาก และที่อุณหภูมิสูงยังเป็นสาเหตุทำให้หมู่กรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) ซึ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำในโครงสร้างของเนฟิออนหายไป ดังนั้นจึงเป็นการสนับสนุนว่าอุณหภูมิมี่ผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

#### 4.1.2 ผลของแก๊สที่ใช้ในการอบซ้ำอิเล็กโทรด

จากตารางANOVA พบว่าตัวแปร D หรือแก๊สที่ใช้ในการอบซ้ำอิเล็กโทรดมีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ จึงนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแก๊สที่ใช้ในการอบซ้ำอิเล็กโทรด แสดงในรูปที่ 4.3 ดังนี้



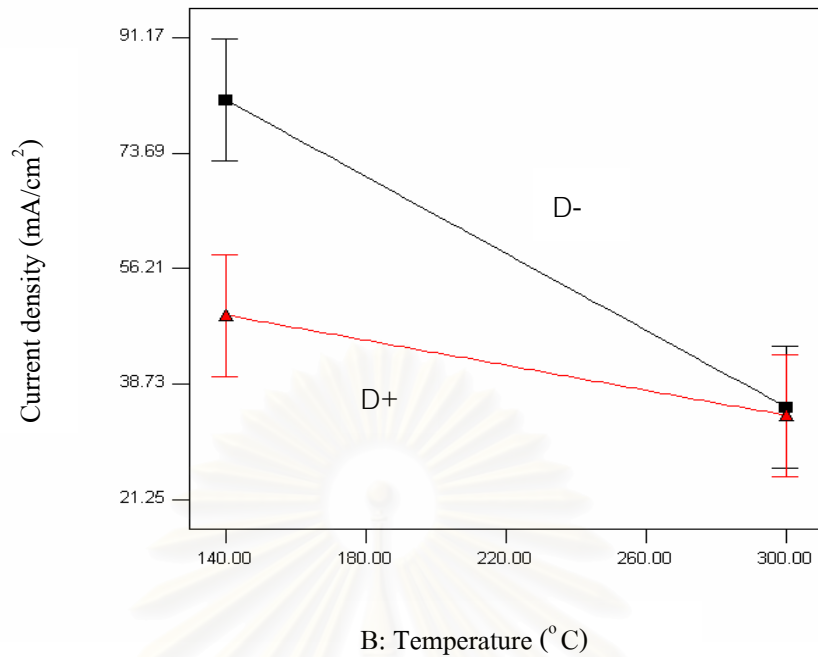
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแก๊สที่ใช้ในการอบซ้ำอิเล็กโทรด

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแก๊สที่ใช้ในการอบซัลฟิวเรชัน พบว่าเมื่ออบซัลฟิวเรชันด้วยอากาศจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าการอบซัลฟิวเรชันด้วยแก๊สไนโตรเจน เหตุผลที่ทำให้การอบซัลฟิวเรชันด้วยอากาศให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าการอบด้วยไนโตรเจนนั้น น่าจะอธิบายได้โดยงานวิจัยของ Cheng และคณะ [30] ซึ่งทำการศึกษาภาวะการเตรียมแพลทินัมบนคาร์บอน (Pt/C) โดยเปรียบเทียบการทำ pretreatment ด้วยการผ่านอากาศเทียบกับการผ่านไนโตรเจน โดย Cheng อธิบายไว้ว่าในการทำ pretreatment ด้วยการผ่านอากาศจะทำให้ได้  $PtO_x$  ที่อยู่บนผิวหน้าเกิดการออกซิไดส์ทำให้  $Pt(NH_3)_4(NO_3)_2$  สลายตัวและเมื่อนำไป reduce ด้วยแก๊สไฮโดรเจนจะทำให้ได้ขนาดอนุภาคของแพลทินัมเล็กกว่าการผ่านด้วยแก๊สไนโตรเจน ดังนั้นในกรณีนี้ออกซิเจนในอากาศน่าจะมีส่วนเข้ามาออกซิไดส์ทำให้ Pt solution ที่อาจยังสลายตัวไม่หมด มากกว่านั้นในการทดลองของ Cheng ยังได้ผลว่าการผ่านอากาศยังทำให้แพลทินัมมีการกระจายตัวที่ดี ไม่เกิดการรวมตัวกันเหมือนการผ่านด้วยแก๊สไนโตรเจน เนื่องจากการผ่านแก๊สไนโตรเจนเมื่อนำมาทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR spectroscopy จะปรากฏพีกของพันธะ Pt-Pt ที่  $2.8 \text{ \AA}^\circ$  แต่สำหรับการผ่านอากาศจะปรากฏพีกที่  $2.05 \text{ \AA}^\circ$  ซึ่งส่งผลให้การเลือนของ Pt-O ใช้ระยะทางที่สั้นกว่า จึงแสดงให้เห็นว่าเกิดสารประกอบ  $PtO_x$  บนคาร์บอนได้มากกว่า และเมื่อปริมาณ  $PtO_x$  มีมากกว่าก็จะไปขัดขวางการรวมตัวกันของแพลทินัม จึงทำให้การผ่านอากาศมีการกระจายตัวที่ดีกว่าการผ่านแก๊สไนโตรเจน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การอบซัลฟิวเรชันด้วยอากาศมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าการอบด้วยแก๊สไนโตรเจน

#### 4.1.3 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแก๊สที่ใช้ในการอบซัลฟิวเรชัน

จากตาราง ANOVA พบว่าตัวแปร BD หรือสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแก๊สที่ใช้ในการอบซัลฟิวเรชันมีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ จึงนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแก๊สที่ใช้ในการอบซัลฟิวเรชันแสดงในรูปที่ 4.4 ดังนี้





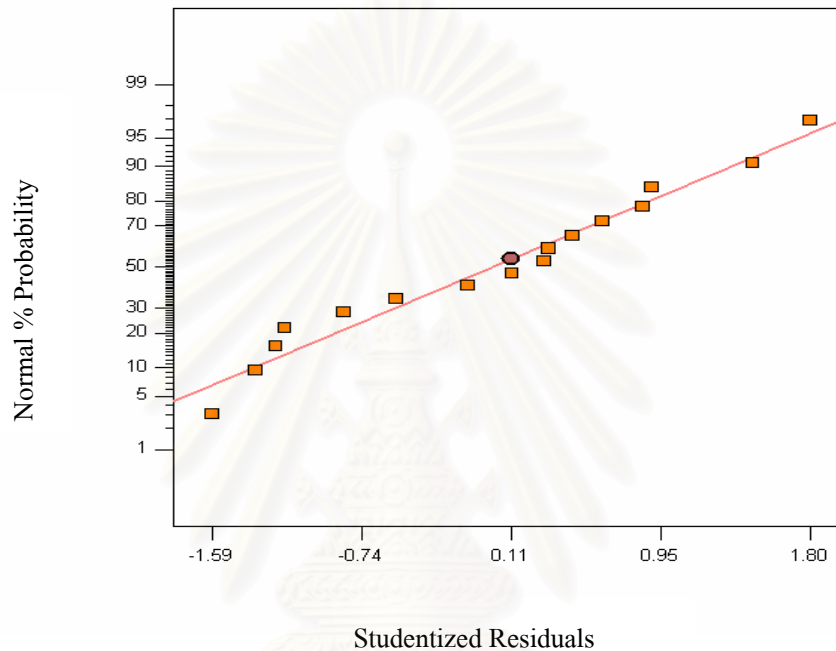
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแก๊สที่ใช้ในการอบซั้วอิเล็กโทรด

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแก๊สที่ใช้ในการอบซั้วอิเล็กโทรด พบว่าการอบซั้วอิเล็กโทรดด้วยอากาศจะให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงเมื่ออบด้วยอุณหภูมิต่ำและการอบซั้วอิเล็กโทรดด้วยไนโตรเจนจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงเมื่ออบด้วยอุณหภูมิที่มีค่าต่ำเช่นเดียวกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าระหว่างการอบด้วยอากาศกับไนโตรเจน พบว่าการอบด้วยอากาศให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าการอบด้วยไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

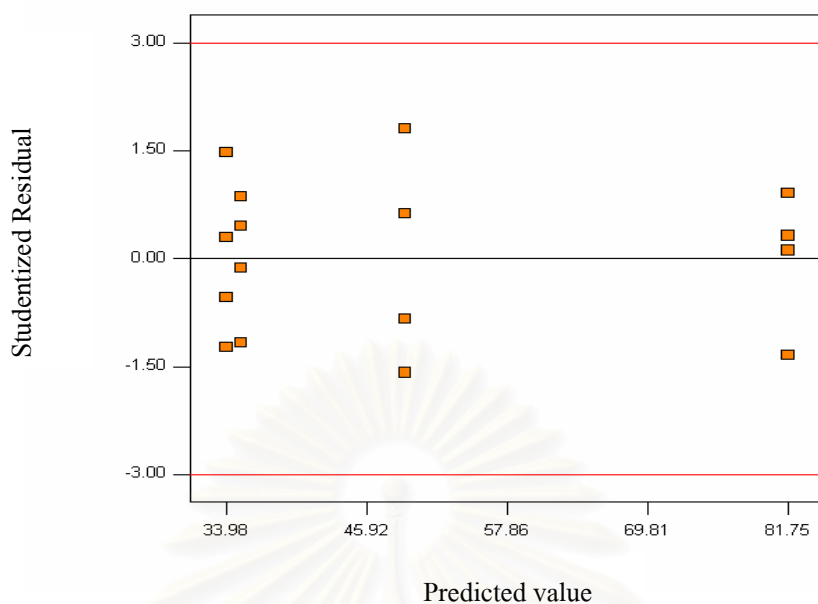
#### 4.1.4 การตรวจสอบสมมติฐานของการออกแบบการทดลองชุดที่ 1

การตรวจสอบสมมติฐานจะกระทำกับส่วนตกค้างของการออกแบบ  $2^k$  โดยการนำมาสร้างกราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ เพื่อวิเคราะห์ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ สมเหตุสมผลหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง

รูปที่ 4.5 แสดงกราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง จะเห็นว่าจุดบนกราฟเรียงตัวใกล้เคียงกับเส้นตรง ซึ่งเป็นการสนับสนุนข้อสรุปที่ว่า B, D และ BD เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ และสมมติฐานเกี่ยวกับการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนเป็นไปตามการกระจายแบบปกติ เป็นที่ยอมรับได้เช่นเดียวกับรูปที่ 4.6 เป็นการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และการกระจายตัวของความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าค่อนข้างคงที่ สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 4.1 สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง



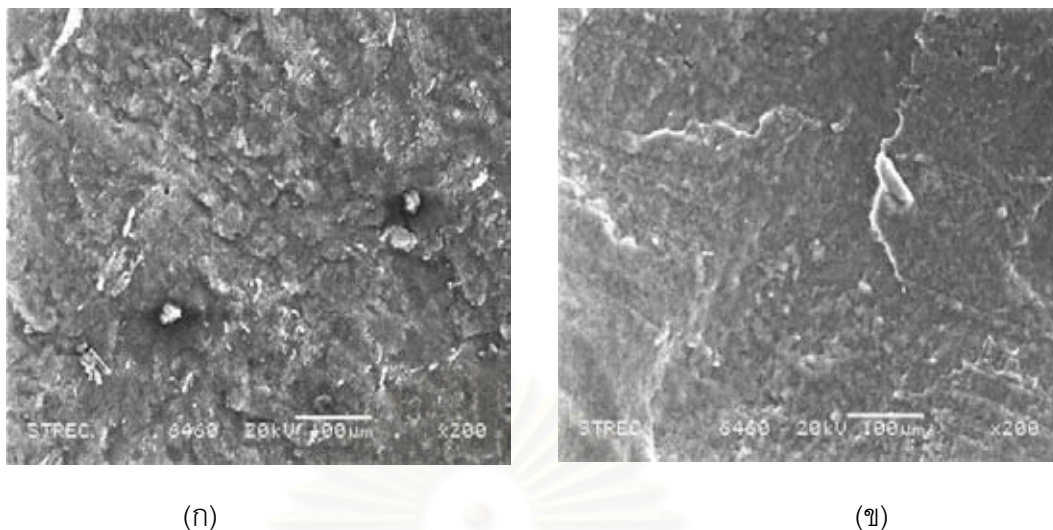
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่มาจากค่าคำนวณทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

#### 4.2 ผลของการทดสอบภายนอก (Ex situ) หรือลักษณะทางกายภาพของขั้วอิเล็กโทรดของการทดลองตอนที่ 1

##### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดโดยวิธีการพิมพ์ จากนั้นนำขั้วอิเล็กโทรดที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์โดยเทคนิค SEM เพื่อดูลักษณะพื้นผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้โดยวิธีการพิมพ์ เปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดทางการค้า (Commercial electrode) ของบริษัท Electrochem, Inc. แสดงดังรูปที่ 4.7 ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

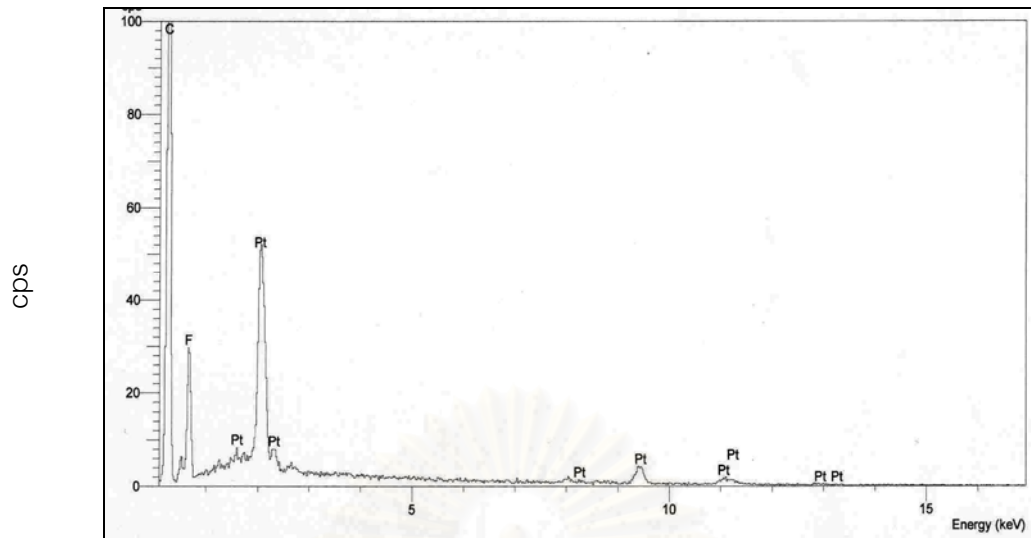


รูปที่ 4.7 พื้นผิวหน้าของข้าวเปลือกโหดวัดด้วยเครื่องSEM: รูป (ก) ข้าวเปลือกโหดทางการค้า;  
(ข) ข้าวเปลือกโหดที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์

จากรูปที่ 4.7 แสดงพื้นผิวหน้าของข้าวเปลือกโหดโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่าเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกโหดทางการค้า รูป (ก) กับข้าวเปลือกโหนดที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ รูป (ข) พบว่าพื้นผิวหน้าของข้าวเปลือกโหนดทั้งสองมีลักษณะคล้ายคลึงกันโดยพื้นผิวหน้ามีความเรียบและไม่มีรอยแตกเช่นเดียวกัน ซึ่งถ้าข้าวเปลือกโหนดที่เตรียมได้มีรอยแตกจะส่งผลต่อสมรรถนะของข้าวเปลือกโหนดได้

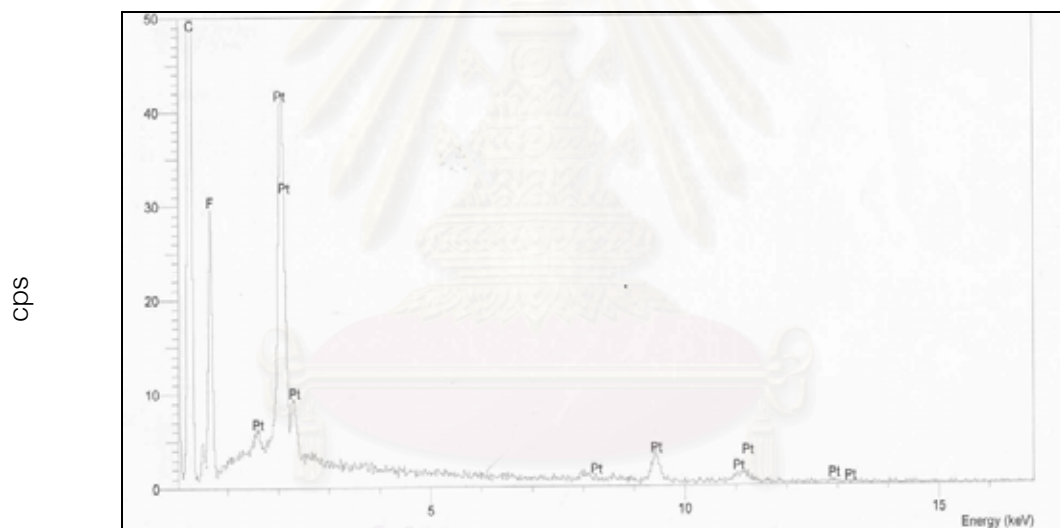
#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Energy Dispersive X-ray (EDX)

นำข้าวเปลือกโหนดที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX เพื่อตรวจสอบว่าข้าวเปลือกโหนดที่เตรียมได้ มีองค์ประกอบเช่นเดียวกับข้าวเปลือกโหนดทางการค้าหรือไม่ และปริมาณแคลเซียมบนข้าวเปลือกโหนดมีปริมาณเท่าไร ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.8 ดังนี้



Energy (keV)

(ก)



Energy (keV)

(ข)

รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ปริมาณแพลทินัมโดยเครื่อง EDX: (ก) ชั่วอิเล็กโทรดทางการค้า; (ข) ชั่วอิเล็กโทรดที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์

ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้วิธีการพิมพ์ อาจทำให้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดผลิตพลาดได้ เนื่องจากเกิดการสูญเสียระหว่างทำการพิมพ์ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้เทคนิค EDX



รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณแพลทินัมและองค์ประกอบอื่นๆ เปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดทางการค้าของบริษัท Electrochem รูป(ก) กับขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ รูป (ข) ขั้วอิเล็กโทรดทางการค้า โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX พบว่าบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยคาร์บอน ฟลูออรีน และแพลทินัมเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มาจากส่วนผสมในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรด ในส่วนของแพลทินัมพบว่ามีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอเนื่องจากแพลทินัมมีระดับพลังงานหลายค่าจึงสามารถเกิดพีคได้หลายตำแหน่ง ดังนั้นการหาปริมาณแพลทินัมจึงเป็นการนำพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของแพลทินัมมารวมกันและคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

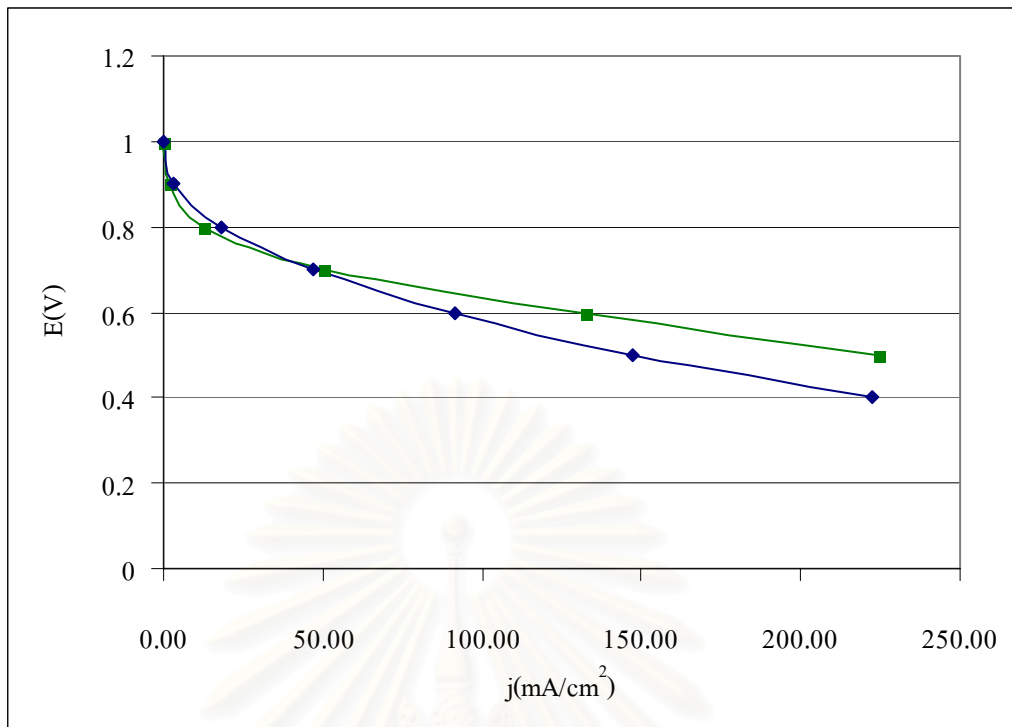
จากการนำขั้วอิเล็กโทรดทางการค้าที่มีปริมาณแพลทินัม  $1 \text{ mg/cm}^2$  มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX พบว่ามีปริมาณแพลทินัมร้อยละ 17.23 และเมื่อนำขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX พบว่ามีปริมาณแพลทินัมร้อยละ 16.06 โดยคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7.29 จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรด พบว่ามีปริมาณแพลทินัม  $1.45 \text{ mg/cm}^2$  และนำมาคำนวณด้วยวิธีดุลมวล ได้ปริมาณแพลทินัมเท่ากับ  $0.82 \text{ mg/cm}^2$  (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.1)

#### 4.3 ผลของการทดสอบภายใน (In situ) หรือการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

##### 4.3.1 การศึกษาในรูปโพลาริเซชันของการทดลองตอนที่ 1

ผลการนำเอมื่อที่เตรียมได้และเอมื่อเอทางการค้ามาวัดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ  $100 \text{ sccm}$  อุณหภูมิเซลล์เท่ากับ  $60^\circ\text{C}$  โดยให้ความชื้นสัมพัทธ์แก่แก๊สทั้งสองชนิดเท่ากับ 100 และความดัน 1 บรรยากาศ ทำการทดสอบครั้งละ 10 ระดับของศักย์ไฟฟ้า (จาก 1 - 0.1 V) ระดับละ 200 วินาที ผลการทดลองแสดงในกราฟรูปที่ 4.9 ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

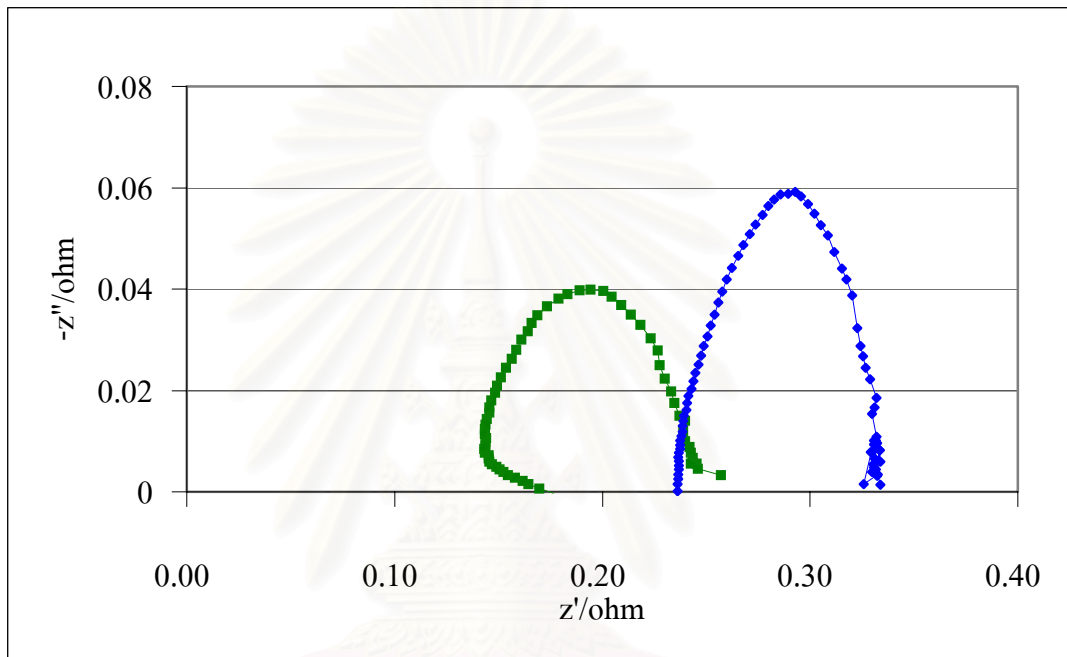


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเอ็มอีเอจากการทดลองลำดับที่ 6 เปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทางการค้า: (■) เอ็มอีเอทางการค้า; (◆) เอ็มอีเอที่เตรียมได้

รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองในกราฟโพลาริเซชัน พบว่าช่วงศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 1 ถึง 0.7 V ซึ่งเป็นช่วงโพลาริเซชันทางเคมี (Chemical Polarization) หรือ Activation losses ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่าของเอ็มอีเอทางการค้าจากบริษัท Electrochem เล็กน้อยแต่ในช่วงศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0.6 ถึง 0.1 V ซึ่งเป็นช่วงโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization) หรือ Ohmic resistance พบว่าเอ็มอีเอทางการค้ามีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเอ็มอีเอที่เตรียมได้ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.6 V ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอทางการค้ามีค่าเท่ากับ 135.68 mA/cm<sup>2</sup> และขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 91.17 mA/cm<sup>2</sup> โดยคิดค่าความแตกต่างเป็นร้อยละ 32.81

### 4.3.2 การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนในเซลล์เชื้อเพลิงทำโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์ในรูปอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)

ผลของการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ค่าความถี่ตั้งแต่ 100Hz. – 50 mHz. แสดงในรูปที่ 4.10 ดังนี้



รูปที่ 4.10 อิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ของการทดลองลำดับที่ 6 เปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทางการค้า: (■) เอ็มอีเอทางการค้า ; (◆) เอ็มอีเอที่เตรียมได้

รูปที่ 4.10 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานจินตภาพ ( $-Z''$ ) กับค่าความต้านทานจริง ( $Z'$ ) ของการทดลองลำดับที่ 6 เปรียบเทียบกับ เอ็มอีเอทางการค้าหรือ Commercial MEA จากกราฟสามารถอ่านค่าความต้านทานโห้มิก (Ohmic resistance,  $R_{\Omega}$ )ได้จากแกน x หรือแกนค่าความต้านทานจริง จากค่า 0 ไปยังจุดตัดแกน x ด้านซ้ายสุดของครึ่งวงกลม พบว่าเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 0.23 โอห์ม และเอ็มอีเอทางการค้ามีค่าเท่ากับ 0.17 โอห์ม เอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานโห้มิกสูงกว่าคิดเป็นร้อยละ 35.29 และค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ (Cathode Faradic resistance,  $R_{FC}$ ) สามารถอ่านได้จากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูปครึ่งวงกลม จากกราฟจะได้อ่านค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุของเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 0.10 โอห์ม

และเอ็มอีเอทางการค้ามีค่าเท่ากับ 0.08 โอห์ม โดยคิดค่าความแตกต่างเป็นร้อยละ 25 ซึ่งเอ็มอีเอที่มีการทำปฏิกิริยาที่เร็วหรือมีค่า reaction kinetics ที่สูงจะมีขนาดวงที่เล็ก

จากกราฟ Nyquist ค่าความถี่ของจุดตัดแกน x ด้านซ้ายสุดของครึ่งวงกลมจะมีความถี่สูงที่สุด จากนั้นจะลดลงจากซ้ายไปขวา ที่ช่วงกลางของความถี่ ค่าตอบสนองของอิมพีแดนซ์จะมีทั้งค่าจริงและค่าจินตภาพ โดยความถี่ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลมจะสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าจากสมการ

$$\omega = \frac{1}{R_f C_{dl}} \quad (4.2)$$

โดยที่

$C_{dl}$  = Capacitor (F)

$\omega$  = Radial frequency (radians/ s)

$R_f$  = Faradic resistance ( $\Omega$ )

f = frequency (Hertz)

จากกราฟ Nyquist สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าของเอ็มอีเอทางการค้าได้เท่ากับ 0.01 F และค่าความจุไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 0.43 F พบว่าเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าความจุไฟฟ้าสูงกว่าคิดเป็นร้อยละเท่ากับ 42

เนื่องจากค่าความต้านทานโอห์มิก ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุและค่าความจุไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่าเอ็มอีเอทางการค้า จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอทางการค้า ซึ่งสรุปผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 4.4

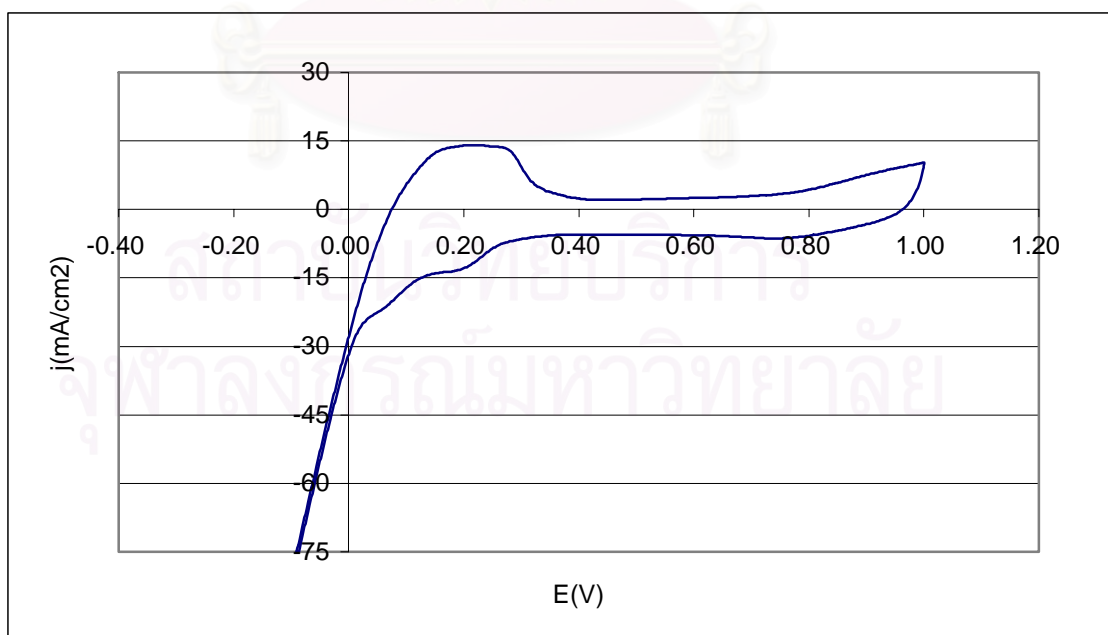
จากตารางพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่าเอ็มอีเอทางการค้ามาก ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าจึงอาจส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความต้านทานในเซลล์ ส่งผลให้เอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าเอ็มอีเอทางการค้าอยู่พอสมควร

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิงของการทดลองตอนที่ 1 จากรูปที่ 4.10

Fuel cell Process	Circuit Element	Value	
		Commercial MEA	This work
Ohmic resistance ( $\Omega$ )	$R_{\Omega}$	0.17	0.23
Cathode Faradic resistance ( $\Omega$ )	$R_{f,C}$	0.08	0.10
Capacitor (F)	$C_{dl}$	0.01	0.43

#### 4.3.3 Cyclic Sweep Voltammetry (CV) measurement

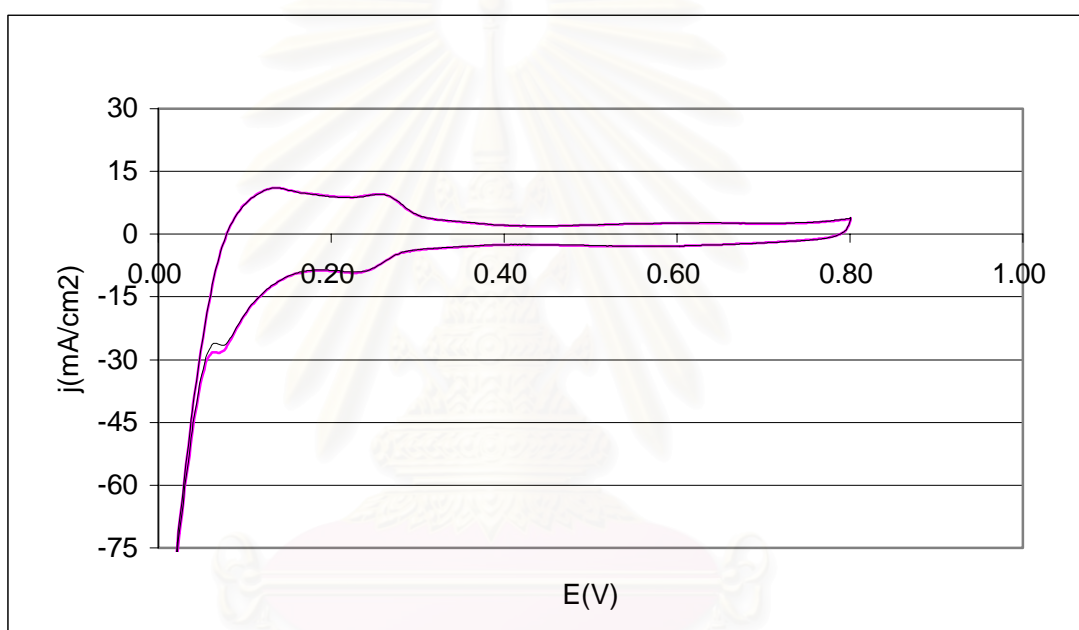
การวัด CV เพื่อหาพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Surface Area, ECA) ของขั้วแคโทดซึ่งหาได้จากการดูดซับของแก๊ส กระทำที่อุณหภูมิห้องทั้งอุณหภูมิเซลล์และอุณหภูมิของหม้อความชื้น ตั้งค่า Sweep rate ที่  $20 \text{ mVs}^{-1}$  จากนั้นตั้งค่า Number of scan เท่ากับ 5 และตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $0.01 - 0.80 \text{ V}$  อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด  $100 \text{ sccm}$  และตั้งค่าอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ขั้วแคโทด  $100 \text{ sccm}$  ผลที่ได้แสดงในรูปแบบที่ 4.11 และ 4.12 ดังนี้



รูปที่ 4.11 กราฟ CV ของการทดลองที่ 6



จากกราฟรูปที่ 4.11 นำไปหาพื้นที่ใต้กราฟเพื่อนำไปคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้า (Charge) หน่วยเป็นคูลอมบ์ และนำค่าประจุที่ได้ไปคำนวณหาค่า ECA ตามสมการที่ 3.1 ได้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากับ 0.65 คูลอมบ์ และค่า ECA เท่ากับ  $61.43 \text{ m}^2/\text{g}$  และรูปที่ 4.12 แสดงกราฟ CV ของเอ็มอีเอทางการค้า ได้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากับ 0.58 คูลอมบ์ และค่า ECA เท่ากับ  $49.40 \text{ m}^2/\text{g}$  จะพบว่าค่า ECA ของเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่าค่า ECA ของเอ็มอีเอทางการค้าเพียงเล็กน้อย จึงส่งผลให้ช่วงโพลาริเซชันทางเคมี (Chemical Polarization) หรือ Activation losses ซึ่งเป็นช่วงที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา เอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเอ็มอีเอทางการค้าเล็กน้อยเช่นกัน



รูปที่ 4.12 กราฟ CV ของเอ็มอีเอทางการค้า

จากชุดการทดลองตอนที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า ที่ภาวะการทดลองที่ 6 คือ ปริมาณเทพลอน  $10 \mu\text{L}$ , อุณหภูมิ  $140^\circ\text{C}$ , เวลา 1 ชั่วโมง และอบด้วยอากาศ ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ยังมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำ จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในการทดลองตอนที่ 2 เพื่อทำการพัฒนาและปรับปรุงให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น

#### 4.4 การออกแบบการทดลอง (ตอนที่ 2)

เนื่องจากผลการทดลองในตอนที่ 1 พบว่าเอ็มอีเอทีเตรียมได้มีค่าความต้านทานสูงกว่าเอ็มอีเอทางการค้าจึงทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 2 จึงได้ทำการปรับปรุงและพัฒนาการเตรียมเอ็มอีเอจากการทดลองตอนที่ 1 นอกจากนี้ยังได้ปรับปรุงหม้อความชื้นจากการทดลองตอนที่ 1 (แสดงในภาคผนวก จ) เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

จากการทดลองตอนที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า การอบซั้วอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิต่ำและการอบซั้วอิเล็กโทรดในภาวะอากาศ จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 2 จึงเลือกทำการศึกษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส และทำการศึกษาในภาวะอากาศเท่านั้น การออกแบบการทดลองในตอนที่ 2 มีตัวแปรที่ต้องการศึกษา 4 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณเทพลอน อุณหภูมิการอบซั้วอิเล็กโทรด ปริมาณเนฟิออน และระยะเวลาในการอบซั้วอิเล็กโทรด โดยกำหนดให้

A คือ ปริมาณเทพลอนต่ำสุดที่ 0 ไมโครลิตร (-) และสูงสุดที่ 10 ไมโครลิตร (+)

B คือ อุณหภูมิการอบต่ำสุดที่ 80 องศาเซลเซียส (-) และสูงสุดที่ 140 องศาเซลเซียส (+)

C คือ ปริมาณเนฟิออนต่ำสุดที่ 20% (-) และสูงสุดที่ 30% (+)

D คือ ระยะเวลาในการอบต่ำสุดที่ 0.5 ชั่วโมง (-) และสูงสุดที่ 1 ชั่วโมง (+) ต่ำสุด

ดังตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ปัจจัยและระดับค่าของการทดลองตอนที่ 2

ปัจจัย	ระดับ	ระดับ
	(-1)	(+1)
A= ปริมาณเทพลอน ( $\mu\text{L}$ )	0	10
B =อุณหภูมิการอบ ( $^{\circ}\text{C}$ )	80	140
C = ปริมาณเนฟิออน (%)	20	38
D= เวลาการอบ (hr.)	0.5	1

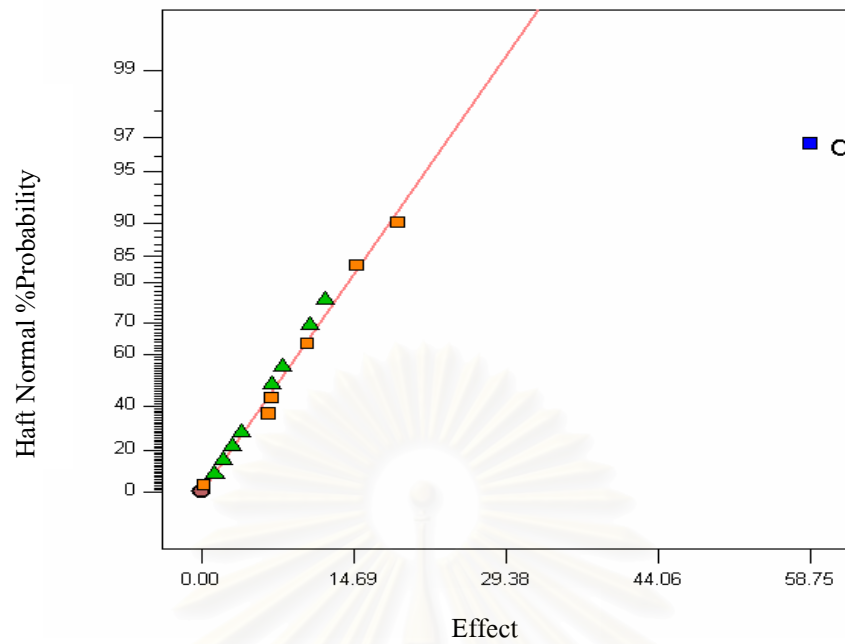
ตารางที่ 4.6 ชุดการทดลองและผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง  $2^{4-1}$  แฟกทอเรียลตอนที่ 2

ลำดับที่	A	B	C	D	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm <sup>2</sup> )	
					Replicate 1	Replicate 2
1	-	-	-	-	252	232
2	+	-	-	+	209	190
3	-	+	-	+	234	228
4	+	+	-	-	240	216
5	-	-	+	+	150	165
6	+	-	+	-	150	182
7	-	+	+	-	218	152
8	+	+	+	+	166	172

ตารางที่ 4.6 แสดงชุดการทดลองและผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง  $2^{4-1}$  แฟกทอเรียล ดังนั้นการทดลองจึงมีทั้งหมด 8 การทดลอง ทำการทดลอง 2 replicate พบว่าการทดลองที่ 1 ซึ่งภาวะการทดลองที่ใช้คือ ปริมาณเทฟลอน 0  $\mu\text{L}$  อุณหภูมิ 80  $^{\circ}\text{C}$  ปริมาณเนฟลอน 20% และเวลา 0.5 ชั่วโมง ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 252 mA/cm<sup>2</sup> และกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.76 W ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V จากการทดลองที่ 2 สามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากการทดลองที่ 1 คิดเป็น 176.41%

จากนั้นนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลตัวแปรตอบสนองซึ่งในที่นี้คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยนำมาสร้างกราฟ Normal Probability Plot แสดงในรูปที่ 4.12 ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal %Probability กับปัจจัยต่างๆ

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normal %Probability กับปัจจัยต่างๆ พบว่า ตัวแปร C หรือปริมาณเนฟิออน มีผลต่อค่าตอบสนอง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวนหรือ ANOVA

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) ในการทดลองนี้มีการคำนวณค่าแจกแจงทางสถิติแบบ F ( $F_0$ ) ซึ่งจะแสดงผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัว โดยพิจารณาค่า  $F_0$  ของแต่ละตัวแปรเทียบกับค่า F ณ จุดวิกฤต หรือ  $F_{\alpha, v_1, v_2}$  โดยค่า  $\alpha$  คือระดับความเชื่อมั่น ซึ่งในการทดลองครั้งนี้พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % หรือระดับความสำคัญเท่ากับ 0.05 โดยที่  $v_1$  คือ degree of freedom ของตัวแปรที่ศึกษา และ  $v_2$  คือ degree of freedom ของความคลาดเคลื่อน จะได้ว่าค่าวิกฤตของการทดลองนี้เท่ากับ  $F_{0.05, 1, 14} = 4.60$  [22] โดยเมื่อค่า  $F_0$  ของตัวแปรที่ศึกษา มีค่ามากกว่า 4.60 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง แสดงผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) ของการทดลองตอนที่ 2

Source	Sum of Square	DF	Mean Square	F value	Prob>F
Model	13806.25	1	13806.25	30.51225	< 0.0001
C	13806.25	1	13806.25	30.51225	< 0.0001
Residual	6334.75	14	452.4821		
Lack of Fit	3115.75	6	519.2917	1.290566	0.3592
Pure Error	3219	8	402.375		
Cor Total	20141	15			

ตารางที่ 4.7 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร จากตารางพบว่าตัวแปร C มีค่า F-value สูงกว่าค่า F ณ จุดวิกฤตคือมากกว่า 4.60 [22] แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า คือ ตัวแปร C หรือปริมาณเนฟิออน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณเนฟิออน มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลจึงนำตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มาจัดในเทอมของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากการทดลองจะได้แบบจำลองถดถอย (The Regression Model) ดังนี้

$$\hat{y} = +198.75 - 29.38 * C \quad (4.3)$$

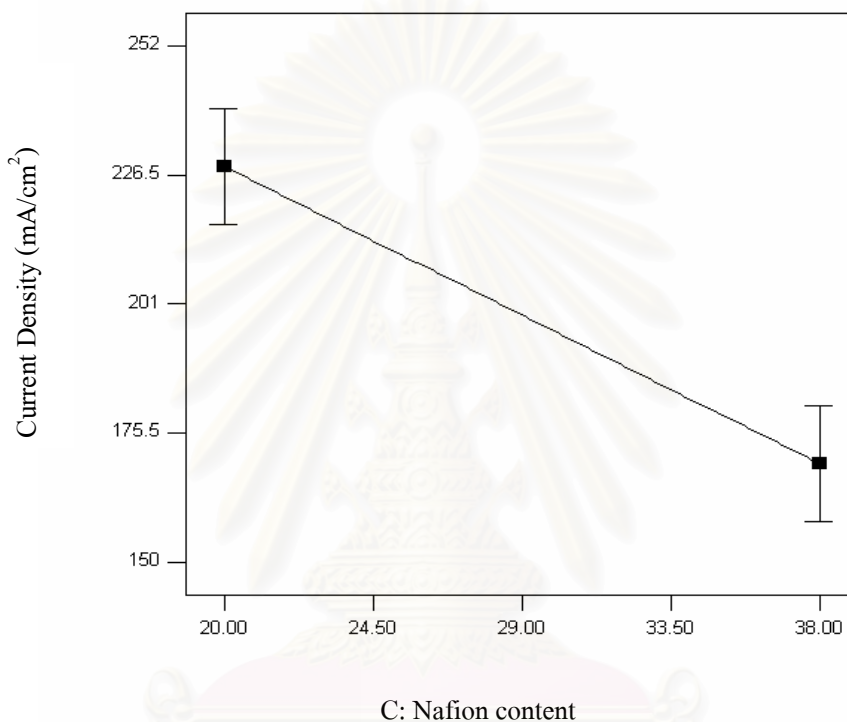
โดยที่  $\hat{y}$  คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4.4.1 ผลของปริมาณเนฟลอน

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปริมาณเนฟลอนเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับปริมาณเนฟลอน ดังแสดงในรูปที่ 4.14

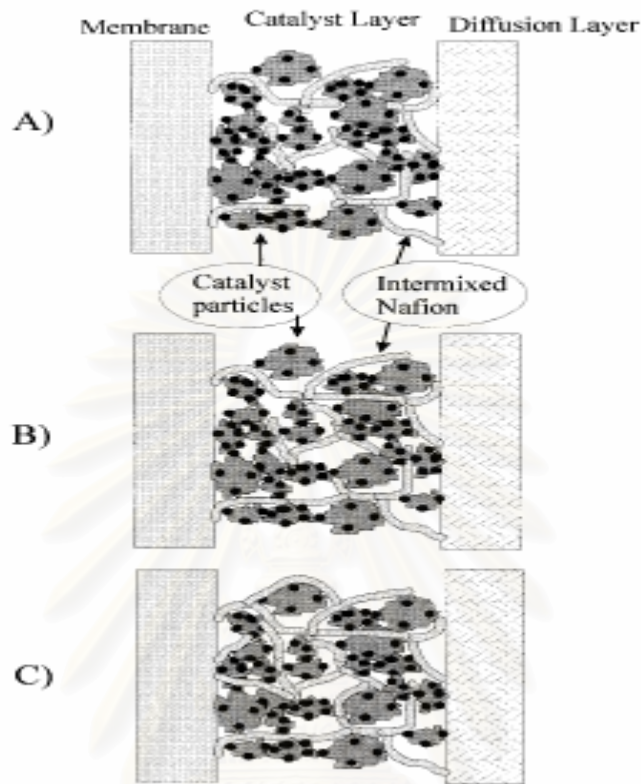


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับปริมาณเนฟลอน

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับปริมาณเนฟลอน พบว่า ปริมาณเนฟลอน 20% ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าปริมาณเนฟลอน 38% ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นจึงควรเลือกใช้ปริมาณเนฟลอน 20%

สาเหตุที่ทำให้ปริมาณเนฟลอน 20% ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าปริมาณเนฟลอนที่ 38% อาจเนื่องมาจากที่ 38% เป็นปริมาณเนฟลอนที่มากเกินไป จนทำให้เป็นตัวขัดขวางตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา ขัดขวางรูพรุนของขั้วอิเล็กโทรด ลดความสามารถในการซึมผ่านได้ของแก๊ส (Gas permeability) และเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการถ่ายโอนมวล จึงทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ E. Passalacqua และคณะ [31] ซึ่งทำการศึกษา

ปริมาณเนฟลอนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้อธิบายเหตุผลที่ปริมาณเนฟลอนส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 4.16 ดังนี้



รูปที่ 4.15 ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา; (A) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณเนฟลอนน้อยเกินไป, (B) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณเนฟลอนที่เหมาะสม, (C) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณเนฟลอนมากเกินไป

[31]

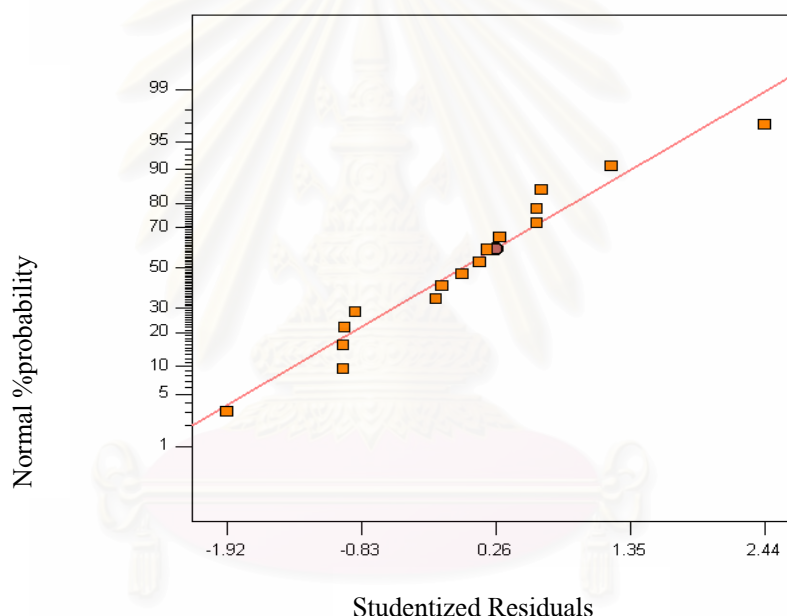
รูปที่ 4.15 แสดงชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณเนฟลอนต่างๆ รูป (A) เป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณเนฟลอนน้อยเกินไป พบว่าปริมาณเนฟลอนที่น้อยเกินไปจะทำให้อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถเชื่อมต่อกับเมมเบรนโดยใช้สะพานเนฟลอน (Nafion bridge) ได้ทั้งหมด รูป (C) เป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณเนฟลอนมากเกินไป พบว่าเมื่อปริมาณเนฟลอนมากเกินไป อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนเชื่อมต่อไปยังชั้นแพร่ของแก๊สไม่สามารถไปได้ทั้งหมด รูป (B) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณเนฟลอนที่เหมาะสม พบว่าเมื่อมีปริมาณเนฟลอนที่เหมาะสมจะทำให้มีการเชื่อมต่อที่ดีสำหรับการนำออกซิเจนและอิเล็กตรอนของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด

E. Antolini และคณะ [13] ได้อธิบายไว้ว่าปริมาณเนฟลอนที่น้อยเกินไปจะส่งผลให้การนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรไลต์ไม่ดี การนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเนฟลอน แต่ถ้ามีปริมาณ

เนฟิออนมากเกินไป ทำให้ชั้นของพอลิเมอร์ภายในรูพรุนของซั้วอิเล็กโทรดหนาขึ้นเกิดปัญหาการถ่ายโอนมวล ซึ่งทำให้ขัดขวางการเข้ามาทำปฏิกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงที่บริเวณการเกิดปฏิกิริยา และทำให้น้ำท่วมซั้วอิเล็กโทรด

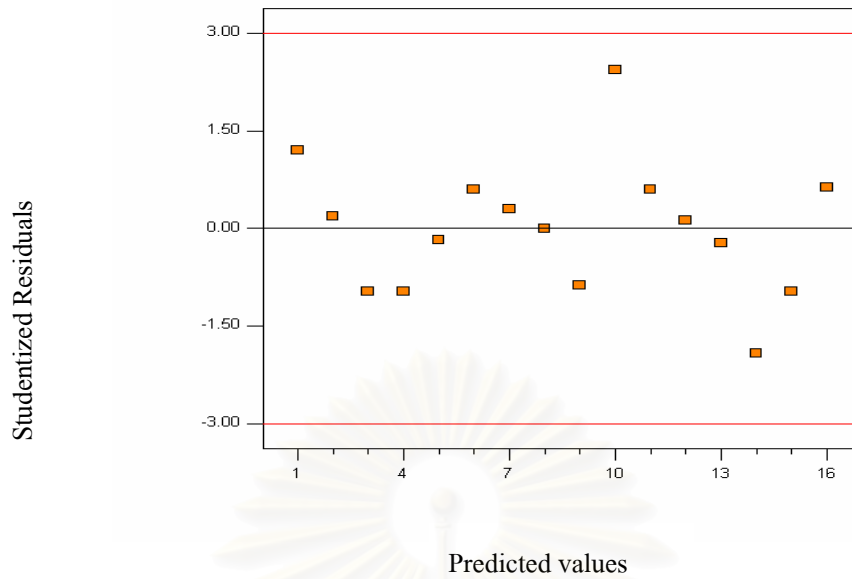
#### 4.4.2 การตรวจสอบสมมติฐานของการออกแบบการทดลองชุดที่ 2

การตรวจสอบสมมติฐานจะกระทำกับส่วนตกค้างของการออกแบบ  $2^k$  โดยการนำมาสร้างกราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง

รูปที่ 4.16 แสดงกราฟการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง จะเห็นว่าจุดบนกราฟเรียงตัวใกล้เคียงกับเส้นตรง ซึ่งเป็นการสนับสนุนข้อสรุปที่ว่า ตัวแปร C หรือปริมาณเนฟิออนมีผลอย่างมีนัยสำคัญ และสมมติฐานเกี่ยวกับการกระจายตัวแบบปกติเป็นที่ยอมรับได้ เช่นเดียวกับรูปที่ 4.17 เป็นการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน มีค่าความกว้างค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจึงถือได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ 4.3 สามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

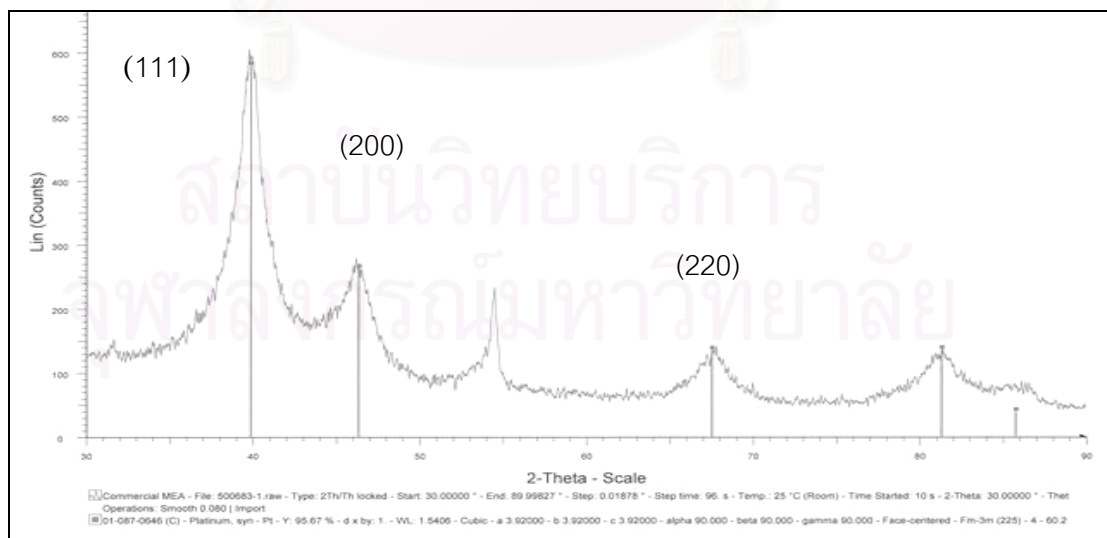


รูปที่ 4.17 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าผลผลิตที่ถูกทำนาย (Predicted)

#### 4.5 ผลของการทดสอบภายนอก (Ex situ) ของการทดลองตอนที่ 2

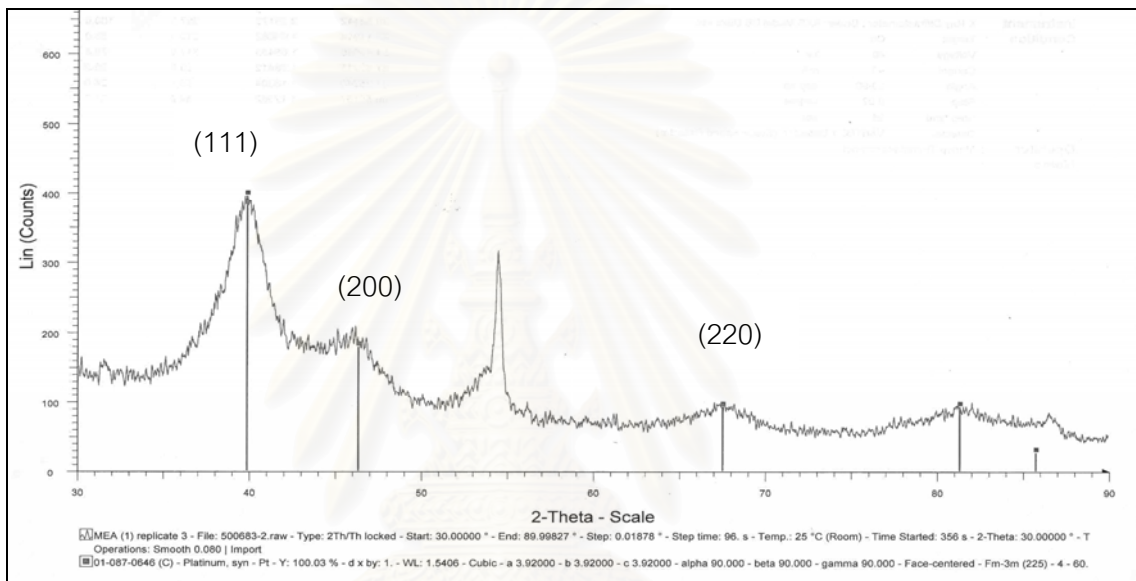
##### 4.5.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาบนซัลไฟด์ไทโรด

ศึกษาโครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนซัลไฟด์ไทโรดโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนซัลไฟด์ไทโรดทางการค้า โดยเทคนิค XRD

รูปที่ 4.18 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนซัลไฟด์ทรานด์ทาง การค้า พบว่าแพลทินัมมีการจัดเรียงตัวของอะตอม 3 รูปแบบ คือ 111, 200, 220 ที่มีมุมประมาณ 39.80 องศา เป็นฟีกของโครงสร้าง 111 ซัลไฟด์ทรานด์ทางการค้ามีค่าความเข้มของฟีก (Intensity) เท่ากับ 598 ซึ่งมีปริมาณมากกว่าโครงสร้าง 200 และ 220 การจัดเรียงตัวแบบ 111 จะทำให้อะตอมของแพลทินัมใกล้ชิดกัน และระยะระหว่างแกนสั้นกว่าการจัดเรียงตัวแบบ 200 และ 220 จึงมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าการจัดเรียงตัวแบบ 200 และ 220



รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนซัลไฟด์ทรานด์ที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ โดยเทคนิค XRD

รูปที่ 4.19 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนซัลไฟด์ทรานด์ที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ พบว่าแพลทินัมมีการจัดเรียงตัวของอะตอม 3 รูปแบบ คือ 111, 200, 220 เช่นเดียวกับซัลไฟด์ทรานด์ทางการค้า แต่ซัลไฟด์ทรานด์ที่เตรียมได้มีค่าความเข้มของฟีกเท่ากับ 397 แสดงว่าซัลไฟด์ทรานด์ทางการค้ามีปริมาณแพลทินัมที่มีโครงสร้าง 111 มากกว่าซัลไฟด์ทรานด์ที่เตรียมได้คิดเป็นร้อยละ 33.61 ดังนั้นปริมาณโครงสร้าง 111 ที่ต่างกัน จึงอาจทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของซัลไฟด์ทรานด์ที่เตรียมได้มีปริมาณน้อยกว่าซัลไฟด์ทรานด์ทางการค้าซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากวิธีการเตรียมชั้นปฏิกิริยาบนซัลไฟด์ทรานด์ที่ต่างกัน และเมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.8 มาคำนวณหาขนาดของแพลทินัมโครงสร้าง 111 ของซัลไฟด์ทรานด์ทางการค้าพบว่ามีความยาวเท่ากับ

8.11 นาโนเมตร และซั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้มีขนาดเท่ากับ 5.88 นาโนเมตร (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวกง)

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการวิเคราะห์ X-rays diffraction ของซั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้และซั้วอิเล็กโทรดทางการค้าที่โครงสร้างแพลทินัม 111

โครงสร้าง ซั้วอิเล็กโทรด	Pt(111)				
	$2\theta$ (องศา)	d-value ( $\text{\AA}$ )	ความเข้มของพีค (count)	$\beta_{2\theta}$ (เรเดียน)	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)
ซั้วอิเล็กโทรดที่ เตรียมได้*	39.824	2.262	397.0	2.356	5.88
ซั้วอิเล็กโทรดทาง การค้า	39.806	2.263	598	1.710	8.11

\*เป็นซั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมที่ภาวะของ MEA (1) ของชุดการทดลองที่ 2

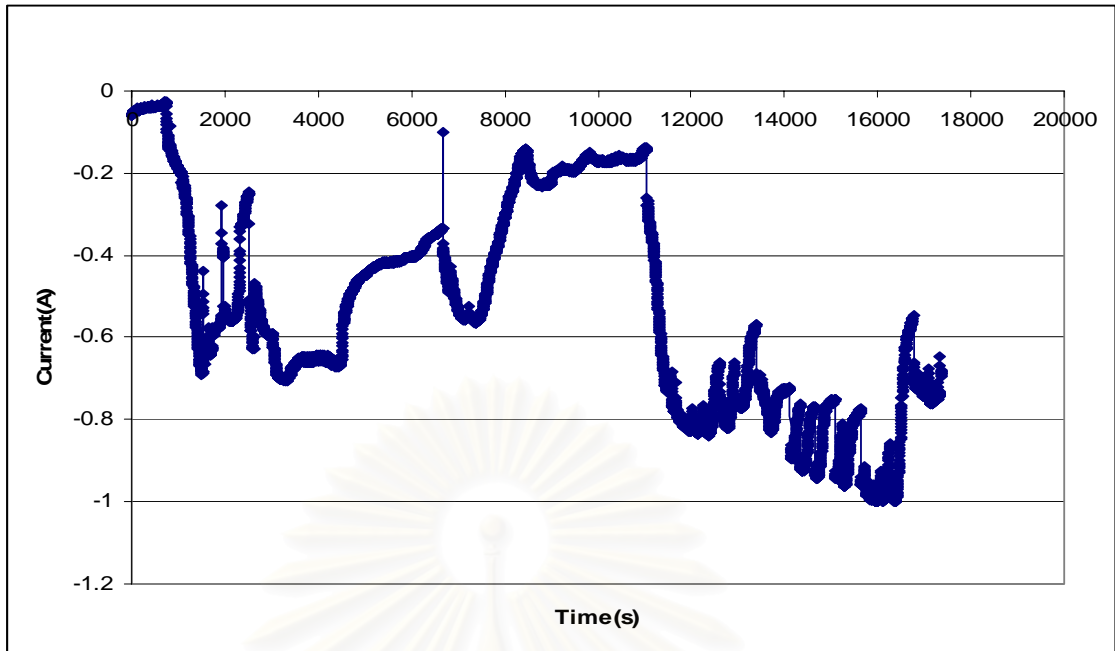
#### 4.6 ผลของการทดสอบภายใน (In situ) หรือการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ตอนที่ 2

##### 4.6.1 การ Break-In

ในการทดลองตอนที่ 2 นอกจากการปรับปรุงการเตรียมเอ็มอีเอจากการทดลองที่ 1 แล้ว ยังทำการ Break-In เพื่อให้เอ็มอีเอที่เตรียมได้มีความชื้นที่เพียงพอก่อนการนำไปทดสอบสมรรถนะ

ภาวะของการ Break-In จะกระทำที่ศักย์ไฟฟ้า 0.5 V เพิ่มความดันของระบบเป็น 2 บรรยากาศ และใช้เวลาในการ Break-In อย่างน้อย 5 ชั่วโมง อุณหภูมิเซลล์เท่ากับ  $60^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิของหม้อความชื้นทั้งด้านแอโนดเท่ากับ  $65^{\circ}\text{C}$  และด้านแคโทดเท่ากับ  $60^{\circ}\text{C}$  ใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น แต่ในระหว่างการ Break-In อาจจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่ความชื้นในระบบยังไม่เพียงพอ

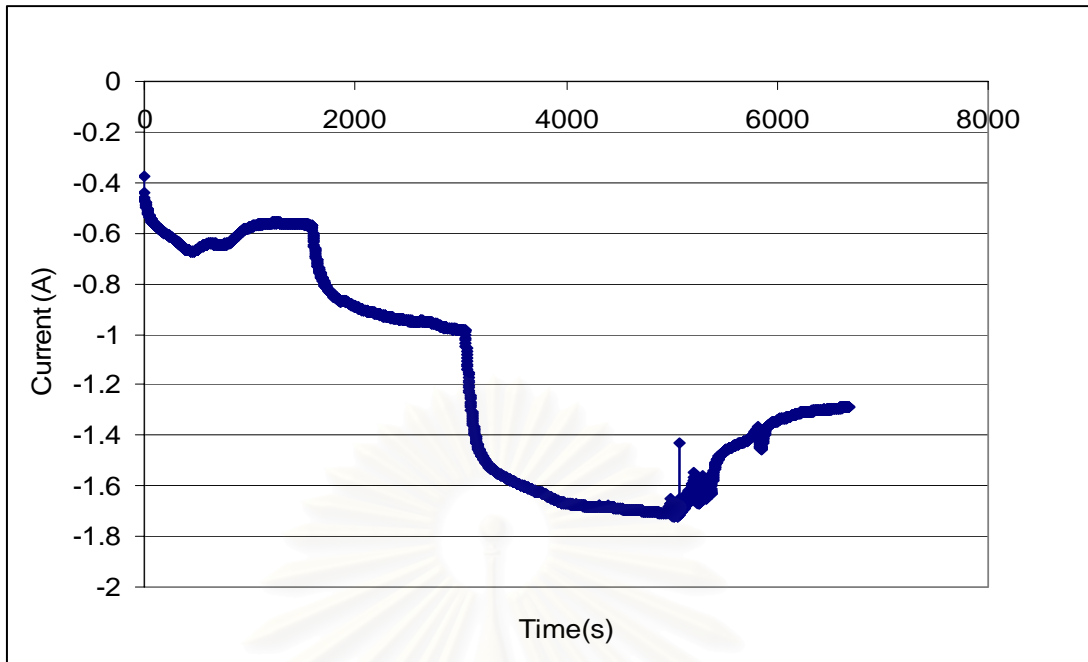




รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา สำหรับการ Break-In ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.5 V ของเอมอีเอทีเตรียมได้ของภาวะการทดลองที่ 1 ของชุดการทดลองที่ 2 (ครั้งที่ 1)

จากรูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อนำเอมอีเอทีผ่านการ Break-In แล้วมาทำการ Break-In ซ้ำ จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นและใช้เวลาในการ Break-In น้อยกว่าการ Break-In ในครั้งแรก นอกจากนี้ยังทำให้กระแสไฟฟ้าที่ได้ไม่ขึ้นลงเหมือนครั้งแรก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการ Break-In ในครั้งที่ 2 เป็นการเพิ่มเวลาให้กับการ Break-In จึงทำให้ความชื้นในระบบเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในการ Break-In จึงควรกระทำจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าไม่ลดลงหรือลดลงน้อยที่สุด จึงนำเอมอีเอทีไปทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป อย่างไรก็ตามเมื่อนำเอมอีเอทีมาทดสอบซ้ำ ควรจะต้องมีการทำ Break-In ก่อนเสมอ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



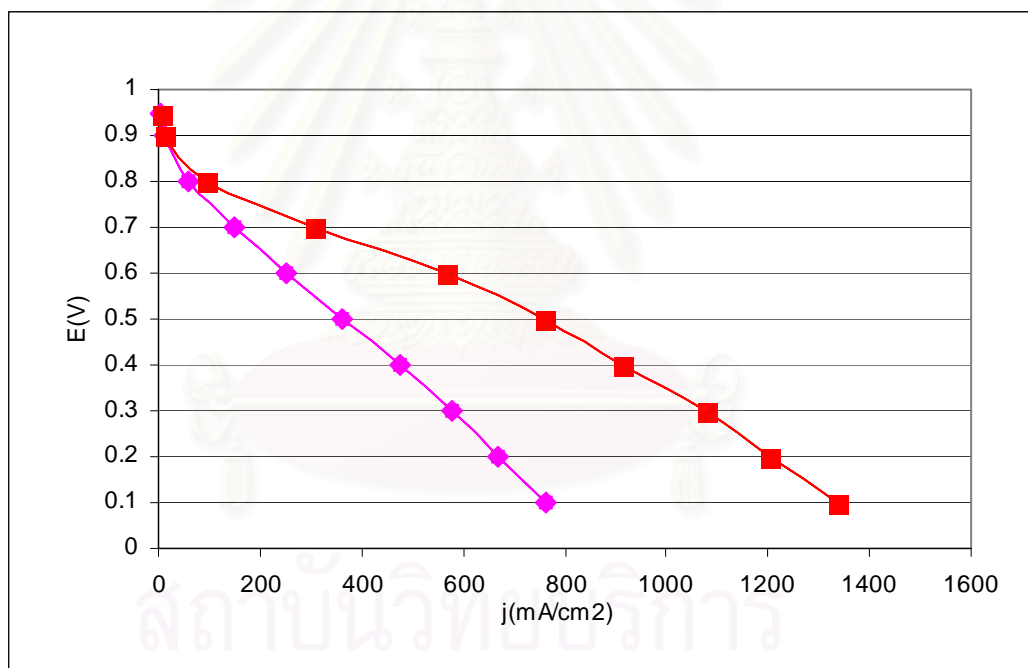
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา สำหรับการ Break-In ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.5 V ของเอมีโอเอทีเตรียมได้ของภาวะการทดลองที่ 1 ของชุดการทดลองที่ 2 (ครั้งที่ 2)

#### 4.6.2 การศึกษาโพลาริเซชันของการทดลองตอนที่ 2

ผลการนำเอมีโอเอทีเตรียมได้มาวัดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm อุณหภูมิเซลล์เท่ากับ 60 °C อุณหภูมิของหม้อความชื้นทั้งด้านแอโนดเท่ากับ 65 °C และด้านแคโทดเท่ากับ 60 °C และปรับความดันในระบบประมาณ 6-8 psi

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

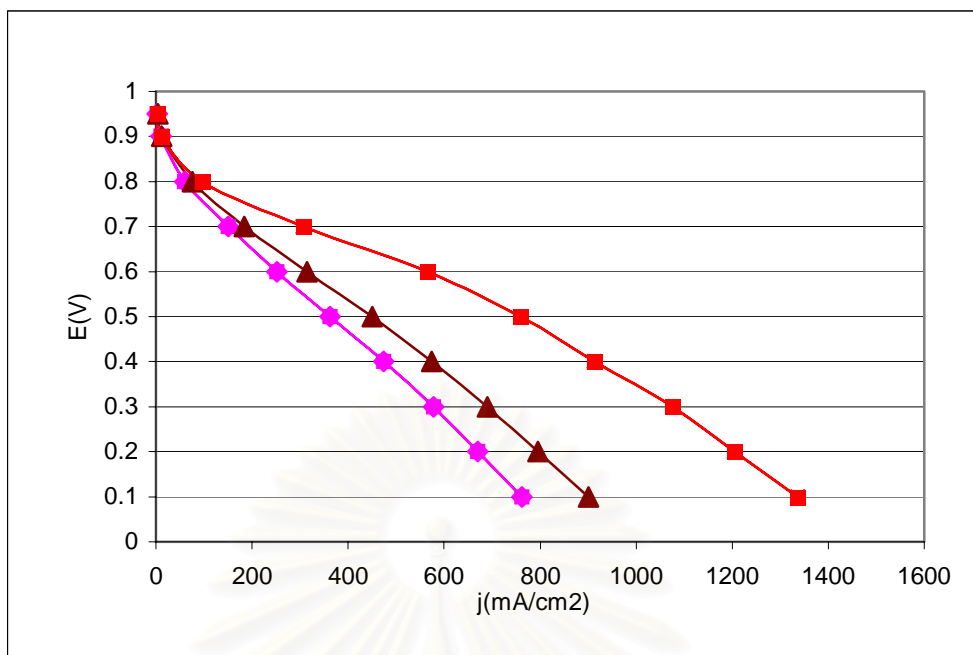
จากการทดลองตอนที่ 1 ทำการทดสอบครั้งละ 10 ระดับของศักย์ไฟฟ้า (จาก 1-0.1 V) ระดับละ 200 วินาที ในการทดลองตอนที่ 2 จะทำการเพิ่มเวลาในการทดสอบแต่ละระดับเป็น 500-1000 วินาที และทดสอบที่ระดับของศักย์ไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงในกราฟโพลาไรเซชัน รูปที่ 4.22 พบว่าช่วงศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0.95 ถึง 0.8 V ซึ่งเป็นช่วงโพลาไรเซชันทางเคมี (Chemical Polarization) หรือ Activation losses ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอทีเตรียมได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอทางการค้าจากบริษัท Electrochem แต่ในช่วงศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0.7 ถึง 0.1 V ซึ่งเป็นช่วงโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization) หรือ Ohmic resistance พบว่า เอ็มอีเอทางการค้ามีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเอ็มอีเอทีเตรียมได้ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.6 V ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอทางการค้า มีค่าเท่ากับ  $566 \text{ mA/cm}^2$  และเอ็มอีเอทีเตรียมได้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $252 \text{ mA/cm}^2$



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการทดลอง

ลำดับที่ 1 ของชุดการทดลองตอนที่ 2 เปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทางการค้า: (■) Commercial

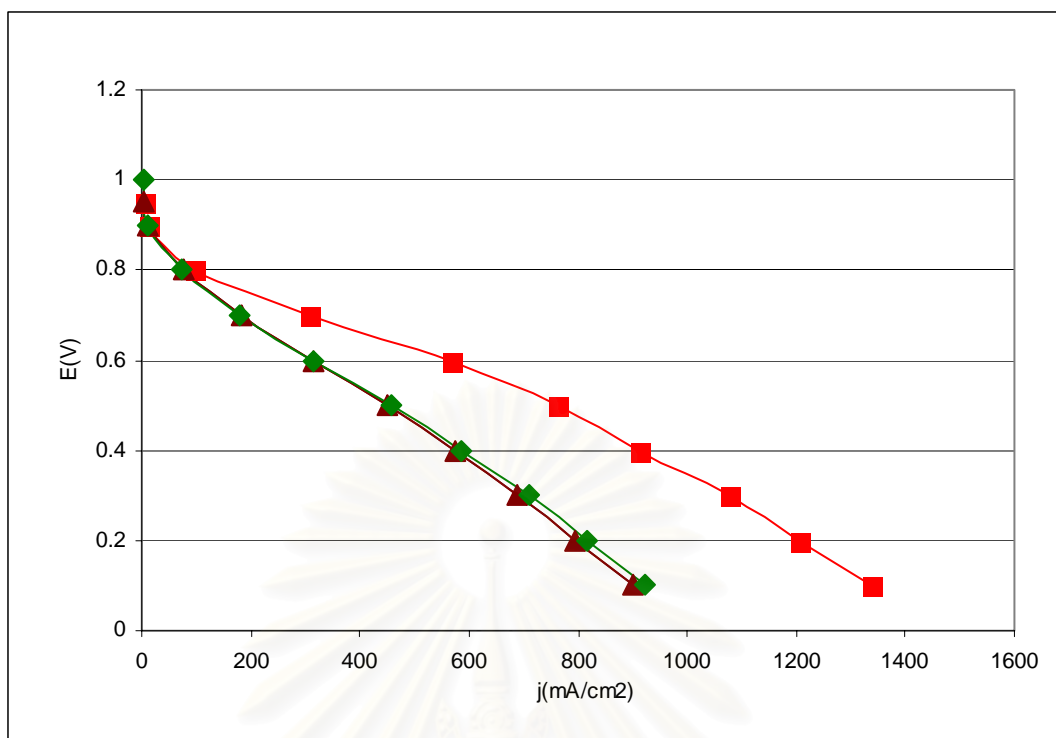
MEA; (◆) การทดสอบครั้งที่ 1 ของเอ็มอีเอทีเตรียมได้



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการทดลองลำดับที่ 1 ของชุดการทดลองตอนที่ 2 เปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทางการค้า: (■) Commercial MEA; (◆) การทดสอบครั้งที่ 1 ของเอ็มอีเอที่เตรียมได้: (▲) การทดสอบซ้ำของเอ็มอีเอที่เตรียมได้

จากนั้นทำการศึกษาต่อโดยการนำเอ็มอีเอที่เตรียมได้จากชุดการทดลองที่ 2 ไปทดสอบซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V สามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้จากเดิมที่ 252 mA/cm<sup>2</sup> เป็น 314 mA/cm<sup>2</sup> และคิดเป็นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.94 W

ดังนั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอทางการค้ามีค่ามากกว่าเอ็มอีเอที่เตรียมได้คิดเป็นร้อยละ 80.25 แสดงว่าเอ็มอีเอที่เตรียมได้ยังมีค่าความต้านทานโอห์มิกสูงกว่าเอ็มอีเอทางการค้า จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยเตรียมเอ็มอีเอที่ใช้ปริมาณเนฟลอนลดลงเหลือ 10% และทำการทดสอบสมรรถนะใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่มีปริมาณเนฟลอน 20% ที่มีการทดสอบซ้ำ คือ 314 mA/cm<sup>2</sup> ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณเนฟลอนที่ 10% เพื่อนำไปเตรียมเป็นเอ็มอีเอที่ใช้ในหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

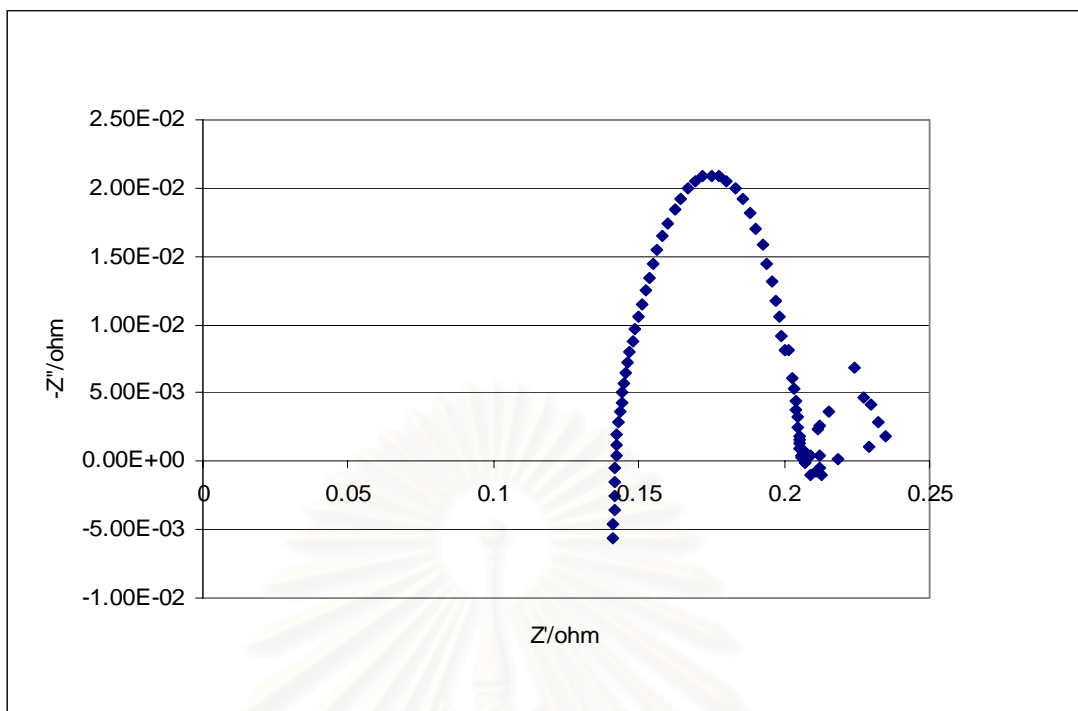


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการทดลองลำดับที่ 1 เปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทางการค้า: (■) Commercial MEA; (▲) เอ็มอีเอที่เตรียมได้ (Nafion 20%); (◆) เอ็มอีเอที่เตรียมได้ (Nafion 10%)

#### 4.6.3 การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนในเซลล์เชื้อเพลิงทำโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์ในรูปอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) ของการทดลองตอนที่ 2

ผลของการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ค่าความถี่ที่ 100Hz. – 50 mHz ทดสอบหลังจากการ Break-In เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.25 ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.25 อิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ของเอ็มอีเอทีที่มีปริมาณเนฟิออน 10%

รูปที่ 4.25 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานจินตภาพ ( $-Z''$ ) กับค่าความต้านทานจริง ( $Z'$ ) ของเอ็มอีเอทีที่มีปริมาณเนฟิออน 10% จากกราฟสามารถอ่านค่าความต้านทานโห้มิก (Ohmic resistance,  $R_{\Omega}$ ) ได้จากแกน x หรือแกนค่าความต้านทานจริง จากค่า 0 ไปยังจุดตัดแกน x ด้านซ้ายสุดของครึ่งวงกลม พบว่าเอ็มอีเอทีที่เตรียมได้ที่มีปริมาณเนฟิออน 10% มีค่าเท่ากับ 0.14 โอห์ม และค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ (Cathode Faradic Resistance,  $R_{f,c}$ ) สามารถอ่านได้จากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูปครึ่งวงกลม จากกราฟจะได้ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุของเอ็มอีเอทีที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 0.07 โอห์ม และค่าความจุไฟฟ้าของเอ็มอีเอทีที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 0.094 F เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทีที่เตรียมได้ที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดของการทดลองตอนที่ 1 พบว่าค่าความต้านทานทั้งความต้านทานโห้มิก ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุและค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 มีค่าสูงกว่าผลจากการทดลองตอนที่ 1



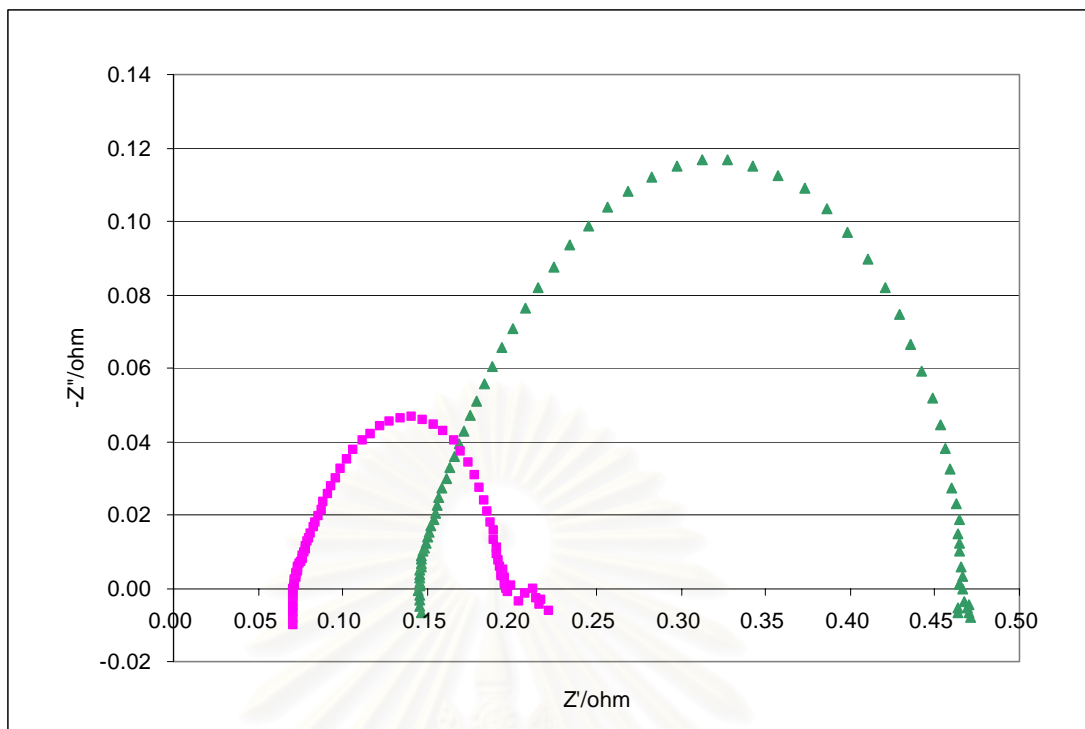
ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ระหว่างชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2

Fuel cell Process	Circuit Element	Value	
		การทดลองชุดที่ 1 (Nafion 38%)	การทดลองชุดที่ 2 (Nafion 10%)
Ohmic resistance ( $\Omega$ )	$R_{\Omega}$	0.23	0.14
Cathode Faradic resistance ( $\Omega$ )	$R_{f,c}$	0.10	0.07
Capacitor (F)	$C_{dl}$	0.43	0.094

จากตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ระหว่างเอ็มอีเอทีเตรียมได้ที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงที่สุดของชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2 พบว่าค่าความต้านทานโอห์มมิก ของชุดการทดลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.23 โอห์ม และชุดการทดลองที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.14 โอห์ม พบว่าชุดการทดลองที่ 2 สามารถลดค่าความต้านทานโอห์มมิกคิดเป็นร้อยละ 64.28 ในส่วนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุของชุดการทดลองที่ 1 กับชุดการทดลองที่ 2 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.10 และ 0.07 โอห์ม พบว่าชุดการทดลองที่ 2 มีค่าน้อยกว่าคิดเป็นร้อยละเท่ากับ 42.85 และค่าความจุไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 0.43 F และ 0.094 F ตามลำดับ ค่าความจุไฟฟ้าของชุดการทดลองที่ 2 น้อยกว่าการทดลองที่ 1 คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 357.44

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผลจากการทดลองชุดที่ 2 ซึ่งมีปริมาณเนฟิออนน้อยกว่าการทดลองชุดที่ 1 สามารถลดค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าลดลงร้อยละ 357.44 จึงทำให้เอ็มอีเอจากชุดการทดลองที่ 2 ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามไม่สามารถเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเอ็มอีเอทางการค้ากับเอ็มอีเอทีเตรียมได้ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเอ็มอีเอทางการค้ามีค่าสูงเกิน 1 แอมแปร์มาก โปรแกรม FRA จึงไม่สามารถวัดค่าความต้านทานได้ จึงได้ทำการทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 V เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานของทั้งสองเอ็มอีเอดังแสดงในรูปที่ 4.26 ดังนี้



รูปที่ 4.26 อิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ของเอมอีเอที่เตรียมได้ (10% Nafion) เปรียบเทียบกับเอมอีเอทางการค้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 V: (■) Commercial MEA; (▲) เอมอีเอที่เตรียมได้

รูปที่ 4.26 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานจินตภาพ ( $-Z''$ ) กับค่าความต้านทานจริง ( $Z'$ ) ของเอมอีเอที่มีปริมาณเนฟลอน 10% เปรียบเทียบเอมอีเอทางการค้าที่ศักย์ไฟฟ้าจากกราฟสามารถอ่านค่าความต้านทานโอห์มมิก (Ohmic resistance,  $R_{\Omega}$ ) ได้จากแกน x หรือแกนค่าความต้านทานจริง จากค่า 0 ไปยังจุดตัดแกน x ด้านซ้ายสุดของครึ่งวงกลม พบว่าเอมอีเอทางการค้ามีค่าความต้านทานโอห์มมิกเท่ากับ 0.07 โอห์ม และเอมอีเอที่เตรียมได้ที่มีปริมาณเนฟลอน 10% มีค่าเท่ากับ 0.15 โอห์ม จะได้ว่าเอมอีเอที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานโอห์มมิกสูงกว่าเอมอีเอทางการค้าคิดเป็นร้อยละ 114.28 ในส่วนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ (Cathode Faradic Resistance,  $R_{f,c}$ ) สามารถอ่านได้จากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูปครึ่งวงกลม จากกราฟจะได้ค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุของเอมอีเอทางการค้าเท่ากับ 0.13 โอห์ม และเอมอีเอที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 0.32 โอห์ม จะได้ว่าเอมอีเอที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุสูงกว่าเอมอีเอทางการค้าคิดเป็นร้อยละ 146.15 และค่าความจุไฟฟ้าของเอมอีเอทางการค้ามีค่าเท่ากับ 0.188 F และเอมอีเอที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 0.064 F ซึ่งพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของเอมอีเอที่เตรียมได้มีค่าต่ำกว่าเอมอีเอทางการค้าคิดเป็นร้อยละ 65.96 ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้ค่าความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 V มีค่าน้อยกว่าเอ็มอีเอทางการค้า มีผลมาจากค่าความต้านทานโอห์มิกและค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุเท่านั้น

ตารางที่ 4.10 สรุปผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 V จากรูปที่ 4.26

Fuel cell Process	Circuit Element	Value	
		Commercial MEA	This work*
Ohmic resistance ( $\Omega$ )	$R_{\Omega}$	0.07	0.15
Cathode Faradic resistance ( $\Omega$ )	$R_{f,C}$	0.13	0.32
Capacitor (F)	$C_{dl}$	0.188	0.064

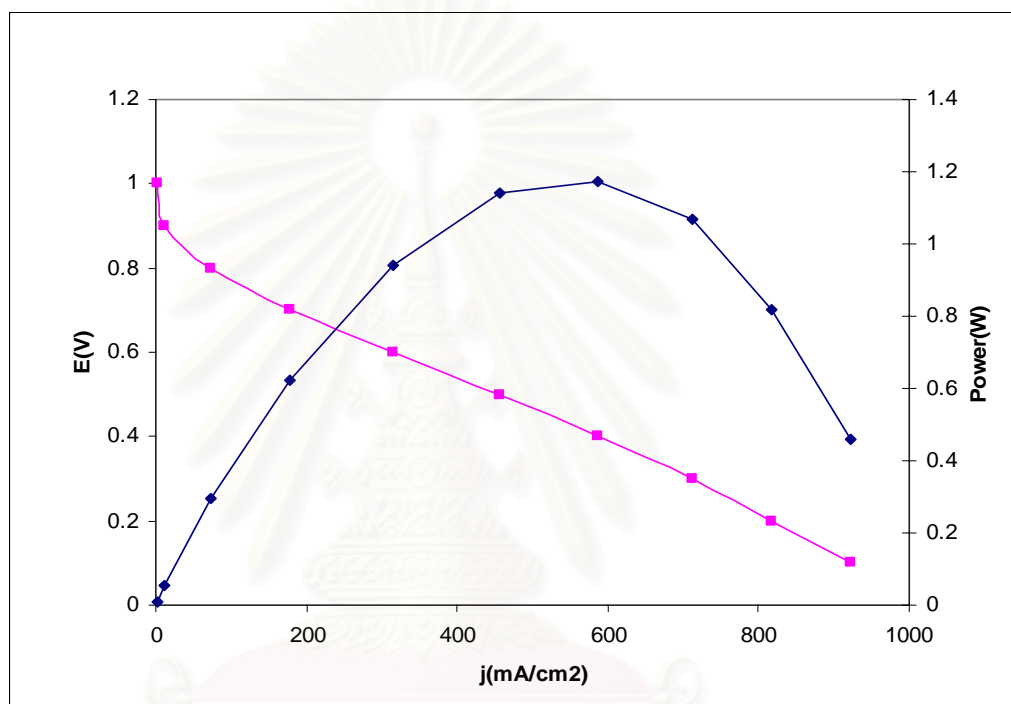
\*เป็นเอ็มอีเอที่มีปริมาณเนฟิออน 10 %

ตารางที่ 4.11 สรุปการเปรียบเทียบปริมาณแพลทินัม ปริมาณเนฟิออน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับงานวิจัยอื่นๆ

Researcher	Pt loading (mg/ cm <sup>2</sup> )	Nafion loading (wt.%)	Current density at 0.6 V (mA/ cm <sup>2</sup> )
Z. Qi. et al.(2003)	0.2	30	700
G. Sasikumar et al. (2004)	0.5	20	500
Y. Song et.al. (2006)	0.5	35	400
B. Yang et al. (2005)	0.4	33	600
This work	1	10	314
เอ็มอีเอทางการค้า	1	N/A	566

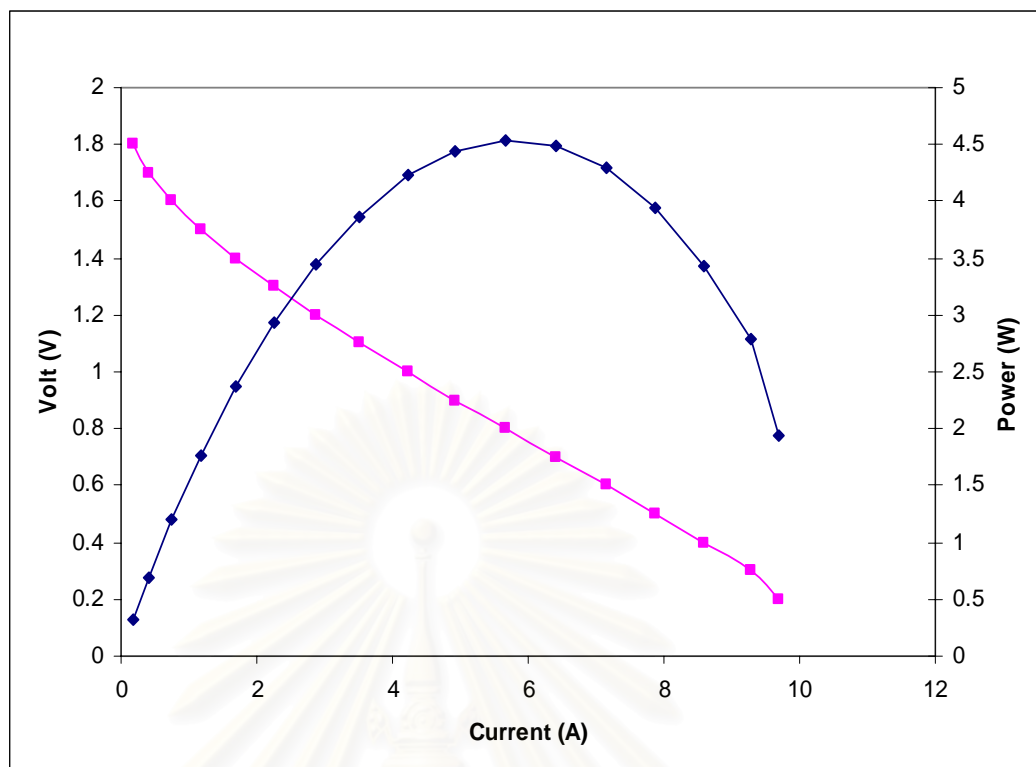
#### 4.6.4 การศึกษาสมรรถนะของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอม

จากการทดลองชุดที่ 2 พบว่าเอ็มอีเอทีภาวะปริมาณเทพลอน 0  $\mu\text{L}$ , อบซั้วอิเล็กโทรดที่ 80  $^{\circ}\text{C}$ , ปริมาณเนฟลอน 10% และอบซั้วอิเล็กโทรดเป็นเวลา 0.5 hr. ให้กำลังไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 1.17 วัตต์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.4 V และที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ให้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.94 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวขนาด 5 ตารางเซนติเมตร

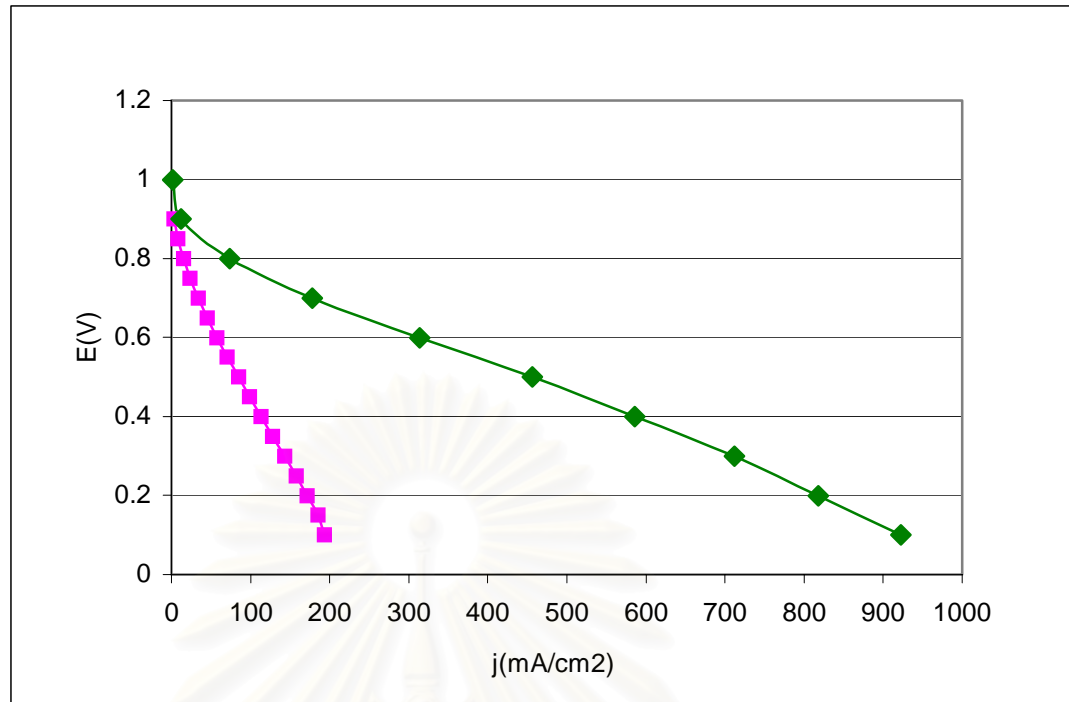
และเพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จึงได้นำภาวะการเตรียมเอ็มอีเอทีที่มีสมรรถนะสูงที่สุดมาเตรียมเอ็มอีเอทีที่มีขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์ และประกอบเป็นหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง นำมาทดสอบหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิเซลล์เท่ากับอุณหภูมิห้อง และไม่ให้ความชื้นแก่เซลล์ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า กับกำลังไฟฟ้าของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์

รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์ พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 V ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5.66 แอมแปร์ และให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 4.53 วัตต์ อย่างไรก็ตามเมื่อคิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเอ็มอีเอของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะพบว่ามีค่าเท่ากับ  $57.4 \text{ mA/cm}^2$  ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ซึ่งเมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวที่มีค่าเท่ากับ  $314 \text{ mA/cm}^2$  ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V ดังแสดงในรูปที่ 4.29

จากรูปที่ 4.29 พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเอ็มอีเอของหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยว อาจเนื่องมาจากการเตรียมเอ็มอีเอที่มีพื้นที่มาก (50 ตารางเซนติเมตร) อาจทำให้การพิมพ์น้ำหมักลงบนขั้วอิเล็กโทรดไม่สม่ำเสมอและเรียบทั่วทั้งขั้วอิเล็กโทรด และมีการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาในระหว่างการพิมพ์น้ำหมักในปริมาณที่มากกว่าการเตรียมเอ็มอีเอที่มีปริมาณพื้นที่น้อยกว่า โดยเมื่อนำขั้วอิเล็กโทรดขนาด 50 ตารางเซนติเมตร มาคำนวณหาปริมาณแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดด้วยวิธีดูลมวล พบว่ามีปริมาณแพลทินัมเฉลี่ย  $0.55 \text{ mg/cm}^2$



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์เดี่ยวที่มีขนาด 5 ตารางเซนติเมตร: (◆), และหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 50 ตารางเซนติเมตรจำนวน 2 เซลล์: (■)



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 การเตรียมขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอ

##### 5.1.1. การทดลองตอนที่ 1

จากการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล ในตอนที่ 1 ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษา 4 ปัจจัยได้แก่ ปริมาณเทฟลอน อุณหภูมิการอบขั้วอิเล็กโทรด ระยะเวลาในการอบขั้วอิเล็กโทรด และแก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด จากการนำไปวิเคราะห์ทางสถิติสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิการอบขั้วอิเล็กโทรด แก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรดและสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรด มีผลต่อค่าตอบสนองหรือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง และแก๊สที่ใช้ในการอบขั้วอิเล็กโทรดควรเป็นอากาศจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าการอบด้วยแก๊สไนโตรเจน และภาวะการทดลองที่ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดคือ การทดลองที่ 6 ซึ่งมีภาวะการทดลองคือ ปริมาณเทฟลอน 10  $\mu\text{L}$ , อุณหภูมิ 140  $^{\circ}\text{C}$ , เวลา 1 ชั่วโมง และอบด้วยอากาศ ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 91.17  $\text{mA}/\text{cm}^2$  และกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.27 W ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ยังเป็นค่าที่ไม่สูงมากนัก จึงได้นำไปปรับปรุงและพัฒนาในตอนต่อไป ในส่วนของการหาพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาโดยการวัด Cyclic Sweep Voltammetry (CV) พบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้มีค่า ECA เท่ากับ 61.43  $\text{m}^2/\text{g}$  สูงกว่าขั้วอิเล็กโทรดทางการค้าที่มีค่า ECA เท่ากับ 49.40  $\text{m}^2/\text{g}$  จึงส่งผลให้ช่วงโพลาริเซชันทางเคมีของเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่าเอ็มอีเอทางการค้าเล็กน้อย

สำหรับผลของการทดสอบทางกายภาพของเอ็มอีเอที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทางการค้า ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะของผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรดด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy, SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้มีผิวหน้าที่คล้ายคลึงกันและไม่พบรอยแตกร้าวของขั้วอิเล็กโทรดเช่นเดียวกับขั้วอิเล็กโทรดทางการค้าและการศึกษาปริมาณแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray (EDX) พบว่าปริมาณแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX มีค่าเท่ากับ 1.45  $\text{mg}/\text{cm}^2$  และนำมาคำนวณด้วยวิธีคูณมวล ได้ปริมาณแพลทินัมเท่ากับ 0.82  $\text{mg}/\text{cm}^2$

### 5.1.2. การทดลองตอนที่ 2

จากข้อสรุปในการทดลองตอนที่ 1 นำมาปรับปรุงและพัฒนาต่อในการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณเทพลอน อุณหภูมิการอบซั้วอิเล็กโทรด ปริมาณเนฟิออน และระยะเวลาในการอบซั้วอิเล็กโทรด และจากการนำไปวิเคราะห์ทางสถิติสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณเนฟิออน เป็นปัจจัยเดียวที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าที่ปริมาณเนฟิออน 20% ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าปริมาณเนฟิออน 38% และพบว่าการทดลองที่ 1 (MEA1) ซึ่งมีภาวะการทดลองที่ปริมาณเทพลอน 0  $\mu\text{L}$ , อุณหภูมิของการอบซั้วอิเล็กโทรด 80  $^{\circ}\text{C}$ , ปริมาณเนฟิออน 20% และเวลาที่ใช้ในการอบซั้วอิเล็กโทรด 0.5 ชั่วโมง ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 252  $\text{mA}/\text{cm}^2$  และกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.73 W ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V โดยการทดลองในตอนที่ 2 สามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากการทดลองในตอนที่ 1 คิดเป็น 165.14% และเมื่อนำเอ็มอีเอนี้ไปทดสอบซ้ำ โดยการทำ Break-In และทดสอบสมรรถนะใหม่ พบว่าสามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 314  $\text{mA}/\text{cm}^2$  แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ยังมีค่าที่น้อยกว่าเอ็มอีเอทางการค้า ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยทำการลดปริมาณเนฟิออนเหลือ 10% ผลที่ได้พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V มีค่าเท่ากับกับเอ็มอีเอที่มีปริมาณเนฟิออน 20% ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณเนฟิออนที่ 10% และเมื่อนำเอ็มอีเอที่มีปริมาณเนฟิออน 10 % กับ เอ็มอีเอที่เตรียมได้จากการทดลองชุดที่ 1 มาวิเคราะห์ค่าความต้านทานเชิงซ้อนโดยใช้เทคนิค Impedance Spectroscopy พบว่าสามารถลดค่าความต้านทานโอห์มิกคิดเป็นร้อยละ 64.28 สามารถลดค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุคิดเป็นร้อยละ 42.85 และค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงร้อยละ 357.44 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการลดปริมาณเนฟิออนสามารถทำให้ความจุไฟฟ้าของเซลล์มีค่าลดลงได้ ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นและจากการนำเอ็มอีเอที่มีปริมาณเนฟิออน 10% มาเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานเชิงซ้อนกับเอ็มอีเอทางการค้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 V พบว่าเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานโอห์มิกสูงกว่าเอ็มอีเอทางการค้าคิดเป็นร้อยละ 114.28 ในส่วนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ เอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุสูงกว่าเอ็มอีเอทางการค้าคิดเป็นร้อยละ 146.15 และค่าความจุไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าต่ำกว่าเอ็มอีเอทางการค้าคิดเป็นร้อยละ 65.96 จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 V เอ็มอีเอที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าเอ็มอีเอทางการค้า มีสาเหตุมาจากค่าความต้านทานโอห์มิกและค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ

จากผลการทดลองที่ได้จึงสามารถสรุปได้ว่าภาวะที่ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด คือ ปริมาณเทพลอน 0  $\mu\text{L}$ , อุณหภูมิของการอบซั้วอิเล็กโทรด 80  $^{\circ}\text{C}$ , ปริมาณเนฟิออน

10% เวลาที่ใช้ในการอบซ้ำอิเล็กโทรด 0.5 ชั่วโมง และอบซ้ำอิเล็กโทรดในบรรยากาศของอากาศ โดยปริมาณเนฟิออน 10% จะเป็นปริมาณที่เหมาะสมกับการใช้ปริมาณแพลทินัม  $1\text{mg/cm}^2$

นอกจากนี้ยังพบว่า การ Break-In ก่อนที่จะนำเอเอ็มอีไปทดสอบสมรรถนะ สามารถช่วยเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ โดยภาวะการ Break-In จะกระทำที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่  $0.5\text{ V}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อย และการนำเอเอ็มอีเอที่ผ่านการ Break-In แล้วมาทำการทดสอบซ้ำจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

และเมื่อนำภาวะการเตรียมเอเอ็มอีเอที่ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด มาเตรียมเอเอ็มอีขนาด 50 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 เซลล์ จากนั้นประกอบเป็นหน่วยชั้นเซลล์ เชื้อเพลิง และทำการทดสอบพบว่าได้กำลังไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 4.53 วัตต์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. หลังจากทำการทดสอบสมรรถนะทุกครั้ง เมื่อแกะเซลล์ออกมา พบว่ามีน้ำขังอยู่ที่ช่องทางไหลของแก๊ส ควรผ่านแก๊สในโตรเจนเข้าไปโดยตรงในช่องทางเข้าของแก๊ส เพื่อให้ น้ำที่ขังอยู่ด้านในออกมา ไม่ควรขีดหรือเป่าให้แห้งเฉพาะช่องทางไหลของแก๊ส ด้านหน้า
2. การทาสารละลาย 5 wt. % Nafion ก่อนการอัดด้วยความร้อน ควรทำให้ฟูกันชุ่มด้วยสารละลายเนฟิออนก่อนเพื่อให้ขนของฟูกันนุ่ม ถ้าฟูกันแข็งจะไม่สามารถทาสารละลายเนฟิออนในปริมาณน้อยได้ทั่วผิวหน้าอิเล็กโทรด
3. ในการปรับสภาพของเมมเบรน ควรสังเกตสีของเมมเบรนก่อนใช้ ถ้ามีสีที่เหลืองมาก ในขั้นตอนของการแช่สารละลายเปอร์ออกไซด์ อาจจะต้องทำซ้ำจนกว่าเมมเบรนจะใส จึงจะนำไปใช้ได้
4. ก่อนทำการทดลองควรสังเกตว่า Booster on หรือไม่ เพราะบางครั้งเมื่อเปิดโปรแกรม GPRS ขึ้นมา Booster ที่เปิดไว้อาจจะดับได้ ถ้า Booster off แล้วทำการทดลองจะทำให้เครื่อง Potentiostat ฟ้องว่า Volt overload ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ ซึ่งเมื่อเครื่องฟ้องเช่นนั้นจะต้องปิดเครื่องตามลำดับ และรอดักคู้ จึงทำการเปิดเครื่องตามลำดับขั้นตอนใหม่ และเพื่อเป็นการรักษาให้เครื่อง Potentiostat ใช้ได้อย่างยาวนานและไม่เกิดปัญหา ควรทำการเปิดเครื่อง Potentiostat ก่อนเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ทุกครั้ง และปิดโปรแกรมหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ก่อนปิดเครื่อง Potentiostat ซึ่งถ้าทำตามขั้นตอนตามลำดับจะไม่ค่อยเกิดปัญหาระหว่างการทดสอบ

5. ในการปรับ Back pressure เมื่อต้องการปรับเป็นค่าความดันที่ไม่สูงมาก ควรปรับให้มีความดันเกินความดันที่ต้องการก่อน แล้วจึงค่อยๆ ลดให้ความดันได้ตามที่ต้องการ และก่อนทำการทดสอบทุกครั้งควรทำการปล่อยแก๊สออกทุกครั้ง โดยการกดน้ำที่ Back pressure และหมุนไปด้านลบจนสุด แล้วจึงปรับค่าใหม่ เพื่อได้น้ำในระบบ ก่อนที่จะทำการทดสอบ
6. ในการทดสอบค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้โปรแกรม FRA เมื่อทำการ Load data จากข้อมูลเก่าก่อนการทดสอบ ควรสังเกตว่าข้อมูลที่ load มา มีข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าที่เคยตั้งค่าไว้หรือไม่ ถ้าไม่มีอาจทำให้ไม่สามารถทดสอบได้ จึงควรทำการ load ข้อมูลจากข้อมูลใหม่



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

- [1] เซลล์เชื้อเพลิง. (ออนไลน์) แหล่งที่มา: <http://www.forensic.police.go.th>
- [2] Barbir, F. PEM fuel cells. California: Elsevier Academic Press, 2005, p. 1.
- [3] Larminie, J., and Dick, A fuel cell system explained. Chichester: John Wiley & Sons ., 2000.
- [4] เซลล์เชื้อเพลิง. (ออนไลน์) แหล่งที่มา :  
[http://www.eere.energy.gov/.../fuelcells/fc\\_types.htm/](http://www.eere.energy.gov/.../fuelcells/fc_types.htm/)
- [5] Lister, S., and Simader, G. Fuel cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons., 2000.
- [6] Metha, V., and Cooper, J.S., Review and analysis of PEM fuel cell design and Manufacturing, Journal of Power Sources 114 (2003): 32-53.
- [7] Mikkola, M. Modification to A PEM Fuel Cell Stack. Special assignment, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology, 2000.
- [8] Wolf Vielstich, Hubert A. Gasteiger, Arnold Lamm. Handbook of fuel cells Fundamentals, Tchnology and Applications. New York: John Willey & Sons., 2003.
- [9] Ryan, P. O' hayre, Suk-Won Cha.,Whitney Colella., Fritz B. Prinz., Fuel cell Fundamentals. New York: John Willey & Sons., 2003.
- [10] สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่1, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [11] Appleby, A.J., and Foulkes, F.R., Fuel cell handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [12] Sasikumar, G., Ihm, G.W., Ryu, H., Optimum Nafion content in PEM fuel cell electrodes, Journal of Power Sources 50 (2004): 601-605.
- [13] Antolini, E., Giorgi, L., Pozio, A., Passalacqua, E., Influence of Nafion loading in the catalyst layer of gas-diffusion electrodes for PEFC, Journal of Power Sources 77 (1999):136-142.
- [14] สุกัญญา ทองคำ, สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี, เก็จวดี พฤกษาทร. ผลของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน, วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (Section T) ปีที่ 3 ฉบับที่ 3 (2547/2004): 181-194

- [15] เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ, เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2547
- [16] Wood, D.L., Yi, J.S., and Nguyen, T.V. Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells, Electrochimica Acta 43 (1998): 3795-3809.
- [17] เซลล์เชื้อเพลิง. (ออนไลน์) แหล่งที่มา: <http://www.ecochemie.nl/>
- [18] เซลล์เชื้อเพลิง. (ออนไลน์) แหล่งที่มา:  
[http://www.gamry.com/App\\_Notes/EIS\\_Primer.htm](http://www.gamry.com/App_Notes/EIS_Primer.htm)
- [19] เซลล์เชื้อเพลิง. (ออนไลน์) แหล่งที่มา:  
<http://www.estarfuturecorp.com/fuelcellworks.htm/>
- [20] ทรงวุฒิ นิรัฐศิลป์, การสร้างชั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546
- [21] Yang, B., Fu, Y.Z., Manthiram, A., Operation of thin Nafion-based self-humidifying membranes in proton exchange membrane fuel cells with dry H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>, Journal of Power Sources 139 (2005):170-175.
- [22] ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
- [23] Douglas, C., Design and Analysis of Experiments. New York: John & Wiley & Sons., 2001.
- [24] Qi, Z., Kaufman, A., Low Pt loading high performance cathodes for PEM fuel cells, Journal of Power Sources 113 (2003): 37-43.
- [25] Jinhua, C., Toyoaki, M., Michio H., Novel gas diffusion layer with water management function for PEMFC, Journal of Power Sources 131 (2004): 155-161.
- [26] Jassen, G., Overveld, M. L.J., Water transport in the proton-exchange membrane fuel cell: measurements of the effective drag coefficient, Journal of Power Sources 101 (2001): 117-125.
- [27] Banyong, N., Kejvalee, P., Pornpote, P., Optimum condition of membrane electrode assembly fabrication for PEM fuel cells, Korean J. Chem.Eng 23(4) (2006): 570-575.
- [28] เซลล์เชื้อเพลิง. (ออนไลน์) แหล่งที่มา: <http://www.etek-inc.com>



- [29] Song, Y., Xu, H., Wei, Y., Dependence of high-temperature PEM fuel cell performance on Nafion content, Journal of Power Sources 154 (2006): 138-144.
- [30] Cheng-Chieh, S., Jen-Ray, C., Genesis and growth of platinum subnano-particles on activated-carbon characterized by X-ray absorption spectroscopy: effects of preparation conditions, Journal of Power Sources 92 (2005): 89-97.
- [31] Passalacqua, E., Lufrano, F., Squadrito, G., Patti, A., Giorgi, L., Nafion content in the catalyst layer of polymer electrolyte fuel cells: effect on structure and performance, Journal of Power Sources 46 (2001): 799-805.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### ก.1 การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด

การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดทำได้ 2 วิธี คือ การคำนวณจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX และการคำนวณด้วยวิธีตุลมวล ทั้ง 2 วิธีมีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

#### การคำนวณจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX

การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาหรือในที่นี้คือ แพลทินัม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX สามารถคำนวณได้ดังนี้

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

ข้อมูลจากการทดลอง

ร้อยละของแพลทินัมจาก EDX: (%Pt)	16.06
น้ำหนักของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา: $(CL)_{actual}$	45.28 มิลลิกรัม
พื้นที่ผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรด: (A)	5 ตารางเซนติเมตร

$$Pt \text{ loading} = \frac{(16.06)(45.28)}{(5)(100)} = 1.45 \text{ mg} / \text{cm}^2$$

#### การคำนวณจากการตุลมวล

ในการเตรียมสารละลายหรือน้ำหมึกเพื่อทำการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนขั้วอิเล็กโทรด นอกจากจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแพลทินัม ยังมีส่วนผสมอื่นคือ เอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ สารละลายเทฟลอนหรือโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (60 %wt. Polytetrafluoroethylene, มีความหนาแน่น 1.5 g/ml) สารละลายเนฟลอน (5%wt. Nafion 117, มีความหนาแน่น 0.87 g/ml)

สมมติฐาน คือ เอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ ที่ใช้เป็นสารละลายจะระเหยออกไปในกระบวนการทำให้ขั้วอิเล็กโทรดแห้ง และน้ำหนักของสารที่เหลือจะอยู่บนขั้วอิเล็กโทรด

ข้อมูลจากการทดลอง

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (20%wt. Pt/C) ที่ใส่เท่ากับ: $(Pt/C)_{input}$	25 มิลลิกรัม
ปริมาณเนฟลอนที่ใส่เท่ากับ: $Nafion_{input}$	15.23 มิลลิกรัม (dry weight.)
ปริมาณเทฟลอนที่ใส่เท่ากับ: $PTFE_{input}$	15 มิลลิกรัม
น้ำหนักของกระดาษคาร์บอนหลังพิมพ์: after print	103.78 มิลลิกรัม
น้ำหนักของกระดาษคาร์บอนก่อนพิมพ์: before print	58.50 มิลลิกรัม
พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด: (A)	5.00 ตารางเซนติเมตร
หาน้ำหนักของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาตามทฤษฎี	

น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาตามทฤษฎี

$$(CL)_{theory} = PTFE_{input} + Nafion_{input} + Pt/C_{input}$$

$$(CL)_{theory} = 15 + 15.23 + 25$$

$$= 55.23 \text{ มิลลิกรัม}$$

น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

$$(CL)_{actual} = wt. \text{ carbon-paper}_{after \text{ print}} - wt. \text{ carbon-paper}_{before \text{ print}}$$

$$(CL)_{actual} = 103.78 - 58.50$$

$$= 45.28 \text{ มิลลิกรัม}$$

การคำนวณหาปริมาณแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดคำนวณจาก

$$Pt_{actual} = \frac{(CL)_{actual}}{(CL)_{theory}} \times Pt_{input}$$

โดยที่

$$Pt_{input} = \frac{(25)(20)}{(100)} = 5 \text{ mg}$$

ดังนั้นแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ

$$Pt_{actual} = \frac{(45.28)}{(55.23)} \times 5 = 4.10 \text{ mg}$$

และปริมาณ  $Pt_{loading}$  คำนวณจาก

$$Pt \text{ loading} = \frac{Pt_{actual}}{A}$$

$$Pt \text{ loading} = \frac{4.10}{5} = 0.82 \text{ mg / cm}^2$$

ดังนั้นปริมาณแพลทินัมบนขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.82 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

## ก.2 การคำนวณปริมาณเนฟิออนบนขั้วอิเล็กโทรด

จากข้อมูลการทดลอง ปริมาณเนฟิออนที่ต้องการเท่ากับ 10%

จะได้ว่า Wt. % Nafion = 10

Wt. of Pt/C catalyst = 25 mg

คำนวณหาปริมาณ dry wt. of Nafion ดังนี้

$$\text{Wt. \% Nafion} = \frac{\text{dry wt. of Nafion} \times 100}{\text{wt. of Pt / C catalyst} + \text{dry wt. of Nafion}}$$

$$10 = \frac{A \times 100}{25 + A}$$

$$A = 2.78 \text{ มิลลิกรัม หรือ } 0.56 \text{ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

จะได้ dry wt. of Nafion = 2.78 มิลลิกรัม

ดังนั้นจะได้ปริมาณเนฟิออนจาก 5 wt.% Nafion = 55.6 มิลลิกรัม หรือ 0.064 มิลลิลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีดุลมวลของชุดการทดลองตอนที่ 1

Electrode	wt. carbon-paper (before) (mg)	wt. carbon-paper (after)(mg)	(CL)actual(mg)	(CL)theory(mg)	Pt loading(mg/cm <sup>2</sup> )
MEA1/1	56.2	89.2	33	40.23	0.82
MEA1/2	57.4	88.7	31.3	40.23	0.78
MEA2/1	55.2	104.5	49.3	55.23	0.89
MEA2/2	57.3	108	50.7	55.23	0.92
MEA3/1	58.5	92.5	34	40.23	0.85
MEA3/2	54.5	87.9	33.4	40.23	0.83
MEA4/1	53.6	106.8	53.2	55.23	0.96
MEA4/2	54.8	108.2	53.4	55.23	0.97
MEA5/1	51.5	90.3	38.8	40.23	0.96
MEA5/2	55.4	89.2	33.8	40.23	0.84
MEA6/1	53	100.6	47.6	55.23	0.86
MEA6/2	52.1	102.5	50.4	55.23	0.91
MEA7/1	54.5	88.4	33.9	40.23	0.84
MEA7/2	64.4	100.2	35.8	40.23	0.89
MEA8/1	56.8	103.2	46.4	55.23	0.84



Electrode	wt. carbon-paper (before) (mg)	wt. carbon-paper (after)(mg)	(CL)actual(mg)	(CL)theory(mg)	Pt loading(mg/cm <sup>2</sup> )
MEA8/2	57.2	105	47.8	55.23	0.87
MEA9/1	55.8	90.1	34.3	40.23	0.85
MEA9/2	54.7	89.6	34.9	40.23	0.87
MEA10/1	53.8	105.2	51.4	55.23	0.93
MEA10/2	53.3	104.8	51.5	55.23	0.93
MEA11/1	56.4	88.4	32	40.23	0.79
MEA11/2	57.2	89.8	32.6	40.23	0.81
MEA12/1	55.8	106.8	51	55.23	0.92
MEA12/2	57.9	109.1	51.2	55.23	0.93
MEA13/1	63.2	100.1	36.9	40.23	0.92
MEA13/2	58.7	90.8	32.1	40.23	0.79
MEA14/1	60.2	110	49.8	55.23	0.90
MEA14/2	58.9	106.3	47.4	55.23	0.86
MEA15/1	54.8	91.2	36.4	40.23	0.90
MEA15/2	55.6	92.3	36.7	40.23	0.91
MEA16/1	58.9	104.6	45.7	55.23	0.83
MEA16/2	60.2	109.8	49.6	55.23	0.90

ตารางที่ ก.2 ผลการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีตุลมวลของการทดลองตอนที่ 2 (replicate1)

Electrode	wt. carbon-paper (before)(mg)	wt. carbon-paper (after)(mg)	(CL)actual(mg)	(CL)theory(mg)	Pt loading(mg/cm <sup>2</sup> )
MEA1/1	73.3	102	28.7	31.26	0.92
MEA1/2	75.8	106.1	30.3	31.26	0.97
MEA2/1	75.4	110.6	35.2	46.26	0.76
MEA2/2	58.4	99.2	40.8	46.26	0.88
MEA3/1	64.4	93.4	29	31.26	0.93
MEA3/2	57.9	87.5	29.6	31.26	0.95
MEA4/1	53.7	89.8	36.1	46.26	0.78
MEA4/2	55.4	88.3	32.9	46.26	0.71
MEA5/1	53.3	77.4	24.1	31.26	0.77
MEA5/2	63.2	88.3	25.1	31.26	0.80
MEA6/1	65.7	103.6	37.9	46.26	0.82
MEA6/2	68.2	106.2	38	46.26	0.82
MEA7/1	75.5	99.8	24.3	31.26	0.77
MEA7/2	70.3	100.4	30.1	31.26	0.96

Electrode	wt. carbon-paper (before)(mg)	wt. carbon-paper (after)(mg)	(CL)actual(mg)	(CL)theory(mg)	Pt loading(mg/cm <sup>2</sup> )
MEA8/1	65.4	100.7	35.3	46.26	0.76
MEA8/2	63.2	101.2	38	46.26	0.82

ตารางที่ ก.3 ผลการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีตุลมวลของการทดลองตอนที่ 2 (replicate2)

Electrode	wt. carbon-paper (before)(mg)	wt. carbon-paper (after)(mg)	(CL)actual(mg)	(CL)theory(mg)	Pt loading(mg/cm <sup>2</sup> )
MEA1/1	65.5	93.4	27.9	31.26	0.89
MEA1/2	68.7	95.6	26.9	31.26	0.86
MEA2/1	63.2	98.7	35.5	46.26	0.77
MEA2/2	58.9	99.5	40.6	46.26	0.88
MEA3/1	61.3	89.2	27.9	31.26	0.89
MEA3/2	54.8	82.8	28	31.26	0.90
MEA4/1	59.4	94.4	35	46.26	0.76
MEA4/2	60.3	96.9	36.6	46.26	0.79
MEA5/1	65.3	90.1	24.8	31.26	0.79
MEA5/2	66.7	92.3	25.6	31.26	0.82

Electrode	wt. carbon-paper (before)(mg)	wt. carbon-paper (after)(mg)	(CL) actual(mg)	(CL)theory(mg)	Pt loading(mg/cm <sup>2</sup> )
MEA6/1	64.3	99.5	35.2	46.26	0.76
MEA6/2	72.5	105.4	32.9	46.26	0.71
MEA7/1	68.3	90.9	22.6	31.26	0.72
MEA7/2	67.9	92.1	24.2	31.26	0.77
MEA8/1	66.2	106.7	40.5	46.26	0.88
MEA8/2	68.4	105.8	37.4	46.26	0.81

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.4 การคำนวณหาพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า Electrochemical Surface Area, ECA) ของขั้วแคโทด จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Cyclic Sweep Voltammetry (CV)

การวิเคราะห์ Cyclic Sweep Voltammetry เป็นการศึกษากการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด ในการทดลองได้ทำการตั้งค่าอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด 100 sccm และตั้งค่าอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ขั้วแคโทด 100 sccm Sweep rate ที่ 20 mVs<sup>-1</sup> จากนั้นตั้งค่า Number of scan เท่ากับ 5 และตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.01 – 0.80 V และทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง ประจุไฟฟ้าที่ได้จากการเลือก Analysis จากนั้นเลือก Integrate between markers และเลือกจุด 2 จุด คอมพิวเตอร์จะทำการอินทิเกรตหาค่าประจุไฟฟ้า (Charge) หน่วยเป็นคูลอมบ์ และนำค่าประจุที่ได้ไปคำนวณหาค่า ECA ตามสมการ

$$ECA(cm^2 Ptg^{-1}Pt) = \frac{charge(\mu C cm^{-2})}{210(\mu C cm^{-2} Pt) \times catalyst\ loading(gPt cm^{-2})}$$

โดยที่ ประจุไฟฟ้าคำนวณจากความสัมพันธ์

$$Q = CV$$

$$\frac{dQ}{dt} = V \frac{dC}{dt} + C \frac{dV}{dt}$$

$$V \frac{dC}{dt} = 0$$

จะได้

$$\frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt} = i$$

$$C = \frac{i}{dV / dt} ; F$$

$$C = \frac{j}{dV / dt} ; F / cm^2$$

ข้อมูลการทดลอง

Scan rate (dV/ dt) เท่ากับ 0.02 V/s

ได้ค่าจากการอินทิเกรตจากการทดลองครั้งที่ 1 ได้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากับ 0.55 คูลอมบ์

ได้ค่าจากการอินทิเกรตจากการทดลองครั้งที่ 2 ได้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากับ 0.74 คูลอมบ์

ดังนั้นประจุไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.645 คูลอมบ์ หรือเท่ากับ 129000  $\mu C/cm^2$  นำไปแทนค่าในสมการจะได้

$$ECA(cm^2 Ptg^{-1} Pt) = \frac{129000 \mu C cm^{-2}}{210(\mu C cm^{-2} Pt) \times 0.001(gPt cm^{-2})} = 614285.71 cm^2 / g$$

หรือ 61.43 m<sup>2</sup>/g

ตารางที่ ก.4 ผลการวัดค่า CV ของการทดลองตอนที่ 1

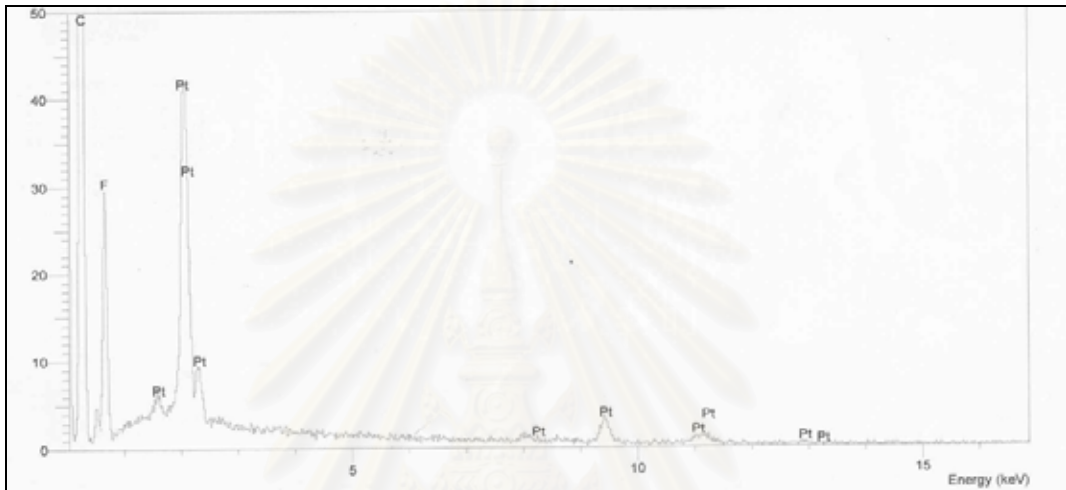
ลำดับที่	ECA (m <sup>2</sup> /g)
1	43.67
2	52.50
3	53.35
4	29.04
5	45.60
6	61.43
7	45.78
8	25.19
9	40.66
10	29.54
11	20.05
12	32.06
13	31.25
14	31.20
15	18.57
16	8.39
เฉลี่ยเอททางการค้า	49.40



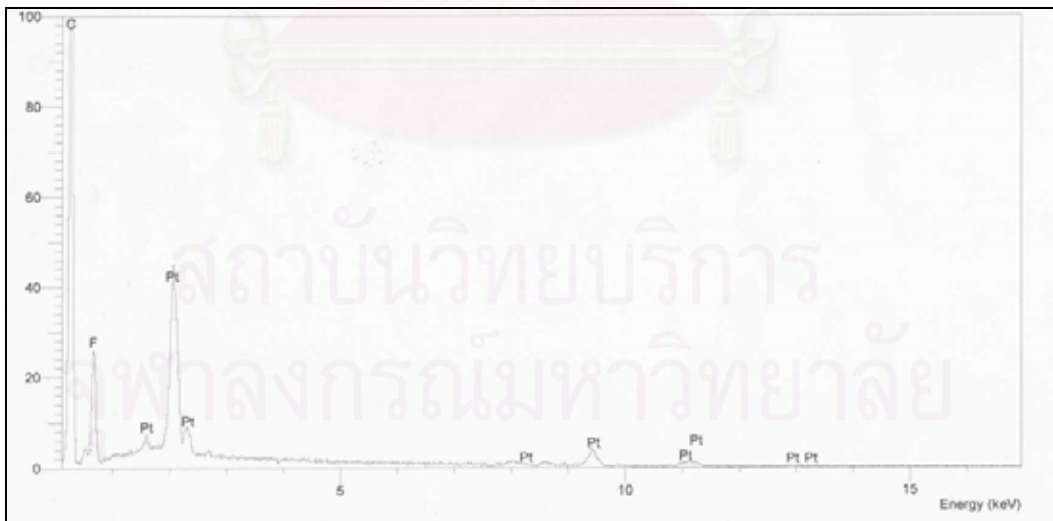
## ภาคผนวก ข

### ผลการทดลอง

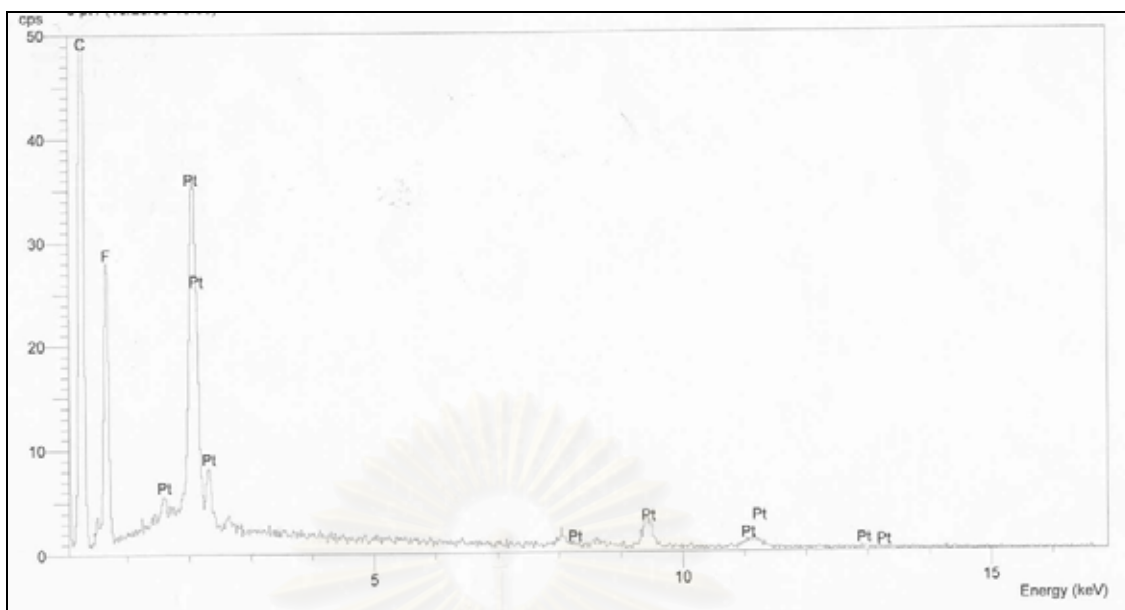
ผลการวิเคราะห์ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง EDX ของขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์



รูปที่ ข.1 ปริมาณแพลทินัม 16.06% คิดเป็น Pt loading เท่ากับ  $1.45 \text{ mg/cm}^2$



รูปที่ ข.2 ปริมาณแพลทินัม 16.44% คิดเป็น Pt loading เท่ากับ  $1.42 \text{ mg/cm}^2$



รูปที่ ข.3 ปริมาณแพลทินัม 16.92% คิดเป็น Pt loading เท่ากับ 1.51 mg /cm<sup>2</sup>



รูปที่ ข.4 ปริมาณแพลทินัม 16.53 %คิดเป็น Pt loading เท่ากับ 1.37 mg /cm<sup>2</sup>

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองจากชุดการออกแบบการทดลองตอนที่ 1

ลำดับที่	A	B	C	D	Current density (mA/cm <sup>2</sup> ) at 0.6V	Power (W) at 0.6V
1	-	-	-	-	85.05	0.26
2	+	-	-	-	82.92	0.25
3	-	+	-	-	39.91	0.20
4	+	+	-	-	33.80	0.10
5	-	-	+	-	67.86	0.20
6	+	-	+	-	91.17	0.27
7	-	+	+	-	23.01	0.07
8	+	+	+	-	44.08	0.13
9	-	-	-	+	40.42	0.12
10	+	-	-	+	55.67	0.17
11	-	+	-	+	49.31	0.15
12	+	+	-	+	28.32	0.085
13	-	-	+	+	67.86	0.20
14	+	-	+	+	32.68	0.10
15	-	+	+	+	21.25	0.06
16	+	+	+	+	37.02	0.11

โดยที่ A = ปริมาณเทฟลอน

B = อุณหภูมิ

C = เวลา

D = แก๊สที่ใช้ในการอบซ้ำอิเล็กโทรด

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองจากชุดการทดลองตอนที่1

Flow rate of oxygen = 100 sccm

Flow rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier: Anode = 60 °C

Cathode = 60 °C

Temperature of cell = 60 °C

Pressure = 1 atm

MEA(1)		MEA(2)		MEA(3)		MEA(4)		MEA(5)		MEA(6)	
V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )
0.95	0.07	0.95	0.56	0.95	0	0.95	0.63	0.95	0.07	0.95	0.05
0.9	2.41	0.9	4.06	0.9	1.35	0.9	0.91	0.9	2.5	0.9	3.26
0.8	13.84	0.8	19.77	0.8	11.89	0.8	4.51	0.8	14.51	0.8	17.93
0.7	35.54	0.7	47.03	0.7	27.44	0.7	15.75	0.7	36.93	0.7	46.78
0.6	85.05	0.6	82.92	0.6	39.9	0.6	33.8	0.6	67.85	0.6	91.17
0.5	138.12	0.5	126.04	0.5	63.15	0.5	56.02	0.5	106.28	0.5	147.02
0.4	196.42	0.4	171.8	0.4	88.06	0.4	99.83	0.4	152.05	0.4	222.14
0.3	220.08	0.3	221.33	0.3	113.74	0.3	167.2	0.3	205.1	0.3	
0.2		0.2	267.97	0.2	137.75	0.2	219.32	0.2	220.46	0.2	
0.1		0.1	311.18	0.1	140.8	0.1	265.88	0.1		0.1	

MEA(7)		MEA(8)		MEA(9)		MEA(10)		MEA(11)		MEA(12)	
V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )
0.95	0.54	0.95	0.55	0.95	0.73	0.95	0.59	0.95	0.55	0.95	0.03
0.9	1.27	0.9	1.49	0.9	1.5	0.9	2.8	0.9	0.77	0.9	0.23
0.8	4.61	0.8	7.29	0.8	7.48	0.8	11.12	0.8	4.59	0.8	3.16
0.7	12.28	0.7	22.95	0.7	21.14	0.7	25.57	0.7	20.63	0.7	11.8
0.6	23.01	0.6	44.07	0.6	40.42	0.6	42.25	0.6	49.31	0.6	28.32
0.5	37.2	0.5	69.21	0.5	64.58	0.5	65.15	0.5	95.32	0.5	54.86
0.4	47.05	0.4	96.07	0.4	92.95	0.4	89.55	0.4	162.8	0.4	80.65
0.3	62.99	0.3	125.62	0.3	123.9	0.3	110.92	0.3	239.19	0.3	110.66
0.2	84.75	0.2	107.2	0.2	104.03	0.2	148.95	0.2	315.32	0.2	147.09
0.1	113.56	0.1	143.24	0.1	86.32	0.1	198.56	0.1	382.21	0.1	186.26

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MEA(13)		MEA(14)		MEA(15)		MEA(16)	
V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )
0.95	0.07	0.95	0.08	0.95	0.03	0.95	0.05
0.9	2.5	0.9	0.93	0.9	0.32	0.9	0.78
0.8	14.51	0.8	4.76	0.8	3.21	0.8	4.35
0.7	36.93	0.7	22.95	0.7	12.28	0.7	25.57
0.6	67.86	0.6	32.68	0.6	21.25	0.6	37.02
0.5	106.29	0.5	54.02	0.5	38.02	0.5	60.15
0.4	152.05	0.4	98.73	0.4	45.05	0.4	88.55
0.3	205.1	0.3	127.2	0.3	59.39	0.3	108.72
0.2	220.47	0.2	163.45	0.2	82.35	0.2	135.95
0.1		0.1	192.34	0.1	121.06	0.1	190.16

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองจากชุดการทดลองตอนที่2 replicate 1

Flow rate of oxygen = 100 sccm

Flow rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier: Anode = 65 °C

Cathode = 60 °C

Temperature of cell = 60 °C

Pressure = 1 atm

MEA(1)		MEA(2)		MEA(3)		MEA(4)	
V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )
0.95	2	0.95	4	0.95	4	0.95	4
0.9	10	0.9	10	0.9	12	0.9	12
0.8	60	0.8	56	0.8	70	0.8	56
0.7	150	0.7	103	0.7	144	0.7	140
0.6	252	0.6	209	0.6	234	0.6	240
0.5	362	0.5	274	0.5	328	0.5	338
0.4	474	0.4	383	0.4	420	0.4	434
0.3	578	0.3	414	0.3	512	0.3	520
0.2	670	0.2	450	0.2	588	0.2	592
0.1	762	0.1	634	0.1	678	0.1	670

MEA(5)		MEA(6)		MEA(7)		MEA(8)	
V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )
0.95	4	0.95	4	0.95	2	0.95	2
0.9	10	0.9	16	0.9	6	0.9	6
0.8	56	0.8	56	0.8	46	0.8	22
0.7	90	0.7	98	0.7	100	0.7	48
0.6	150	0.6	150	0.6	218	0.6	166
0.5	196	0.5	204	0.5	326	0.5	268
0.4	228	0.4	236	0.4	402	0.4	370
0.3	284	0.3	282	0.3	492	0.3	446
0.2	312	0.2	324	0.2	564	0.2	540
0.1	396	0.1	392	0.1	666	0.1	592

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองจากชุดการทดลองตอนที่2 replicate 2

Flow rate of oxygen = 100 sccm

Flow rate of Hydrogen = 100 sccm

Temperature of Humidifier: Anode = 65 °C

Cathode = 60 °C

Temperature of cell = 60 °C

Pressure = 1 atm

MEA(1)		MEA(2)		MEA(3)		MEA(4)	
V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )
0.95	4	0.95	2	0.95	4	0.95	4
0.9	10	0.9	6	0.9	10	0.9	8
0.8	50	0.8	48	0.8	64	0.8	56
0.7	130	0.7	103	0.7	124	0.7	128
0.6	236	0.6	190	0.6	228	0.6	216
0.5	324	0.5	267	0.5	318	0.5	284
0.4	400	0.4	372	0.4	400	0.4	384
0.3	492	0.3	408	0.3	494	0.3	462
0.2	572	0.2	441	0.2	578	0.2	532
0.1	652	0.1	623	0.1	660	0.1	630

MEA(5)		MEA(6)		MEA(7)		MEA(8)	
V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )	V(v)	j(mA/cm <sup>2</sup> )
0.95	2	0.95	6	0.95	2	0.95	2
0.9	11	0.9	12	0.9	2	0.9	4
0.8	47	0.8	68	0.8	26	0.8	30
0.7	98	0.7	130	0.7	70	0.7	90
0.6	165	0.6	182	0.6	152	0.6	172
0.5	226	0.5	236	0.5	204	0.5	260
0.4	282	0.4	286	0.4	306	0.4	334
0.3	345	0.3	320	0.3	414	0.3	406
0.2	412	0.2	364	0.2	486	0.2	476
0.1	468	0.1	412	0.1	602	0.1	524

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### ผลการวิเคราะห์ X-rays diffraction

การคำนวณขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัมจากการวิเคราะห์ X-rays diffraction สามารถคำนวณได้จากสมการ Debye-Scherrer Equation

$$L = \frac{0.9\lambda_{k\alpha 1}}{B_{2\theta} \cos \theta_{\max}} \quad (\text{ง.1})$$

โดยที่  $L$  คือ ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)

$\lambda_{k\alpha 1}$  คือ ความยาวคลื่นของ X-rays ในที่นี้คือ  $1.54 \text{ \AA}$  หรือ 15.4 นาโนเมตร

$B_{2\theta}$  คือ ความกว้างที่ความเข้มครึ่งหนึ่งของพีค (เรเดียน)

$\theta$  คือ Bragg angle ของการสะท้อนของรังสี (เรเดียน)

การคำนวณขนาดของโลหะแพลทินัมจากข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-rays diffraction ของข้อวิไล้กโทรดทางการค้า ดังนี้

$$B_{2\theta} = 1.71 \text{ เรเดียน}$$

$$2\theta = 39.806 \text{ องศา} \quad \text{ดังนั้น} \quad \theta = 19.903 \text{ องศา} \quad \text{หรือ} \quad 0.344 \text{ เรเดียน}$$

$$\cos \theta = \cos(0.344) = 0.936$$

แทนค่าในสมการที่ (ง.1) จะได้

$$L = \frac{0.9 \times 15.4}{1.71 \times 0.936} = 8.11 \text{ นาโนเมตร}$$

สถาบันวิจัยและบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์ X-rays diffraction ของซั้วเล็กโทรดทางการค้าและซั้วเล็กโทรดที่เตรียมได้

ซั้วเล็กโทรดทางการค้า				ซั้วเล็กโทรดที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ *			
Angle 2-Theta°	d-Value Angstrom	Intensity Count	Intensity% %	Angle 2-Theta°	d-Value Angstrom	Intensity Count	Intensity% %
39.806	2.263	598	100	39.824	2.262	397	100
46.154	1.965	280	46.9	46.120	1.966	210	53
54.469	1.683	234	39.1	54.430	1.684	317	79.8
67.654	1.384	141	23.6	67.632	1.384	99.8	25.2
81.419	1.181	138	23.1	81.252	1.183	95.1	24
86.186	1.128	86.8	14.5	86.558	1.124	84	21.2

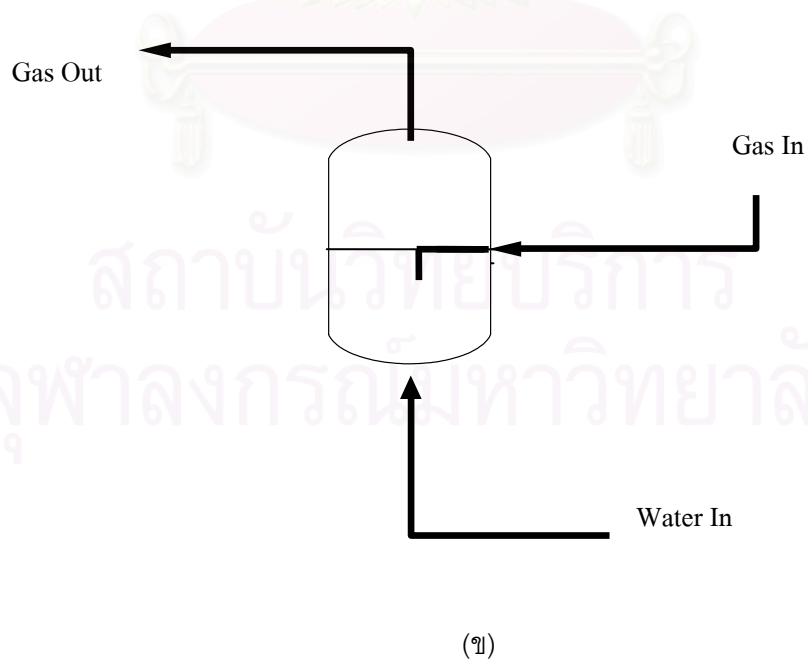
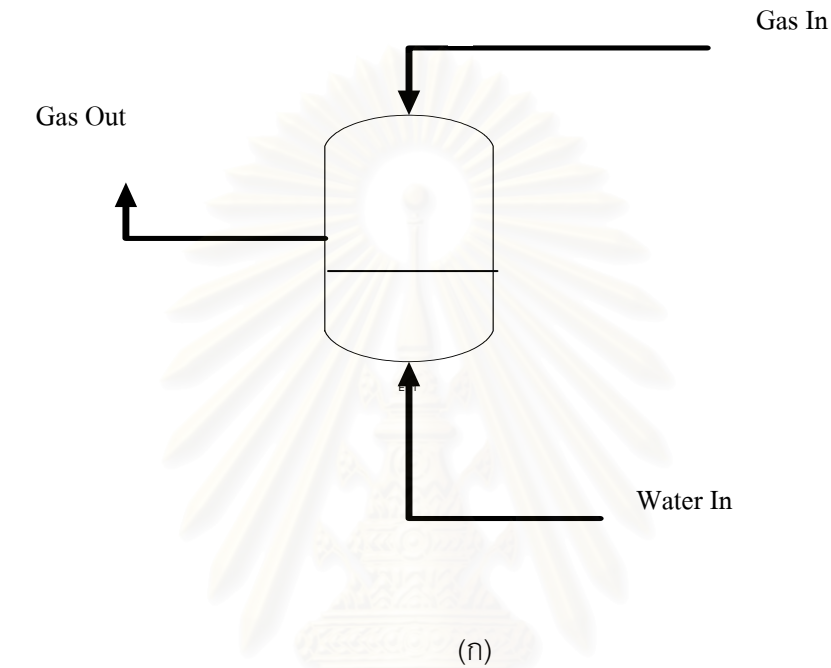
\*เป็นซั้วเล็กโทรดที่เตรียมที่ภาวะของ MEA (1) ของชุดการทดลองที่ 2



ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลอง

การปรับปรุงความชื้น (Humidifier) ของระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (Test station) ในการทดลองตอนที่ 2



รูปที่ จ.1 ความชื้นของระบบการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง: (ก) ความชื้นก่อนการปรับปรุงและ (ข) ความชื้นที่ปรับปรุงแล้ว

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศศิกานต์ เอ็นดู เกิดวันที่ 15 พฤษภาคม 2523 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนกันตังพิทยากร จ.ตรัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย