

การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบโดยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่พิมพ์
อิงค์เจ็ทสำหรับความทนคาร์บอนนอกไซด์ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

นายสุชาติ พงษ์ชัยผล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PREPARATION OF COMPOSITE CATALYST-COATED MEMBRANE BY DECAL
TRANSFER OF INKJET-PRINTED ELECTRODE FOR CARBON MONOXIDE-TOLERANCE
IN PEM FUEL CELL

Mr. Suchat Pongchaiphol

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบโดย การถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่พิมพ์อิงค์เจ็ทสำหรับความทน คาร์บอนมอนอกไซด์ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์
โดย	นายสุชาติ พงษ์ชัยผล
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พฤกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หนูนวม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม)

สุชาติ พงษ์ชัยผล : การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบโดยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่พิมพ์อิงก์เจ็ตสำหรับความทนคาร์บอนนอกไซต์ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. (PREPARATION OF COMPOSITE CATALYST-COATED MEMBRANE BY DECAL TRANSFER OF INKJET-PRINTED ELECTRODE FOR CARBON MONOXIDE-TOLERANCE IN PEM FUEL CELL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.คุณากร ภูจินดา, 93 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและแพลทินัมนิวทริเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม โดยวิธีการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าหลังจากการพิมพ์อิงก์เจ็ตสำหรับความทนคาร์บอนนอกไซต์ โดยศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์อิงก์เจ็ตของหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาและการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่เตรียมจากการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่ได้จากการพิมพ์อิงก์เจ็ตให้สมรรถนะที่ดีกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตของหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊สโดยมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์เท่ากับ 421.4 และ 385.3 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ จากการทดสอบความทนคาร์บอนนอกไซต์ เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีแอดโนด 2 ชั้น โดยมีแพลทินัมนิวทริเนียม/คาร์บอนเป็นชั้นนอก และแพลทินัม/คาร์บอนอยู่ชั้นในสามารถฟื้นฟูสมรรถนะภายหลังการสัมผัสคาร์บอนนอกไซต์ใกล้เคียงกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีแอดโนดเป็นแพลทินัมนิวทริเนียม/คาร์บอนเพียงชั้นเดียวที่ความเข้มข้นสูงถึง 60 พีอีเอ็ม โดยมีความหนาแน่นกระแสสัมพัทธ์ที่ 0.6 โวลต์ที่ฟื้นฟูได้เท่ากับ 85.63% และ 86.49% ตามลำดับ

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5272585223: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: COMPOSITE CATALYST-COATED MEMBRANE/ DECAL TRANSFER /
INKJET PRINTING / CARBON MONOXIDE-TOLERANCE/ PEM FUEL CELL

SUCHAT PONGCHAIPHOL: PREPARATION OF COMPOSITE CATALYST-
COATED MEMBRANE BY DECAL TRANSFER OF INKJET-PRINTED
ELECTRODE FOR CARBON MONOXIDE-TOLERANCE IN PEM FUEL CELL.

ADVISOR: KUNAKORN POOCHINDA, Ph.D., 93 pp.

This research studied the preparation of catalyst-coated membrane (MEA) for PEM fuel cell, using carbon-supported platinum and platinum ruthenium as the catalysts, by decal transfer of inkjet-printed electrode and its carbon monoxide-tolerance. The optimum conditions for inkjet printing of catalyst ink and decal transfer of composite catalyst layers were investigated. It was found that the MEAs prepared by decal transfer of inkjet-printed electrodes gave a better performance than MEAs prepared by inkjet printing of catalyst ink onto gas diffusion layers. The current density at 0.6 V were found to be 421.4 and 385.3 mA/cm², respectively. From carbon monoxide-tolerance test, the MEAs with a bilayer of anode catalyst, PtRu/C as the outer layer and Pt/C as the inner layer, showed a comparable performance recovery as MEAs with single PtRu/C layer, after carbon monoxide exposure up to 60 ppm. The recovered relative current density at 0.6 V was 85.63% and 86.49% respectively.

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

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

Academic Year :2012.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.คุณากร ภูจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่านในกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เกื้อวลี พฤษชาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม และ รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุที่มอบทุนการศึกษาและทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (EN 276B)

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (PEMFC).....	4
2.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงไดเร็กเมทานอล (DMFC).....	5
2.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ (AFC).....	5
2.1.4 เซลล์เชื้อเพลิงฟอสฟอริกแอซิด (PAFC).....	5
2.1.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเดทลอม (MOFC).....	5
2.1.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (SOFC).....	6
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม.....	8
2.2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	9
2.2.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	10
2.2.2.1 ชั้นแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer, GDL).....	10
2.2.2.2 ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer).....	11

บทที่	หน้า
2.2.2.3 อิเล็กโทรไลต์ หรือเมมเบรน	12
2.2.2.4 แผ่นช่องการไหลของแก๊ส (Flow field plate).....	13
2.2.2.5 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate).....	14
2.2.2.1 วัสดุกันรั่ว (Seal).....	14
2.3 การเตรียมเอเอ็มซีเอ	14
2.3.1 การสเปรย์.....	15
2.3.2 การระบาย.....	16
2.3.3 การพิมพ์เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท.....	16
2.3.2 การถ่านไออนุรูปลอก.....	16
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง.....	17
2.4.1 ปริมาณน้ำ.....	17
2.4.2 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	18
2.4.3 ความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ	19
2.4.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	20
2.5 กราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve).....	20
2.5.1 โพลาริเซชันทางเคมี (Chemical Polarization).....	22
2.5.2 โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization).....	22
2.5.3 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization).....	22
2.6 ผลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา.....	22
2.7 การกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากแก๊สเชื้อเพลิง.....	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	29
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	30
3.4 ตัวแปรที่ศึกษา.....	30
3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	31
3.5.1 การเตรียมเมมเบรนเนฟิออน	31

บทที่	หน้า
3.5.2 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C และ PtRu/C.....	31
3.5.3 การเติมหมึกพิมพ์ลงในตลับหมึกพิมพ์ Fujifilm Dimatix Cartridge.....	32
3.5.4 การทำความสะอาดตลับหมึกพิมพ์ Fujifilm Dimatix Cartridge.....	33
3.5.5 การเตรียมเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Fujifilm Dimatix Materials Printer.....	35
3.5.6 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) ที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์อิงค์เจ็ทบนผ้าคาร์บอน	36
3.5.7 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) ที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์อิงค์เจ็ทตามด้วยการถ่ายโอนรูปลอก.....	37
3.5.8 การวัดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 และ 25 ตารางเซนติเมตร..	39
3.5.8.1 การประกอบเซลล์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง.....	39
3.5.8.2 การวิเคราะห์ Polarization Curve ของเซลล์เชื้อเพลิง.....	40
3.5.8.3 การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า (Impedance spectroscopy)	43
3.5.8.4 การวิเคราะห์แบบไซคลิกโวลแทมเมทรีในเซลล์เชื้อเพลิง (Cyclic voltammetry, CV).....	44
3.5.8.5 การวิเคราะห์ความทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (CO-tolerant)...	45
3.5.8.6 ขั้นตอนการปิดระบบหลังการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง.....	47
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	48
4.1 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน.....	48
4.1.1 หมึกพิมพ์เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Fujifilm Dimatix Materials Printer.....	48
4.1.2 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	49
4.1.3 อิทธิพลของแอลกอฮอล์ในหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
4.2 การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยการถ่ายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้าที่พิมพ์อิงค์เจ็ทแล้ว.....	52
4.2.1 เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียม.....	52
4.2.2 การพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ.....	54
4.2.3 การถ่ายโอนรูปลอก.....	54
4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละแบบเตรียมได้...	56

บทที่	หน้า
4.3.1	สมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า..... 56
4.3.2	พื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า..... 57
4.3.3	การวัดความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงของเมมเบรนประกอบ ขั้วไฟฟ้า..... 59
4.3.4	การวัดความพรุนของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า..... 60
4.3.5	การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 61
4.3.6	การขยายขนาด MEA IV จาก 5 เป็น 25 ตารางเซนติเมตร..... 66
4.4	ผลการเปรียบเทียบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบ ขั้วไฟฟ้าแต่ละแบบเตรียมได้ทดสอบ..... 67
4.4.1	ทดสอบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 20 พีพีเอ็ม..... 68
4.4.2	ทดสอบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 60 พีพีเอ็ม..... 71
4.4.3	ทดสอบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 100 พีพีเอ็ม..... 74
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 78
5.1	สรุปผลการทดลอง..... 78
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 79
	รายการอ้างอิง..... 81
	ภาคผนวก..... 87
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 93

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ชนิดและลักษณะต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง.....	7
2.2 ขนาดและความหนาของเมมเบรนชนิดต่างๆ	11
4.1 ค่าแรงดึงผิวและความหนืดของสารละลายที่ใช้ทดสอบการเตรียมหมึกพิมพ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด.....	50
4.2 อัตราส่วนของสูตรหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	50
4.3 ค่าแรงดึงผิวและความหนืดของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้.....	51
4.4 ลักษณะของ MEA แต่ละชนิด	53
4.5 ค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละแบบ.....	57
4.6 ค่า Active surface area โดยเฉลี่ยจากการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมทรีของ เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	58
4.7 ค่าความต้านทานเฉลี่ยของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	59
4.8 ค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า 2 ชั้น (MEA IV) ที่ขนาดพื้นที่การเกิดปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร และ 5 ตาราง เซนติเมตร.....	66
4.9 ผลค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมม เบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ 20 พีพีเอ็ม.....	70
4.10 ผลค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมม เบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ 60 พีพีเอ็ม.....	73
4.11 ผลค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมม เบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ 100 พีพีเอ็ม.....	76

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	การเคลื่อนที่ของไอออนในเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด.....	6
2.2	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม	9
2.3	องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม	10
2.4	การถ่ายโอนอิเล็กตรอนและไอออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา เมมเบรน และชั้นแพร่แก๊ส	11
2.5	โครงสร้างของเนฟออนเมมเบรน	13
2.6	การเตรียม Membrane Electrode Assembly (MEA).....	15
2.7	การเคลื่อนที่ของน้ำที่เกิดขึ้นจากทุกกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	17
2.8	ผลกระทบของการเพิ่มความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	19
2.9	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	21
2.10	กลไกการเกิดออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	26
3.1	เครื่องพิมพ์ Fujifilm Dimatix Materials Printer และตลับหมึกพิมพ์ Fujifilm Dimatix Cartridge	32
3.2	ส่วนประกอบและวิธีการเติมหมึกของตลับหมึกพิมพ์ Fujifilm Dimatix Cartridge...	33
3.3	ขั้นตอนการเตรียมเครื่องพิมพ์อย่างง่าย.....	34
3.4	การกำหนดพื้นที่การพิมพ์บนแผ่นเทฟลอน.....	35
3.5	ขั้นตอนการพิมพ์อิงก์เจ็ตและถ่ายโอนรูปลอกอย่างง่าย.....	39
3.6	อุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม และช่องการไหลของแก๊สภายในเซลล์เชื้อเพลิง.	39
3.7	แผนภาพระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.....	40
3.8	แผนภาพการทดสอบอิมพีแดนซ์ในเซลล์เชื้อเพลิง.....	42
3.9	แผนภาพการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมตรีในเซลล์เชื้อเพลิง.....	44
4.1	รูปแบบของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้แต่ละแบบ.....	53
4.2	สมรรถนะและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ที่เตรียมได้ชนิดต่างๆ.....	56
4.3	การทดสอบไซคลิกโวลแทมเมตรีของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	58
4.4	กราฟ Nyquist plot ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์.....	60
4.5	กราฟแสดงขนาดช่องว่างเฉลี่ยกับการกระจายตัวของขนาดช่องว่างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า.....	61

ภาพที่	หน้า
4.6	ภาพถ่าย SEM/EDX ของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างๆ 62
4.7	ภาพถ่าย SEM/EDX แสดงการแยกออกเป็นชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียม สำหรับ MEA IV..... 65
4.8	สมรรถนะและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า 2 ชั้น (MEA IV) โดยการถ่ายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้าหลังจากการพิมพ์อิงค์เจ็ตที่ขนาดพื้นที่การเกิดปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร และ 5 ตารางเซนติเมตร..... 66
4.9	สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 20 พีพีเอ็ม ที่เวลา 30 นาที 68
4.10	สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 20 พีพีเอ็ม ที่เวลา 60 นาที 69
4.11	สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 20 พีพีเอ็ม หลังฟื้นฟูสภาพ..... 70
4.12	สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 60 พีพีเอ็ม ที่เวลา 30 นาที..... 71
4.13	สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 60 พีพีเอ็ม ที่เวลา 60 นาที..... 71
4.14	สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 60 พีพีเอ็ม หลังฟื้นฟูสภาพ..... 72
4.15	สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 100 พีพีเอ็ม ที่เวลา 30 นาที..... 74
4.16	สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 100 พีพีเอ็ม ที่เวลา 60 นาที 74
4.17	สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 100 พีพีเอ็ม หลังฟื้นฟูสภาพ..... 75
ก.1	พื้นที่ที่ได้กราฟในช่วงที่เกิดการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนจากกราฟไฮคลิกโวลแทมเมตรี.. 89
ข.1	หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันปัญหาวิกฤตพลังงานและมลพิษกำลังเป็นปัญหาสำคัญที่ลุกลามไปทั่วโลกอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดความพยายามศึกษาค้นคว้าหาแหล่งพลังงานใหม่ที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถใช้ทดแทนพลังงานในปัจจุบันได้ พลังงานทางเลือกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจคือ “เซลล์เชื้อเพลิง” ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน โดยเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษ อีกทั้งยังได้น้ำและความร้อนเป็นผลข้างเคียง เซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีด้วยกันอยู่หลายชนิด ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงและอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ที่ใช้

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือพีอีเอ็ม (Proton exchange membrane: PEM) กำลังเป็นที่นิยมมากขึ้น เพราะมีน้ำหนักเบา การผลิตไม่ซับซ้อน มีความทนทาน อายุการใช้งานนาน ทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ (50-120 องศาเซลเซียส) และมีขนาดเล็กพกพาสะดวก โดยหลักทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม คือ แก๊สไฮโดรเจนไหลในด้านแอนอดไปสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดการแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอน ไฮโดรเจนไอออนจะผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ไปยังขั้วแคโทดและรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผ่านวงจรภายนอกแล้ว รวมตัวกับออกซิเจนและอิเล็กตรอนที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ได้โมเลกุลของน้ำขึ้นมา ซึ่งการวิ่งของอิเล็กตรอนนี้ จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ ได้

ในทุกวันนี้เซลล์เชื้อเพลิงมักใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม เพราะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในปัจจุบัน แต่ข้อเสียที่สำคัญคือ วัสดุแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยเมื่อมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในเซลล์เชื้อเพลิง แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเข้าไปจับที่ผิวของแพลทินัม ทำให้แก๊สไฮโดรเจนไม่สามารถจับตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมได้ สรรพคุณของเซลล์เชื้อเพลิงจึงลดลง ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนส่วนใหญ่ที่ได้นั้นจะมาจากกระบวนการรีฟอร์มมิง และแก๊สซิเคชัน จึงทำให้มีคาร์บอนมอนอกไซด์เจือปนมาด้วย ปัญหาเหล่านี้อาจแก้ไขได้โดยใช้ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่ก็มีราคาแพง หรือหากให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิสูงก็จะช่วยออกซิไดซ์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากผิวแพลทินัม แต่ควบคุมยากและมีผลต่อเสถียรภาพของส่วนประกอบอื่นเช่น เยื่อแผ่นเนฟลอน อีกทางเลือกหนึ่งที่ได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยกันอยู่คือ การใช้โลหะผสมชนิดอื่น

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแพลทินัม เพื่อให้โลหะผสมช่วยทำหน้าที่จับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่ให้ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยตรง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมนี้สามารถทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีขึ้น และจะส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีอายุการใช้งานนานขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยวิธีการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยการถ่ายโอนรูปลอกข้อไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ตให้มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งนี้การพิมพ์อิงก์เจ็ตสามารถกำหนดขนาดลักษณะรูปร่าง ปริมาณ และความสม่ำเสมอของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิมที่ต้องใช้มือเช่นการทำด้วยแปรงหรือการสเปรย์ ซึ่งขึ้นกับทักษะของผู้เตรียม ส่วนการถ่ายโอนรูปลอกแก้ปัญหาการบวมของเมมเบรนเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลาย ในงานวิจัยต่างๆ พบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบนั้น ถ้าสามารถแยกชั้นกรงออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอย่างชัดเจนจะทำให้ทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีการถ่ายโอนรูปลอก หลังจากพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับจำพวกไมลาร์หรือเทฟลอน การกตร้อนเมมเบรนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบบนวัสดุรองรับ อาจทำให้ได้ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่แยกชั้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอย่างชัดเจน ซึ่งทำให้สามารถกรองคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนตัวรองรับที่เหมาะสมตามด้วยการถ่ายโอนรูปลอกลงบนเมมเบรนเพื่อเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์
2. ศึกษาการขยายส่วนเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบเป็น 25 ตารางเซนติเมตรโดยการถ่ายโอนรูปลอกข้อไฟฟ้าที่ผ่านการพิมพ์อิงก์เจ็ต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาวิธีการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบโดยการถ่ายโอนรูปลอกข้อไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ตขนาด 5 ตารางเซนติเมตร และ 25 ตารางเซนติเมตร โดยศึกษาผลของการกตร้อนเมมเบรนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบบนวัสดุรองรับครั้งเดียว และการกตร้อนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเดี่ยวหลายครั้งตามลำดับ ต่อสมรรถนะและความทนคาร์บอนมอนอกไซด์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเรียนรู้การเตรียมและขยายส่วนเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบโดยการก่อร์อนเมมเบรนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบบนวัสดุรองรับครั้งเดียว หรือก่อร์อนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชั้นเดียวหลายครั้งตามลำดับ และได้เซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 และ 25 ตารางเซนติเมตรที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่สามารถทนคาร์บอนมอนอกไซด์
2. ศึกษาวิธีการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบโดยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้า
3. ศึกษาวิธีการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม และปรับปรุงสถานีทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงให้พร้อมสำหรับใช้งานกับคาร์บอนมอนอกไซด์
4. เตรียมหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบ โดยวิเคราะห์ความหนืด แรงตึงผิว และขนาดอนุภาคของหมึกพิมพ์ เพื่อให้ได้สูตรหมึกที่เหมาะสมต่อการพิมพ์อิงก์เจ็ต
5. เตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าเชิงประกอบขนาด 5 ตารางเซนติเมตร โดยการก่อร์อนเมมเบรนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบบนวัสดุรองรับครั้งเดียว หรือก่อร์อนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเดี่ยวหลายครั้งตามลำดับ วิเคราะห์ความเป็นชั้น
6. ทดสอบสมรรถนะและความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียม
7. ทดสอบการขยายส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 25 ตารางเซนติเมตรและวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ
8. วิเคราะห์ข้อมูล ผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง
9. เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง [1-6]

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) คือ อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนมาเป็นพลังงานไฟฟ้า (electrochemical energy conversion device) โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีสารตั้งต้นคือ แก๊สออกซิเจน (O_2) หรือสารออกซิแดนซ์อื่นๆ และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) หรือไฮโดรคาร์บอนประเภทอื่น เช่น แก๊สธรรมชาติและแอลกอฮอล์ที่คล้ายกับเมทานอล ทำให้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนเกิดขึ้นได้โดยตรง โดยไม่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ เซลล์เชื้อเพลิงมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ (Battery) แต่แตกต่างจากแบตเตอรี่ คือ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ลดลงและไม่มีการเติมประจุไฟใหม่ เซลล์เชื้อเพลิงจะให้กระแสไฟฟ้า ความร้อน ระบายไคที่ยังมีเชื้อเพลิงป้อนอยู่ตลอดเวลา และที่สำคัญเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ และยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ประมาณ 1-3 เท่า

เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดนั้นมีทั้งข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีการคิดค้นเซลล์เชื้อเพลิงออกมาหลายชนิด สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น โดยอุณหภูมิ ชนิดของเชื้อเพลิง หรือพาหะประจุ แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดแบ่งโดยชนิดของอิเล็กโทรไลต์ ดังนี้

2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton Exchange Membrane Fuel Cell: PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า มีความหนาแน่นกระแสที่สูงและสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วได้ตามความต้องการ เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มเหมาะกับการประยุกต์ใช้กับพลังงานที่จำเป็นต้องเริ่มอย่างรวดเร็ว เช่น รถยนต์หรือรถยก ได้เป็นอย่างดี เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มมีตั้งแต่วัตต์น้อยๆ จนถึงหลายกิโลวัตต์ และสามารถปรับขนาดเป็นระบบที่ใหญ่ขึ้น จนถึงวันนี้ใหญ่ที่สุดเป็นโรงไฟฟ้าขนาด 1 เมกะวัตต์ ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มมีความหลากหลายของการใช้งาน โดยมียอดขายมุ่งเน้นในเรื่องการสื่อสารโทรคมนาคม ศูนย์เก็บข้อมูล ที่อยู่อาศัย (เป็นพลังงานหลักหรือพลังงานสำรอง) รถ และยานพาหนะต่างๆ ทั้งในรถบัสและรถโดยสารสาธารณะ

2.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงไดเร็กเมทานอล (Direct Methanol Fuel Cell: DMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงไดเร็กเมทานอล มีความคล้ายคลึงกับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล ในเรื่องของเมมเบรนพอลิเมอร์ที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ อย่างไรก็ตามในระบบตัวเร่งปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงไดเร็กเมทานอล ขั้วบวกจะสามารถดึงไฮโดรเจนจากเมทานอลเหลวได้เอง โดยไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงไดเร็กเมทานอลมีคุณสมบัติการทำงานที่ต่ำ จึงน่าสนใจในการใช้งานขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์มือถือ แล็บท็อป และเครื่องชาร์จแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell: AFC)

องค์การนาซาได้ใช้เซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์โดยมีไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ในภารกิจตั้งแต่ปี 1960 เพื่อให้พลังงานไฟฟ้าและน้ำดื่ม เซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์มีปัญหาความเป็นพิษได้ง่าย อันเนื่องมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงมีความเหมาะสมในการใช้ในอวกาศและใต้น้ำที่ต้องมีการควบคุมอย่างสูง

2.1.4 เซลล์เชื้อเพลิงฟอสฟอริกแอซิด (Phosphoric Acid Fuel Cell: PAFC)

เซลล์เชื้อเพลิงฟอสฟอริกแอซิดสามารถทำงานโดยใช้เชื้อเพลิงที่แปรรูปจากไฮโดรคาร์บอนหรือแก๊สชีวภาพ ปฏิกิริยาขั้วบวกและขั้วลบจะคล้ายกับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล แต่ตั้งแต่มีคุณสมบัติการใช้งานที่สูงขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงฟอสฟอริกแอซิดมีความทนต่อสิ่งปนเปื้อนจากเชื้อเพลิง และมีการใช้พลังงานความร้อนที่เป็นผลพลอยได้ด้วย ในทุกวันนี้เซลล์เชื้อเพลิงฟอสฟอริกแอซิดจะใช้กับระบบที่ต้องใช้พลังงานสูง เช่น โรงพยาบาล โรงเรียน อาคารสำนักงาน ร้านอาหารของชำ และโรงบำบัดน้ำเสีย

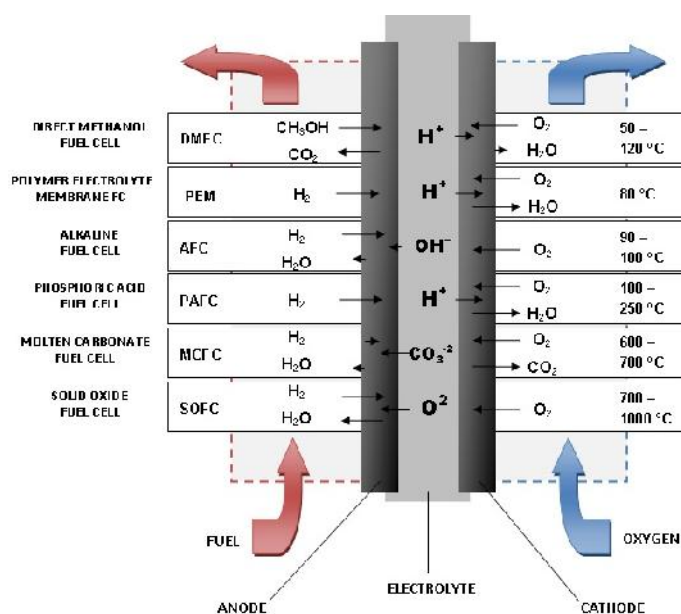
2.1.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell: MOFC)

เนื่องคุณสมบัติการทำงานสูงเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเนตหลอม จึงเชื้อเพลิงที่ได้จากไฮโดรคาร์บอนสามารถแปลงเป็นไฮโดรเจนภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงได้เอง อีกทั้งยังไม่มีปัญหาในเรื่องของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงสามารถนำคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงได้ จึงมีความน่าสนใจมากขึ้นสำหรับเชื้อเพลิงที่มีแก๊สที่ทำจากถ่านหิน เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเนตหลอมเหมาะสำหรับระบบที่ใช้พลังงานทั้งไฟฟ้าและความร้อนเยอะ เช่น โรงงาน

เคมีภัณฑ์ โรงงานอาหารและเครื่องดื่ม โรงพยาบาล เรือนจำ โรงแรม มหาวิทยาลัย และโรงพยาบาล
น้ำเสีย

2.1.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งมีอุณหภูมิสูง จึงมีความสามารถในรีฟอร์มมิงสารไฮโดรคาร์บอน เช่น แก๊สธรรมชาติได้เอง แต่สารไฮโดรคาร์บอนที่มวลโมเลกุลสูงกว่า (น้ำมันเบนซิน หรือน้ำมันก๊าด) ยังต้องรีฟอร์มมิงภายนอกอยู่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ ระบบแรกเป็นท่ออาร์เรย์ยาวหลายเมตร และอีกระบบเป็นแผ่นจานอัด ซึ่งการออกแบบท่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งจะเป็นความลับทางการค้าของบริษัทต่างๆ ทั่วโลก เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็งเหมาะสำหรับการใช้งานขนาดใหญ่มากๆ อาคารสำนักงาน และห้างร้านค้าต่างๆ และยังมีการทดสอบการใช้งานบ้านและอพาร์ทเมนต์ในสหรัฐฯ ญี่ปุ่น และเยอรมนี



ภาพที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของไอออนในเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด [8]

เซลล์เชื้อเพลิงแบ่งออกเป็นหลายชนิด โดยเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็มนั้นเป็นที่นิยมและได้รับความสนใจในการศึกษาอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็มนในการศึกษา โดยรายละเอียดของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็มนั้นจะกล่าวต่อไป

ตารางที่ 2.1 ชนิดและลักษณะต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง [7,8,9]

ชนิดของเซลล์ เชื้อเพลิง	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	Alkaline Fuel Cell (AFC)	Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
อิเล็กโทรไลต์	เมมเบรนพอลิ เมอร์แข็ง	สารละลาย โพแทสเซียมไฮ ดรอกไซด์	กรดฟอสฟอริก ไนลิเทียม อะลูมิเนียม ออกไซด์	โซเดียมหรือ โพแทสเซียม คาร์บอเนตใน เซรามิก LiHO_2	เซรามิกแข็ง เช่น YSZ
อุณหภูมิที่ ใช้งาน	50-100 °C	65-250 °C	150-200 °C	600-700 °C	600-1000 °C
ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	แพลทินัม	ตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะที่ไม่แพง	แพลทินัม	โลหะผสมที่ ราคาถูกกว่า แพลทินัม	โลหะผสมที่ ราคาถูกกว่า แพลทินัม
ไอออนที่ เคลื่อนที่	H^+	OH^-	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
ขนาดเซลล์ รวม	<1-200 กิโลวัตต์	10-100 กิโลวัตต์	400 กิโลวัตต์	300-3000 กิโลวัตต์	1-2000 กิโลวัตต์
เชื้อเพลิง	แก๊สไฮโดรเจน แก๊สธรรมชาติ เมทานอล	แก๊สไฮโดรเจน บริสุทธิ์	แก๊สไฮโดรเจน น้ำมันเบนซิน เมทานอล	แก๊สไฮโดรเจน แก๊สธรรมชาติ แก๊สคาร์บอน มอนอกไซด์	ถ่านหิน ปิโตรเลียม แก๊ส ธรรมชาติ เมทานอล
ประสิทธิภาพ	40-60%	60-70%	36-42%	50-60%	50-60%
การใช้งาน	พลังงานสำรอง พลังงานพกพา การขนส่ง พาหนะพิเศษ	การทหาร งาน อวกาศ	การขนส่ง ระบบกระจาย ไฟฟ้า	สาธารณูปโภค ที่ใช้ไฟฟ้า ระบบกระจาย ไฟฟ้า	สาธารณูปโภค ที่ใช้ไฟฟ้า ระบบกระจาย ไฟฟ้า โรงผลิต ไฟฟ้า

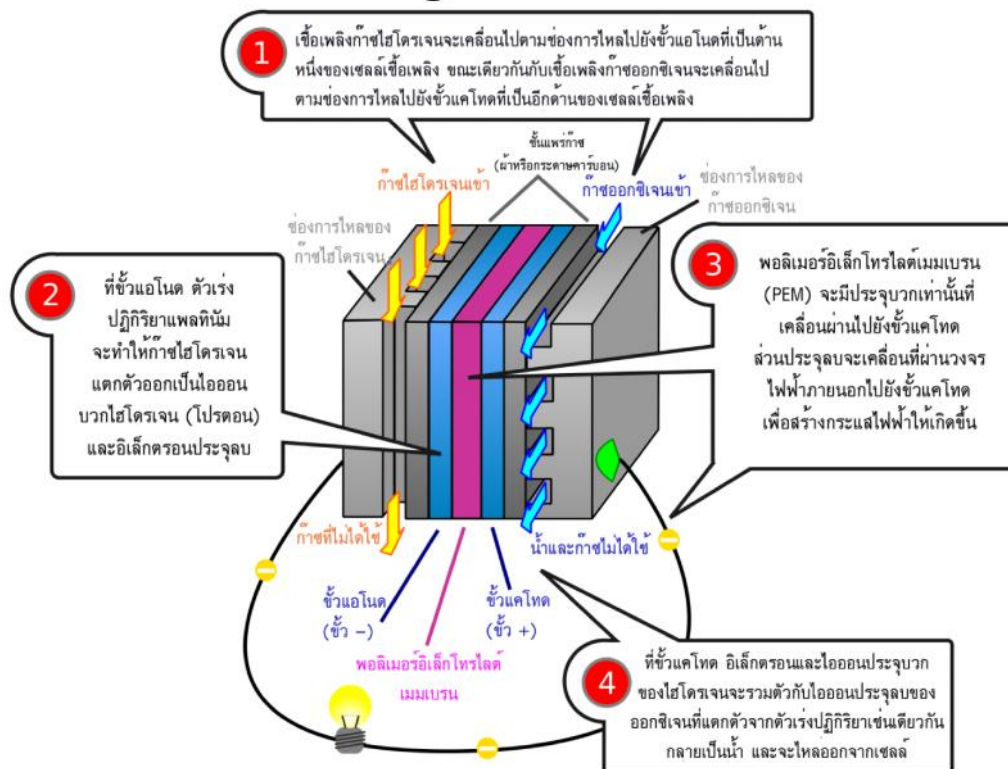
ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	Alkaline Fuel Cell (AFC)	Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
ข้อดี	<ul style="list-style-type: none"> • กัดกร่อนน้อย ระบบดูแลง่าย • อุณหภูมิต่ำ • เริ่มทำงานได้รวดเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> • ปฏิกริยาที่ช้า แคโทดเกิดเร็วมี ประสิทธิภาพสูง • อุปกรณ์มีค่าใช้จ่ายต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> • อุณหภูมิที่สูง จึงได้พลังงาน ความร้อนด้วย • ทนทานต่อสิ่งสกปรก 	<ul style="list-style-type: none"> • ประสิทธิภาพสูง • ใช้เชื้อเพลิงและตัวเร่งปฏิกริยาได้หลากหลาย 	<ul style="list-style-type: none"> • ประสิทธิภาพสูง • ใช้เชื้อเพลิงและตัวเร่งปฏิกริยาได้หลากหลาย • ประยุกต์ใช้ระบบผสมได้
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> • ตัวเร่งปฏิกริยา ราคาแพง • ไวต่อสิ่งสกปรกในเชื้อเพลิง • สูญเสียความร้อน 	<ul style="list-style-type: none"> • ไวต่อ CO₂ ในเชื้อเพลิงและอากาศ • การควบคุมอิเล็กโทรไลต์ยาก 	<ul style="list-style-type: none"> • ตัวเร่งปฏิกริยา ราคาแพง • เริ่มทำงานช้า • พลังงานและกระแสต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> • ที่อุณหภูมิสูง จะกัดกร่อนและแตกหักง่าย • เริ่มทำงานช้า • เริ่มทำงานช้า • พลังงานต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> • ที่อุณหภูมิสูง จะกัดกร่อนและแตกหักง่าย • เริ่มทำงานช้า • มีข้อจำกัดเรื่อง การควบคุมและอายุการใช้งาน

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็มหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากใช้งานง่าย ให้ความหนาแน่นพลังงานสูง น้ำหนักเบาและปริมาตรน้อยเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น โดยต้องการไฮโดรเจน ออกซิเจนจากอากาศ และน้ำเท่านั้นในการทำงาน ไม่ต้องใช้กรดหรือด่างเหมือนเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิด เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 80 องศาเซลเซียส ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเริ่มต้นได้อย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ในระบบเล็กหรือน้อย ช่วงอายุการใช้งานนาน [6] แต่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกริยาจำพวกโลหะมีตระกูลทำให้มีราคาแพง และมีความว่องไวต่อคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ดังนั้นจึงต้องใช้เตาปฏิกริรณ์เพิ่มขึ้นเพื่อลดคาร์บอนมอนนอกไซด์ในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ผลิตจากแอลกอฮอล์ หรือเชื้อเพลิงสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอน ทำให้ราคาเพิ่มขึ้นอีก ปัจจุบันนักพัฒนากำลังคิดค้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม/รูทีเนียมที่มีความทนทานต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

Proton exchange membrane fuel cell

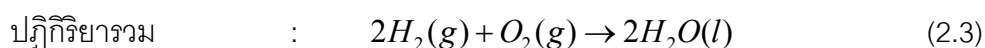
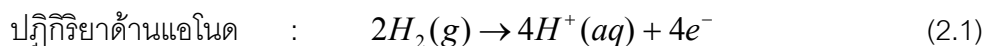


ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [7]

2.2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [7-11]

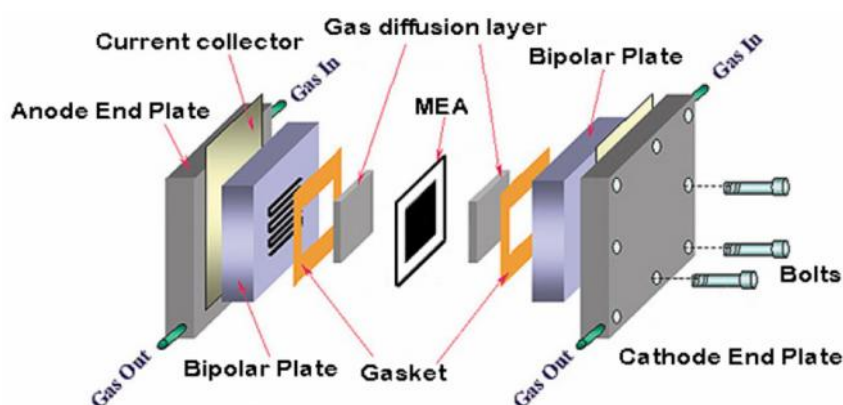
หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.2 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่มีความพรุน 2 ขั้ว คือ แอโนด (Anode) และ แคโทด (Cathode) ประกบติดกับเมมเบรน โดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนซึ่งทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงเข้าทางขั้วแอโนดและป้อนแก๊สออกซิเจนซึ่งทำหน้าที่เป็นสารออกซิแดนซ์เข้าทางขั้วแคโทด ที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ของไฮโดรเจนได้เป็นอิเล็กตรอนและโปรตอน ดังสมการที่ 2.1 อิเล็กตรอนที่ได้วิ่งผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอกมายังขั้วแคโทดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในขณะที่โปรตอนที่ได้แพร่ผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด ที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ระหว่างโปรตอนและอิเล็กตรอนที่ได้รับมาจาก

ขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและความร้อน ดังสมการที่ 2.2 โดยมีปฏิกิริยารวม แสดงดังสมการที่ 2.3



2.2.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์

เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ประกอบด้วย 6 ส่วนหลักๆ ที่สำคัญ คือ ชั้นแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer, GDL) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) อิเล็กโทรไลต์ หรือเมมเบรน แผ่นช่องการไหลของแก๊ส (Flow field plate) แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate) และ วัสดุกันรั่ว (Seal)



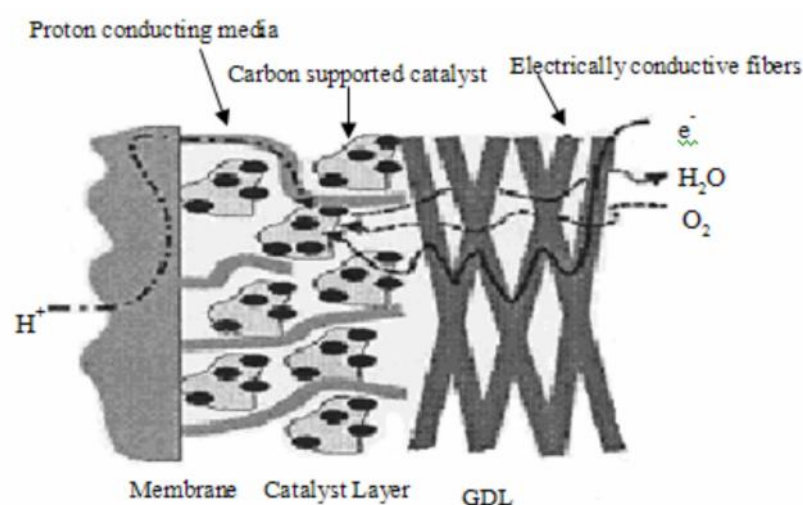
ภาพที่ 2.3 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ [16]

2.2.2.1 ชั้นแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer, GDL) [10, 11]

เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ทำหน้าที่เป็นเส้นทางผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงจากช่องการไหลของแก๊ส (Flow field channel) ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ติดกันและเป็นเส้นทางผ่านสำหรับน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น บริเวณชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ออกไปยังช่องทางการไหลของแก๊ส เป็นตัวนำไฟฟ้าเพื่อนำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า อีกทั้งยังช่วยส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นจาก

ปฏิกิริยาจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องทางไหลของแก๊ส เพื่อระบายความร้อนออกจากเซลล์ นอกจากนี้ยังเป็นตัวรองรับเชิงกล (Mechanical support) เพื่อป้องกันการซบเซาของชั้นระหว่างขั้ว อิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนกับช่องทางไหลของแก๊ส

ชั้นแพร่ของแก๊สที่ดีต้องมีสมบัติดังนี้ คือ สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความเป็นรูพรุนสูง แต่เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีขนาดอนุภาคเล็กจึงไม่ควรใช้ชั้นแพร่แก๊สที่มีขนาดของรูพรุนสูงเกินไป และต้องมีความแข็งแรงพอที่สามารถช่วยให้เอ็มอีเอใช้งานได้ดีและมีความยืดหยุ่นเพียงพอในการรักษาสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีไว้ได้



ภาพที่ 2.4 ถ่ายอินดิเล็คตรอนและไอออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา เมมเบรน และชั้นแพร่แก๊ส[11]

2.2.2.2 ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) [12]

ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนที่สัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์โดยตรง จึงเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีควรมีความหนาแน่น เพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์จากแพลทินัมได้มากที่สุดและเป็นการลดระยะทางของแก๊สเชื้อเพลิง อิเล็กตรอนและโปรตอน ที่เคลื่อนที่เข้าไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารต่ำ เพื่อให้แก๊สเชื้อเพลิงเคลื่อนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้เพียงพอ นำไฟฟ้าและไอออนได้ดี มีพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาของแพลทินัมสูง โดยมีปริมาณแพลทินัมน้อยที่สุดเท่าที่สามารถใช้งานได้เพื่อเป็นการลดต้นทุน

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นพวกโลหะมีตระกูล (Noble metal) เช่น แพลทินัม (Pt) แพลเลเดียม (Pd) หรือ นิกเกิล (Ni) เป็นต้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมในเซลล์เชื้อเพลิงฟUEL CELL

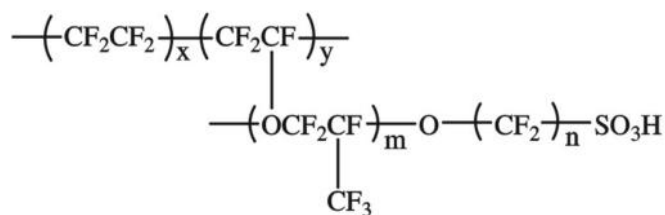
ที่สุด คือ แพลทินัม (Pt) เนื่องจากแพลทินัมมีความทนทานต่อการกัดกร่อนและมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น แต่แพลทินัมนี้มีราคาแพง และไม่สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้แม้ว่ามีปริมาณที่น้อยมากในระดับพีพีเอ็ม ทำให้การศึกษาและพัฒนาการใช้แพลทินัมอัลลอยด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากช่วยลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

2.2.2.3 อิเล็กโทรไลต์ หรือเมมเบรน [11]

เมมเบรนที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม คือ เมมเบรนเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิค (Perfluorosulfonic membrane) หรือชื่อทางการค้าคือ เนฟิออนเมมเบรน (Nafion membrane) ซึ่งโครงสร้างของเมมเบรนชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 2.5 โดยเมมเบรนที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีการนำประจุได้ดี แต่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า มีความยืดหยุ่นแม้อยู่ในภาวะที่แห้ง แข็งแรงสามารถรับแรงได้พอสมควร ยอมให้น้ำแพร่ผ่านข้ามเมมเบรนได้ดี แต่ไม่ยอมให้แก๊สซึมผ่าน ทนทานต่อสารเคมี และมีความเสถียรต่อความร้อนและการควบคุมน้ำให้มีปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งเนฟิออนเมมเบรนแต่ละชนิดมีขนาดและความหนาที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดและความหนาของเมมเบรนชนิดต่างๆ [11]

โครงสร้าง	ชื่อทางการค้า	น้ำหนักมวลโมเลกุล	ความหนา (ไมโครเมตร)
m=1, x=5-13.5, n=2, y=1	DuPont		
	Nafion 120	1200	260
	Nafion 117	1100	175
	Nafion 115	1100	125
	Nafion 112	1100	80
m=0, n=2-5, x=1.5-14	Asashi Chemicals		
	Aciplex-S	1000~1200	25~100
m=0, n=2, x=3.6-10	Dow Chemical		
	Dow	800	125



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของเนฟลอนเมมเบรน [11]

เมมเบรนที่เหมาะสมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ควรมีสมบัติดังนี้

- สามารถนำประจุได้ดี และมีความแข็งแรงสามารถรับแรงได้พอสมควร
- มีมวลโมเลกุลสูงหรือเป็นพอลิเมอร์สายยาว เพราะจะทำให้ละลายน้ำได้ยาก และทนทานต่อสารเคมีได้ดี ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนได้
- การถ่ายโอนน้ำควรจะทำได้น้อยเพื่อป้องกันไม่ให้เมมเบรนด้านใดด้านหนึ่งเกิดแห้งเกินไปการที่เมมเบรนแห้งจะส่งผลทำให้การนำประจุลดลง หรือไม่ก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างจนทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเมมเบรนกับขั้วอิเล็กโทรดลดลงและหากปล่อยให้แห้งมากเกินไปก็อาจทำให้เกิดเชื้อเพลิงเข้าทำปฏิกิริยากันโดยตรงได้
- ยอมให้น้ำแพร่ผ่านข้ามเมมเบรนได้ดี เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในเมมเบรนและเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเมมเบรนแห้ง
- ยอมให้แก๊สซึมผ่านได้น้อย หรือไม่ยอมให้แก๊สซึมผ่านเลย เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น และจะช่วยป้องกันการทำปฏิกิริยากันโดยตรงระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและแก๊สที่เป็นตัวออกซิไดซ์
- ดูดซับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะโดยเมมเบรนสามารถขับน้ำออกจากแผ่นได้เมื่อมีปริมาณน้ำมาก และดูดซับเก็บไว้ภายในได้เมื่อมีปริมาณน้ำภายในเมมเบรนน้อย
- ผิวหน้าที่เป็นบริเวณแลกเปลี่ยนประจุต้องเรียบพอที่จะให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเมมเบรนกับขั้วอิเล็กโทรดมากมีพื้นที่มาก ๆ

2.2.2.4 แผ่นช่องการไหลของแก๊ส (Flow field plate)

แผ่นช่องการไหลของแก๊ส (Flow field plate) โดยปกติจะทำด้วยแกรไฟต์ (Graphite) หรือวัสดุอื่น เช่น แกรไฟต์ พอลิเมอร์ผสมโลหะ เป็นต้น มีลักษณะเป็นร่องเพื่อเป็นช่องการไหลของแก๊ส และทำหน้าที่นำอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นออกจากระบบ จึงต้องมีสมบัติในการนำอิเล็กตรอนและความ

ร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนและสามารถทนต่อภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Unipolar plate) และแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Stack cell)

2.2.2.5 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate)

แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate) มีหน้าที่ในการนำอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากแผ่นช่องการไหลของแก๊ส (Flow field plate) จากเข้าสู่แหล่งพลังงานซึ่งจะมีด้วยกันอยู่ทั้งสองด้านของเซลล์เชื้อเพลิง โดยทั่วไปจะทำจากโลหะผสมที่มีคุณสมบัติในการนำอิเล็กตรอนได้ดี

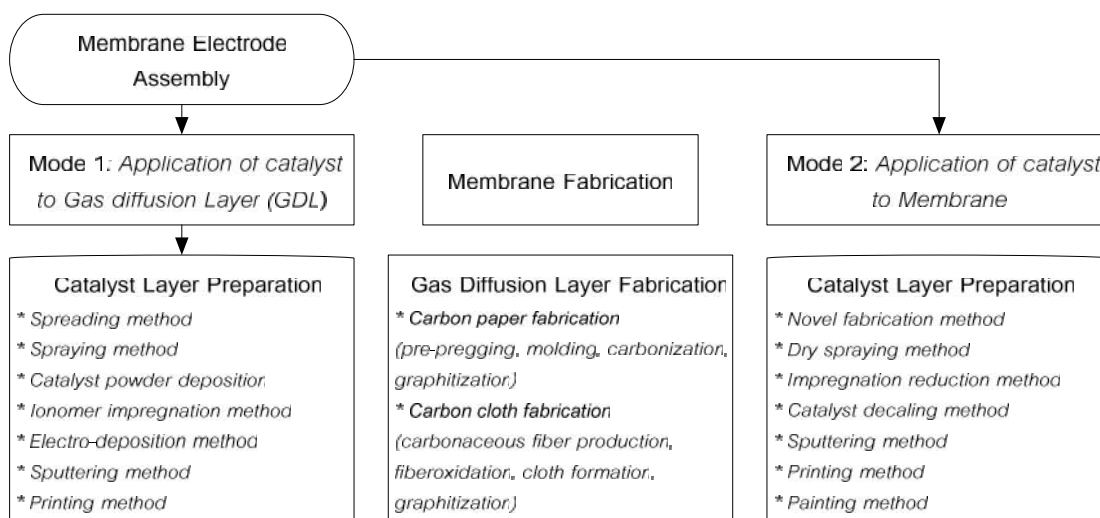
2.2.2.6 วัสดุกันรั่ว (Seal)

วัสดุกันรั่วทั่วไปจะทำจากยางซิลิโคน ซึ่งมีคุณสมบัตินี้ดีกว่าวัสดุที่ใช้ ทนแรงอัดได้ดี และไม่มีผลต่อปฏิกิริยา หน้าที่หลักๆเป็นตัวช่วยในการประกบระหว่างแผ่นช่องทางการไหลยึดติดกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้ารวมกัน ป้องกันการรั่วไหลของแก๊สทั้งสองด้าน และช่วยกระจายแรงกดที่เกิดขึ้นในตัวเซลล์เชื้อเพลิง

2.3 การเตรียมเอมีเอ [16]

เอมีเอ คือ ส่วนผสมระหว่างเมมเบรน ขั้วไฟฟ้า และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบรวมกันขึ้น การเตรียมเอมีเอสามารถเตรียมได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีองค์ประกอบและขั้นตอนการเตรียมที่แตกต่างกัน ทำให้เอมีเอที่เตรียมได้มีสมบัติแตกต่างกัน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง วิธีการเตรียมเอมีเอ โดยแบ่งการเตรียมเป็น 2 วิธี คือ

- การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร์แก๊สแล้วจึงนำไปประกบกับเมมเบรน
- การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนเมมเบรนแล้วจึงประกบกับชั้นแพร์แก๊ส



ภาพที่ 2.6 การเตรียม Membrane Electrode Assembly (MEA) [16]

ในปัจจุบันนี้การเตรียมขั้วไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ต้องการและทักษะความชำนาญในการเตรียม วิธีที่นิยมใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า เช่น การสเปรย์ (Spray) การระบาย (brushing) การพิมพ์ (Printing) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีขั้นตอนการเตรียมและองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป โดยลักษณะการเตรียมและองค์ประกอบของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมจะมีผลต่อคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ได้ เช่น ความหนา ความพรุน การนำกระแสไฟฟ้าและความต้านทาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวล้วนมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

2.3.1 การสเปรย์

เป็นวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยการพ่นสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร์แก๊สหรือแผ่นรองรับ สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในวิธีการสเปรย์จะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กและผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่ก็ได้ อาจเป็นกระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอนก็ได้ ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยการสเปรย์ เริ่มจากการนำผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับตัวทำละลายและส่วนผสมอื่น กวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปพ่นบนตัวรองรับ เมื่อตัวทำละลายระเหยออกทำให้ผงตัวเร่งปฏิกิริยาจับกับแผ่นรองรับ หลังจากนั้นนำไประเหยให้แห้ง ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีนี้คือ ความหนืด (Viscosity) ของสารผสมก่อนการสเปรย์และระยะเวลาในการแห้ง (Drying time) ของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3.2 การระบาย

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยวิธีการระบายนี้ จะเริ่มจากการผสมตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวทำละลายและสารเคมีอื่นๆ เช่นเดียวกับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยการสเปรย์ แต่สารผสมจะต้องมีความหนืดสูงกว่าการสเปรย์ และต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำสารผสมไประบายบนแผ่นรองรับด้วยแปรงหรือแม่พิมพ์ แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่ก็ได้ แผ่นรองรับที่นิยมใช้ได้แก่ กระจกคาร์บอน ฝ้ายคาร์บอน เป็นต้น ถ้ามีการใช้แผ่นรองรับชั่วคราวจะมีชั้นแพร่ (Diffusion layer) เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงและรักษาระดับน้ำในเซลล์ แต่ถ้าไม่ใช้แผ่นรองรับหรือใช้แผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุน เมื่อทำการอัดตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ากับเยื่อแผ่นจะต้องนำแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนออก โดยทั่วไปแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นพวกพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอน

2.3.3 การพิมพ์เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยานั้น จะต้องมีความหนืดและแรงตึงผิวใกล้เคียงกับหมึกพิมพ์ทางการค้า มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะใส่ลงในตลับหมึกพิมพ์และติดตั้งลงในเครื่องพิมพ์ จากนั้นดำเนินการพิมพ์หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่นรองรับ เช่น กระจกคาร์บอน ฝ้ายคาร์บอน หรือเยื่อแผ่นอิเล็กโทรไลต์ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพิมพ์สามารถควบคุมรูปร่างและความสม่ำเสมอของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี

2.3.4 การถ่านไอออโนรูปลอก

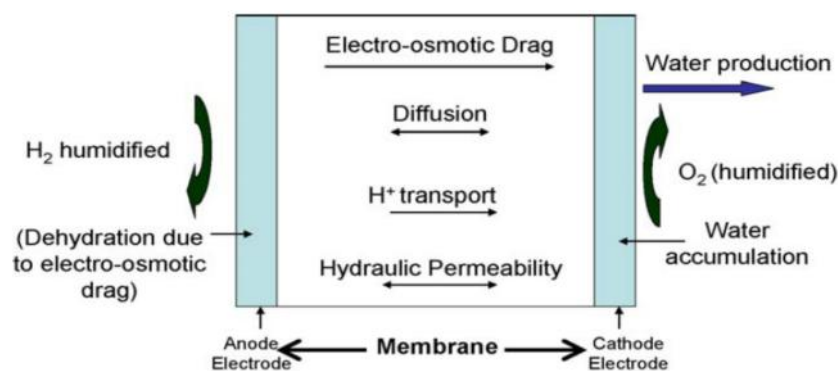
การถ่านไอออโนรูปลอก เป็นการสร้างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีอื่นๆมาก่อน หลังจากนั้นจึงนำชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามาถ่านไอออนลงบนเมมเบรน ซึ่งการถ่านไอออโนรูปลอกนั้นต้องคำนึงปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น ความดัน อุณหภูมิ เวลาในการป้อนอัด ฯลฯ ซึ่งปัจจัยจะขึ้นกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการถ่านไอออโนรูปลอกทั้งหมด ทั้งปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของสารละลายที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การแห้งของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้บนเทฟลอน

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.4.1 ปริมาณน้ำ [17, 18]

ประสิทธิภาพในการนำโปรตอนของเมมเบรนขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในเมมเบรน ซึ่งโดยปกติเมมเบรนต้องชุ่มน้ำตลอดเวลาเพื่อให้เป็นตัวพาโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด การนำโปรตอนนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณของน้ำมากเกินไปที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับเมมเบรนส่งผลให้ขั้วอิเล็กโทรดถูกน้ำท่วม (Flooding) โดยน้ำเข้าไปอุดตันรูพรุนบนขั้วอิเล็กโทรด ทำให้แก๊สแพร่ผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง แต่ถ้ามีปริมาณของน้ำน้อยเกินไป ทำให้เมมเบรนแห้ง เกิดความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและอาจเกิดการแตกออกของเมมเบรน ทำให้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากันโดยตรง ทำให้เกิดความร้อนสูง ส่งผลให้เซลล์ถูกทำลายได้ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการน้ำในระบบให้เหมาะสมเพื่อให้มีความสามารถในการนำโปรตอนได้ดี โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของน้ำที่เกิดขึ้นจากทุกกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ [21]

จากภาพเห็นว่าน้ำอยู่ในเซลล์เชื้อเพลิงในหลายๆ ส่วนด้วยกัน ซึ่งปริมาณน้ำที่มีอยู่นั้นเกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด กระบวนการให้ความชื้น (Humidification) ของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่เซลล์ อีกทั้งยังเกิดจากปรากฏการณ์ที่น้ำถูกพาจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดหรือที่เรียกว่า Electro-osmotic drag ซึ่งเมื่อทำงานไปสักระยะหนึ่งทำให้ปริมาณน้ำที่ขั้วแคโทดสูงมากขึ้น ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองมีปริมาณน้ำแตกต่างกัน ทำให้เกิดการแพร่ย้อนกลับของน้ำจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด หรือที่เรียกว่า Back diffusion แต่การแพร่ของน้ำภายในเซลล์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้ง

สองขึ้นอยู่กับความหนาของเมมเบรน โดยเมมเบรนที่บางต้องการน้ำหรือความชื้นน้อยกว่าเมมเบรนที่หนา และความสมดุลของปริมาณความชื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง น้ำส่วนเกินภายในเซลล์เชื้อเพลิงถูกกำจัดออกจากเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยการระเหยและออกไปพร้อมกับสารตั้งต้นที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

2.4.2 คุณสมบัติการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [22, 23]

คุณสมบัติการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิสูง ทำให้ค่าโพลาริเซชันทางเคมีลดลงที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับค่าคงที่ค่าหนึ่งของปฏิกิริยานั้นๆ ตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

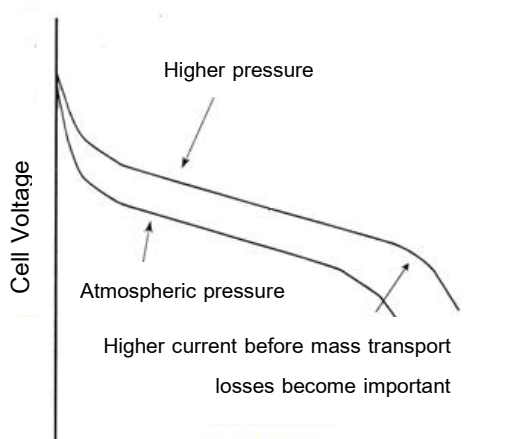
$$k = Ae^{\frac{E_a}{RT}} \quad (2.4)$$

เมื่อ k	คือ	ค่าคงที่อัตรา
A	คือ	ค่าคงที่ของการชนกันของโมเลกุล (แฟกเตอร์ของอาร์เรเนียส)
E_a	คือ	พลังงานก่อกัมมันต์ (จูลต่อโมล)
R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน)
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

จากสมการที่ 2.4 พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูง ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงมีพลังงานจลน์ (Kinetic energy) สูง เกิดการชนกันของโมเลกุลทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูงกว่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์ดีขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิการทำงานสูงมากเกินไปส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำที่บริเวณเมมเบรนภายในเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ขาดความสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง และค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงควรใช้อุณหภูมิให้เหมาะสมกับความสามารถในการทำงานสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มสามารถทำได้

2.4.3 ความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ [2-3, 24]

จากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มขนาดเล็กสามารถทำงานที่ความดันบรรยากาศจึงมีผลต่อประสิทธิภาพน้อย แต่ในเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 10 กิโลวัตต์ หรือใหญ่กว่าอาจต้องใช้ความดันสูงในการทำงาน เนื่องจากการใช้ความดันสูงทำให้เกิดการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินในการก่อกัมมันต์ (Activation over voltage) ที่ขั้วแคโทด ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าแรงดันวงจรเปิดสูงขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานอิสระกิบส์ นอกจากนี้ยังทำให้ค่าโวลตาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นลดลงดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ผลกระทบของการเพิ่มความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า [25]

การเพิ่มความดันแก๊สโดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สที่เป็นสารออกซิแดนซ์มีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ของเซลล์มีค่ามากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$\Delta E_{cell} = \left(\frac{RT}{2F} \right) \ln \left(\frac{P''}{P'} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ	ΔE_{cell}	คือ	ค่าความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น (โวลต์)
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่า 8.314 (จูลต่อโมล-เคลวิน)
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
	F	คือ	ค่าคงที่ฟาราเดย์ มีค่า 96,485 (คูลอมบ์ต่อโมล)
	P''	คือ	ค่าความดันสุดท้าย (บาร์)
	P'	คือ	ค่าความดันเริ่มต้น (บาร์)

จากสมการที่ 2.5 พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์มีความดันสูง (มีค่าอยู่ในช่วง 300-500 กิโลปาสกาล) ทั้งแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน แต่ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิแดนต์ การใช้ความดันสูงสามารถช่วยลดปัญหาในการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้ เนื่องจากเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิแดนต์ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณขั้วอิเล็กโทรดลดลงเร็วกว่าการใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดมากกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

2.4.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา [26]

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์เช่นเดียวกัน เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงนั้นไม่เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนเป็นไอออนที่อุณหภูมิปกติ จึงต้องมีตัวกระตุ้นให้เกิดการแตกตัว เช่น การเพิ่มอุณหภูมิหรือการเติมสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดพลังงานกระตุ้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ต้องเลือกให้มีความว่องไวและเหมาะสมต่อระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมากที่สุด โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย

2.5 กราฟโพลาไรเซชัน (Polarization curve)

โพลาไรเซชัน (Polarization) คือการลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งค่าความต่างศักย์ตามทฤษฎีของกระบวนการที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิงจะมีค่าประมาณ 1.229 โวลต์ โดยการเกิดโพลาไรเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.6

$$E_{cell} = E^0_{cell} - |\mathcal{E}_c| - |\mathcal{E}_a| - IR \quad (2.6)$$

โดยที่

E^0_{cell} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน

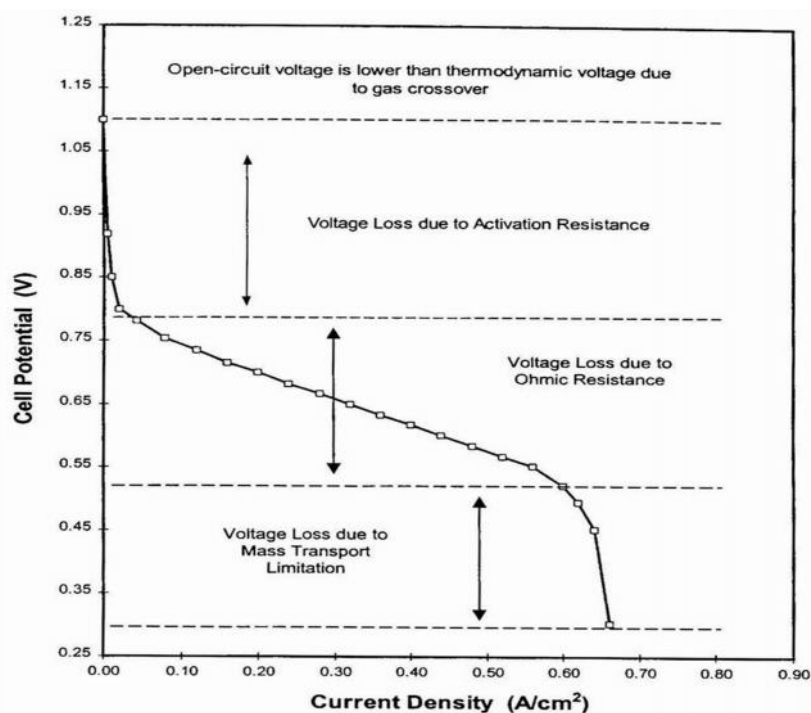
\mathcal{E}_c คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด (Cathode overpotential)

\mathcal{E}_a คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด (Anode overpotential)

IR คือ เทอมของศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดจากความต้านทานในเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมาเขียนกราฟจะทำให้ได้กราฟที่ชื่อว่ากราฟโพลาริเซชันดังแสดงในภาพที่ 2.9

จากกราฟภาพที่ 2.9 จะพบว่าในช่วงที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open-circuit potential) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านเมมเบรนจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด หรืออาจเกิดจากการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (Crossover) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเมมเบรน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งหนึ่งจะเกิดการเกิดปฏิกิริยากับผิวขั้วไฟฟ้า ตัวอย่างเช่นเมื่อแก๊สไฮโดรเจนแพร่ข้ามไปยังขั้วแคโทดก็เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นประกอบกับฝั่งขั้วแคโทดมีแก๊สออกซิเจน จึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันภายในขั้วแคโทดเดียวกัน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าภายใน (Internal current) ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินขึ้นที่ขั้วแคโทดเช่นเดียวกันกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของออกซิเจนก็จะเกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดจึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง กราฟโพลาริเซชันนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่



ภาพที่ 2.9 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซล [27]

2.5.1 โพล่าไรเซชันทางเคมี (Chemical Polarization)

โพล่าไรเซชันทางเคมีหรือการสูญเสียเชิงแอคติเวชัน (Activation losses) เป็นค่าโพล่าไรเซชันที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องมาจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และความดัน ส่วนจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะเกิดโพล่าไรเซชันในทางเคมีมาก การลดค่าโพล่าไรเซชันทางเคมีสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

2.5.2 โพล่าไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization)

โพล่าไรเซชันเนื่องจากความต้านทานหรือความต้านทานโอห์มมิก (Ohmic resistance) เป็นค่าโพล่าไรเซชันที่เกิดจากความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านขั้วอิเล็กโทรดและแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า รวมกับค่าความต้านทานของการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเมมเบรน การลดค่าโพล่าไรเซชันชนิดนี้ทำได้โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผงคาร์บอน และตัวสะสมกระแสไฟฟ้าที่มีค่าการนำกระแสไฟฟ้าสูงๆ และใช้อิเล็กโทรไลต์ที่บางเพื่อลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอนหรือเพิ่มค่าความชื้นในอิเล็กโทรไลต์

2.5.3 โพล่าไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization)

โพล่าไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นหรือความต้านทานจากการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer resistance) เป็นค่าโพล่าไรเซชันที่เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการแพร่ของแก๊สเชื้อเพลิงเข้าไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นควบคุมปฏิกิริยา (Rate controlling step) เพราะแก๊สเชื้อเพลิงที่เข้าไปถึงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกใช้ไปรวดเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงแพร่ผ่านชั้นต่าง ๆ เข้าไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยาส่งผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้างดลง

2.6 ผลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อตัวเร่งปฏิกิริยา [28-30]

โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็มใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ส่วนใหญ่ได้มาจากกระบวนการรีฟอร์มมิงของแก๊สธรรมชาติและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดย

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้มักมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ปนอยู่ ทำให้ได้แก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูงมากนัก ถ้านำแก๊สไฮโดรเจนที่ได้นี้มาเข้าสู่ระบบของเซลล์เชื้อเพลิง มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก เนื่องจากโลหะแพลทินัมไม่สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีปริมาณมากกว่า 10 พีพีเอ็ม แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง [28-30] แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นดูดซับอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ที่ภาวะมาตรฐานไฮโดรเจน (V/SHE) ในทางทฤษฎีคาร์บอนมอนอกไซด์จึงควรถูกกำจัดออกจากผิวตัวเร่งปฏิกิริยาตามการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนที่ศักย์ไฟฟ้านี้ แต่เนื่องจากการดูดซับอย่างแข็งแรงของคาร์บอนมอนอกไซด์บนโลหะแพลทินัม ทำให้กำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก [53] ส่งผลให้ปริมาณแพลทินัมที่เร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนลดลง เนื่องจากมีคาร์บอนมอนอกไซด์ยึดเกาะแพลทินัมไปขัดขวางการดูดซับของไฮโดรเจน

การดูดซับของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบ [29] คือ

- การดูดซับแบบ Linearly bonded เกิดการดูดซับของคาร์บอนมอนอกไซด์ 1 โมเลกุลบนบริเวณพื้นผิวของโลหะแพลทินัม 1 ตำแหน่ง แสดงดังสมการที่ 2.7
- การดูดซับแบบ Bridge-bonded คาร์บอนมอนอกไซด์ 1 โมเลกุลต้องการพื้นผิวของโลหะแพลทินัมในการดูดซับ 2 ตำแหน่ง ดังสมการที่ 2.8



นอกจากนี้ยังมีผลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปนอยู่ในแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิง ซึ่งโดยปกติการมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 25 นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อเซลล์เชื้อเพลิง แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปนอยู่สามารถเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมได้ ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10 ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยไปลดปฏิกิริยาการดูดซับของแก๊สไฮโดรเจนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในด้านขั้วแอโนดเช่นกัน



2.7 การกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากแก๊สเชื้อเพลิง [31-35]

เนื่องจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นมีส่วนทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเป็นอย่างมาก จึงมีความจำเป็นที่ต้องหาทางกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งวิธีการกำจัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

- ปรับปรุงรีฟอร์มเมอร์ (reformer) ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

โดยทั่วไปรีฟอร์มเมอร์ส่วนใหญ่ผลิตไฮโดรเจนโดยมีคาร์บอนมอนอกไซด์เจือปนอยู่ปริมาณ 50 พีพีเอ็มหรือน้อยกว่า จึงได้มีการออกแบบรีฟอร์มเมอร์ชนิดใหม่ให้มีส่วนประกอบภายในกระบวนการ เช่น ชิฟท์ คอนเวอร์เตอร์ (Shift convertor), ซีเล็กทีฟออกซิไดเซอร์ (Selective oxidizer) ที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งวิธีนี้มีความยุ่งยากซับซ้อนและทำให้ราคาสูงขึ้น อีกทั้งถึงแม้ทำการปรับปรุงรีฟอร์มเมอร์แล้วนั้นยังคงยากสำหรับการควบคุมให้มีคาร์บอนมอนอกไซด์ปริมาณน้อยได้ในขณะเริ่มต้นทำงาน

- การเพิ่มอากาศเข้าไปภายในเชื้อเพลิงที่ทำการป้อน

วิธีการนี้ใช้สำหรับระบบที่มีอากาศเข้าไปเชื้อเพลิงน้อยกว่าร้อยละ 2 โดยแก๊สออกซิเจนที่อยู่ในอากาศที่เพิ่มเข้าไปนั้นช่วยลดระดับคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ โดยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งลดลงได้โดยการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาเปลี่ยนแก๊สเป็นน้ำ (Water gas shift reaction)

- การปรับปรุงโครงสร้างทางด้านแอโนดให้เป็นสองชั้น

เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็มมีความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการปรับปรุงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การทำเป็นคอมพอสิต (Composite) หรือการทำชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาสองชั้น (Double-layer) โดยออกแบบให้คาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีในชั้นแรกซึ่งแยกออกจากชั้นของการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนกับตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ไม่เข้าไปบดบังการดูดซับของไฮโดรเจน

- **ให้เซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิสูง**

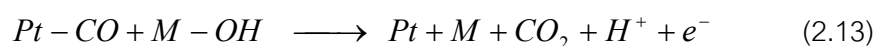
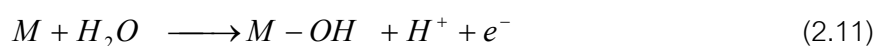
การเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ให้สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ทำให้มีประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นและช่วยปรับปรุงความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม โดยทำให้การปกคลุมของคาร์บอนมอนอกไซด์บนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง แต่วิธีนี้มีผลเสียต่อเมมเบรนโดยตรง โดยทำให้ระยะเวลาการใช้งานของเมมเบรนลดลง

- **การใช้เมมเบรนในการแยกแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์**

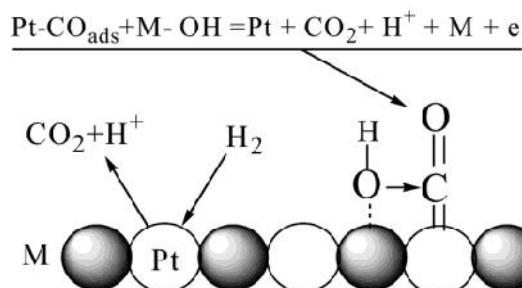
เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิสูงนั้นทำให้อายุการใช้งานของเมมเบรนลดลงและการควบคุมให้เมมเบรนชุ่มชื้นทำได้ยาก จึงได้มีการพัฒนาให้เมมเบรนสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ โดยการไปเมมเบรนด้วยพอลิเบนซิมิดาโซล (Polybenzimidazole) ช่วยให้เมมเบรนมีความเสถียรทางเคมีและเชิงกลที่อุณหภูมิสูง แต่ยังคงมีปัญหาเกี่ยวกับอายุการใช้งานและการจัดการน้ำ นอกจากนี้ยังมีการใช้เมมเบรนในการแยกไฮโดรเจนออกจากแก๊สผสม เช่น แพลเลเดียมเมมเบรน (Palladium membrane) แต่ยังมีราคาแพงสำหรับการนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง

- **การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์**

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้และทำการศึกษากันอย่างมาก เนื่องจากวิธีนี้ให้ประสิทธิภาพที่ดีและก่อให้เกิดปัญหาต่อเซลล์เชื้อเพลิงน้อย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอัลลอยด์ ซึ่งโลหะชนิดที่สองที่นำมาใช้มีส่วนช่วยให้เกิดการออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความต่างศักย์ต่ำกว่าแพลทินัม เนื่องจากหมู่ไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำที่อยู่ในเมมเบรนหรือไอน้ำในหม้อความชื้น ดูดซับอยู่บนผิวของโลหะชนิดที่สองนี้เกิดเป็น M-OH ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของออกซิเจนที่ใช้สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ดูดซับอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม จึงช่วยกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า Bifunctional effect โดยการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังสมการที่ 2.11-2.13 และภาพที่ 2.11



โดย M คือ โลหะชนิดที่สอง เช่น รูทีเนียม (Ru) แพลเลเดียม (Pd) ดีบุก (Sn) เหล็ก (Fe) เป็นต้น



ภาพที่ 2.10 กลไกการเกิดออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ [3]

นอกจากนี้โลหะชนิดที่สองที่นำมาใช้ ยังมีส่วนช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของแพลทินัมจากการเหนี่ยวนำของอะตอมของรูทีเนียมและโลหะอื่นๆ เพื่อช่วยปรับปรุงกระบวนการดูดซับของแพลทินัม ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเรียกรวมการเกิดปรากฏการณ์นี้ว่า Electronic effect การเกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าส่งผลต่ออันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งที่ว่าง 5d (5d band vacancies) ของแพลทินัม ทำให้ไม่มีอิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง 5d ของแพลทินัม ส่งผลให้พันธะระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับแพลทินัมอ่อนลง พลังงานในการดูดซับของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง การปกคลุมของคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจึงน้อยลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันของไฮโดรเจนดีขึ้น

โลหะชนิดที่สองที่นำมาใช้ควบคู่กับโลหะแพลทินัมในรูปแบบของอัลลอยด์หรือการพอกพูนร่วมมีหลายชนิด เช่น รูทีเนียม (Ru) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) เหล็ก (Fe) แพลเลเดียม (Pd) เป็นต้น ซึ่งโลหะที่ได้รับความสนใจในการศึกษาอย่างมาก คือ โลหะรูทีเนียม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้โลหะแพลทินัมและรูทีเนียม ในการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีเอ็เอ็มทางด้านแอโนดต่อไป

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Towne และคณะ [36] ศึกษาการพิมพ็อกเก็ตของตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนเนฟิออน 117 พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ได้มีความเป็นขั้นอย่างดี มีความคงตัว ทนต่อการกัดกร่อน และไม่จำเป็นต้องก่ร้อน เมื่อนำไปทดสอบที่ความต่างศักย์ 0.87 โวลต์ ให้ความหนาแน่นกระแส

(power density) 155 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนคาร์บอน 0.20 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งให้ความหนาแน่นกระแสสูงกว่าการเตรียมแบบดั้งเดิมร้อยละ 7 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ตจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

Taylor และคณะ [37] ศึกษาการพิมพ์อิงก์เจ็ตของตัวเร่งปฏิกิริยาของบนชั้นแพร่แก๊ส (Gas Diffusion layer) แล้วกดร้อนเพื่อผลิตเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ และเปรียบเทียบกับวิธีการสเปรย์ด้วยมือ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมร้อยละ 20 โดยน้ำหนักบนตัวรองรับคาร์บอน ปริมาณ 0.5 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมมเบรนเนฟลอน 117 เป็นอิเล็กโทรไลต์พบว่า การพิมพ์อิงก์เจ็ตให้ความหนาแน่นกระแส 426 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าการสเปรย์ที่ให้ความหนาแน่นกระแสเพียง 387 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Yu และคณะ [38] ศึกษาผลของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อขั้วแอโนดในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบแพลทินัมรูทีเนียมบนคาร์บอน (PtRu/C) และแพลทินัมบนคาร์บอน (Pt/C) ซึ่งมี PtRu/C เป็นชั้นนอกสำหรับกรองและออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ ผลการทดสอบคาร์บอนมอนอกไซด์ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงของตัวเร่งปฏิกิริยา PtRu/C เป็นชั้นกรองมีความสามารถในการทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C ดังนั้นการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชั้นจึงเป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ได้

Saha และคณะ [39] ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C บนเมมเบรนด้วยวิธีการถ่ายโอนรูปผลึก โดยสเปรย์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายในสารละลายอินทรีย์และเชื่อมกับสารละลายเนฟลอนบนแผ่นเทฟลอน จากนั้นจึงนำแผ่นเทฟลอนไปกดร้อนลงบนเมมเบรน และศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการกดร้อน พบว่าที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ความดัน 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 8 นาที ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาติดอยู่บนเมมเบรนเกือบทั้งหมด เมื่อทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสองกราดและ cyclic voltammetry พบว่ามีรูพรุนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามาก เมื่อนำไปทดสอบสมรรถนะที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ จะให้ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 650 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เทียบเป็นกำลังเท่ากับ 0.22 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Wee และคณะ [40] ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวกับความเป็นพิษของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่ขั้วแอโนด โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ถือเป็น

หนึ่งในปัญหาและอุปสรรคที่สำคัญที่สุดในการพัฒนาพีอีเอ็ม ในการแก้ปัญหาส่วนใหญ่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่สามารถออกซิไดซ์ และทนแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่มีแพลทินัมผสมอยู่จำพวก เช่น แพลทินัมรูทีเนียมบนคาร์บอน (PtRu/C) แพลทินัมดีบุกบนคาร์บอน (PtSn/C) แพลเลเดียมทองบนคาร์บอน (PdAu/C) แพลทินัมโมลิบดีนัมบนคาร์บอนเป็นต้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนคาร์บอน มีความน่าสนใจสามารถทนแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ ช่วยลดการเกิดความเป็นพิษต่อแพลทินัมเมื่อเคลือบเป็นชั้นได้อีกด้วย

Qi และคณะ [41] ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก บน Vulcan X-72 ของ E-TEK และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบแพลทินัมรูทีเนียมร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนักบนคาร์บอนของ Engelhard และทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ชั่วแอโนด ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ 10 และ 50 พีพีเอ็ม พบว่าที่ความเข้มข้น 10 หรือ 50 พีพีเอ็ม จะให้ผลเหมือนกันคือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบแพลทินัมรูทีเนียมร้อยละ 40 โดยน้ำหนักบน Vulcan X-72 ของ E-TEK จะให้สมรรถนะน้อยที่สุด ตามด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก บนคาร์บอนของ Engelhard และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบแพลทินัมรูทีเนียมร้อยละ 50 โดยน้ำหนักบนคาร์บอนของ Engelhard ตามลำดับ ซึ่งอาจจะเป็นผลอันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของ E-TEK มีขนาดเล็กกว่า Engelhard จึงทำให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีผิวสัมผัสกับแพลทินัมมากกว่า

Cho และคณะ [42] ศึกษาการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยการถ่ายโอนรูปลอกที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงเมทานอลโดยตรง (DMFC) โดยใช้สารละลายที่ประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเนฟิออน คาร์บอน แล้วสเปรย์ลงบนวัสดุรองรับหลายชนิดเช่น เทฟลอน พีดีเอ็มเอส แคปทอน แล้วถ่ายโอนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังเมมเบรนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันการก่อตัวของชั้นเนฟิออนรอบผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าการโอนรูปลอกที่อุณหภูมิต่ำจะให้ผลดีกว่าการใช้อุณหภูมิสูง เนื่องจากการโอนรูปลอกที่อุณหภูมิต่ำทำให้เนฟิออนกระจายตัวได้ดี ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีการกระจายของโปรตอนดีขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุและสารเคมี	บริษัท
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนทางการค้า (Pt/C catalyst, 20%wt Pt on Vulcan XC-72)	Fuel cell store
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนทางการค้า (PtRu/C catalyst, 20%wt PtRu alloy 1:1 atomic ratio on Vulcan XC-72)	Fuel cell store
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: NaOH)	Ajax
4. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, 98%)	Fluka
5. 1,2-ไดเมทอกซีอีเทน (1,2-Dimethoxyethane, 98%)	Qrec
6. 2-โพรพานอล (2-propanol: C ₃ H ₇ OH)	Fluka
7. 1,2-โพรเพนไดออล (1,2-propanediol: C ₃ H ₈ (OH) ₂)	Ajax
8. สารละลายเนฟิออน (Nafion 117 solution, 5%)	Fluka
9. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide: H ₂ O ₂ , 30%)	Carlo Erba
10. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid: H ₂ SO ₄ , 98%)	Lab-scan
11. แผ่นเมมเบรนเนฟิออน (Nafion membrane 115)	Dupont
12. ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth)	E-tek
13. แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen: H ₂ , 99.999%)	Praxair
14. แก๊สออกซิเจน (Oxygen: O ₂ , 99.999%)	Praxair
15. แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen: N ₂ , 99.99%)	Praxair
16. แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนความเข้มข้น 100 ppm (100 ppm Carbon monoxide/Hydrogen)	Praxair
17. น้ำปราศจากไอออน (DI water)	

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ตู้อบ (Oven)

2. ตู้ดูดความชื้น
3. เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง
4. อ่างน้ำอัลตราโซนิกส์แบบควบคุมอุณหภูมิ (Ultrasonics water bath)
5. อ่างน้ำเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
6. ไมโครปิเปต (Micro pipette) ขนาด 1 และ 5 มิลลิลิตร
7. เครื่องแก้วต่างๆ เช่น กระจกตวง ปีกเกอร์ ฯลฯ
8. กระจกชั่งตวงขนาด 5, 20 และ 50 มิลลิลิตร
9. เครื่อง Compression Mold รุ่น LP 20 ของบริษัท Labtech
10. เครื่อง Compression Mold รุ่น LP 50 ของบริษัท Labtech
11. เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต Fujifilm Dimatix Materials Printer (DMP 2831)
12. เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว (Fuel cell hardware, area 5 cm²) ของบริษัท Electrochem
13. แผ่นเทฟลอน (Teflon sheet) ความหนา 0.5 มิลลิเมตร
14. แผ่นซิลิโคน (Silicone sheet) ความหนา 2 มิลลิเมตร
15. แผ่นสแตนเลส (Stainless steel sheet) ความหนา 2 มิลลิเมตร

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM 5800 LV ของบริษัท Jeol ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท AUTOLAB ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. เครื่อง Electronic load รุ่น PLZ-30F ของบริษัท KIKUSUI
4. เครื่อง Porosity meter

3.4 ตัวแปรที่ศึกษา

1. ชนิดและปริมาณของสารละลายที่เหมาะสมในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ความดัน อุณหภูมิ เวลา และชนิดของวัสดุรองรับในการถ่ายโอนรูปลอกของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ต
3. ชนิดของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตตามด้วยการถ่ายโอนรูปลอก เพื่อทดสอบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์

4. การขยายส่วนของชั้นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตตามด้วยการถ่ายโอนรูปลอกที่มีความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ดีที่สุด

3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.5.1 การเตรียมเมมเบรนเนฟิออน

1. ตัดเมมเบรนเนฟิออนขนาด 5×5 ตารางเซนติเมตร
2. แช่เมมเบรนเนฟิออนในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในอ่างน้ำแบบเขย่าที่ควบคุมอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
3. แช่เมมเบรนเนฟิออนในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในอ่างน้ำแบบเขย่าที่ควบคุมอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารอินทรีย์
4. แช่เมมเบรนเนฟิออนในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในอ่างน้ำแบบเขย่าที่ควบคุมอุณหภูมิ 80 องศา เพื่อกำจัดไอออนโลหะ
5. แช่เมมเบรนเนฟิออนในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในอ่างน้ำแบบเขย่าที่ควบคุมอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อล้างคลอไรด์ไอออน
6. เก็บเมมเบรนเนฟิออน แช่ไว้ในน้ำปราศจากไอออน

3.5.2 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C และ PtRu/C

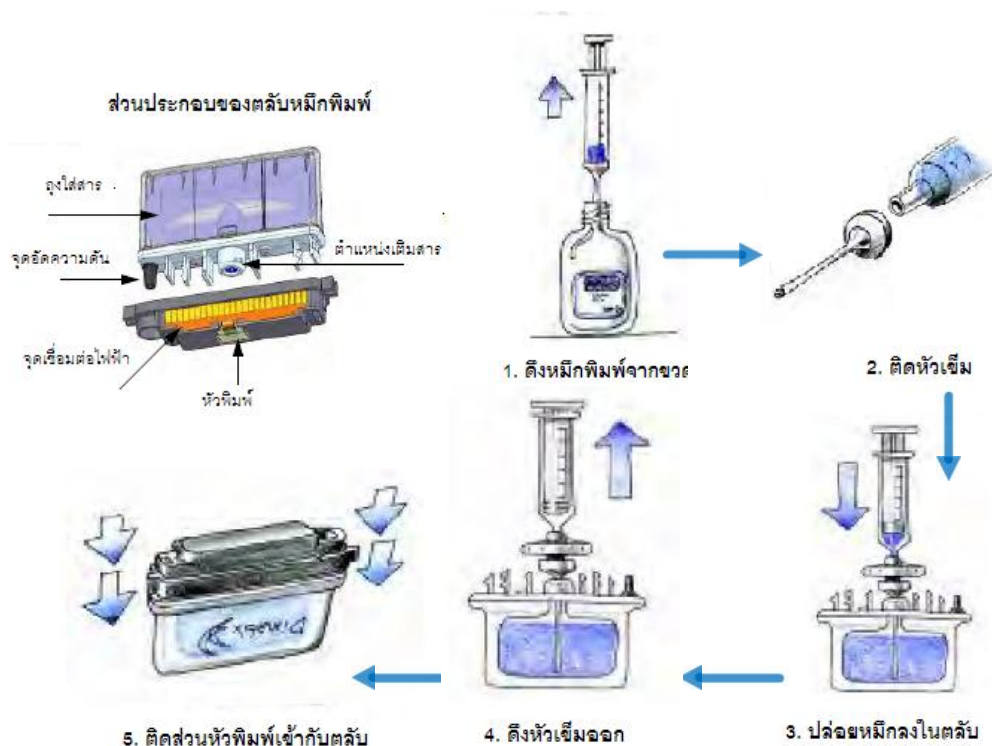
1. ชั่งน้ำหนักผงตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน (20%Pt/C) ปริมาณ 50 มิลลิกรัมในขวดแก้ว
2. เติมสารละลาย 1,2-โพรเพนไดออลปริมาตร 6 มิลลิลิตร
3. เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 6 มิลลิลิตร
4. แช่ในอ่างน้ำอัลตราโซนิกส์แบบควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
5. เติมสารละลายเนฟิออน 5% ปริมาตร 0.566 มิลลิลิตร
6. แช่ในอ่างน้ำอัลตราโซนิกส์แบบควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.1 เครื่องพิมพ์ Fujifilm Dimatix Materials Printer
และตลับหมึกพิมพ์ Fujifilm Dimatix Cartridge [43]

3.5.3 การเติมหมึกพิมพ์ลงในตลับหมึกพิมพ์ Fujifilm Dimatix Cartridge

1. ขั้นตอนวิธีการเติมหมึกของตลับหมึกพิมพ์ แสดงดังภาพที่ 3.2
2. ใช้กระบอกฉีดยาขนาด 5 มิลลิลิตร ดึงหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากขวดที่ได้เตรียมไว้
3. ติดอุปกรณ์หัวเข็มเข้ากับกระบอกฉีดยา
4. เติมหมึกพิมพ์ลงในตลับหมึกพิมพ์ดังภาพที่ 3.1 ค่อยๆปล่อยหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างช้าๆ พยายามให้มีอากาศภายในตลับหมึกพิมพ์ให้น้อยที่สุด เพราะมีผลต่อการไหลของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา อันเนื่องจากแรงดันภายในตลับหมึกพิมพ์
5. เติมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา ให้เกือบเต็มตลับหมึก แล้วดึงกระบอกฉีดยาออกจากตลับหมึกอย่างช้าๆ
6. แช่ในอ่างน้ำอัลตราโซนิคส์แบบควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที เพื่อไล่อากาศภายในตลับหมึกพิมพ์ประกบส่วนหัวพิมพ์เข้ากับส่วนตลับหมึกพิมพ์อย่างรวดเร็วประกบส่วนหัวพิมพ์เข้ากับส่วนตลับหมึกพิมพ์อย่างรวดเร็ว
7. ประกบส่วนหัวพิมพ์เข้ากับส่วนตลับหมึกพิมพ์อย่างรวดเร็ว ป้องกันการเกิดฟองอากาศภายในตลับหมึกพิมพ์
8. เช็ดทำความสะอาดตลับหมึกพิมพ์ ก่อนนำเข้าประกอบกับเครื่องพิมพ์



ภาพที่ 3.2 ส่วนประกอบและวิธีการเติมหมึกของตลับหมึกพิมพ์ Fujifilm Dimatix Cartridge [43]

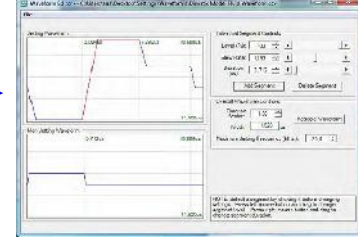
3.5.4 การทำความสะอาดตลับหมึกพิมพ์ Fujifilm Dimatix Cartridge

1. เมื่อพิมพ์เสร็จแล้ว ถอดตลับหมึกพิมพ์ออกจากเครื่องพิมพ์
2. กดบริเวณตัวล็อคของตลับหมึก แล้วค่อยดึงส่วนหัวพิมพ์ออกจากส่วนตลับหมึกอย่างช้าๆ ระวังหมึกพิมพ์หก
3. ใช้หลอดฉีดยาที่ติดหัวเข็มแล้ว ค่อยๆดูดหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลืออยู่
4. เก็บหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไว้ในขวดแก้ว ปิดฝาให้สนิท
5. ทำความสะอาดส่วนหัวพิมพ์ด้วยสารละลายที่มีแรงตึงผิวต่ำจำพวก แอลกอฮอล์ เช่น เมทิลแอลกอฮอล์ ไอโซโพรพานอล ฯลฯ โดยใช้หลอดฉีดยาช่วยในการควบคุมแรงดูดของสารละลาย เพื่อกำจัดหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค้างอยู่ภายในหัวพิมพ์
6. ล้างอุปกรณ์ทั้งหมดด้วยน้ำสะอาด
7. แช่อุปกรณ์ทั้งหมดในอ่างน้ำอัลตราโซนิคส์อย่างน้อย 30 นาที
8. อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้งานต่อไป

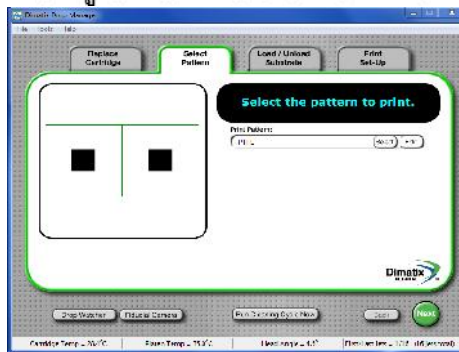
1. เปิดฝาเครื่องและใส่สลับหมึกพิมพ์



เลือกลักษณะการปล่อยความตึงค์



2. เลือกรูปแบบและจำนวนชั้นที่ตามต้องการ



Cartridge Settings

Waveform: Cartridge | Cleaning Cycle

Select Cartridge: [None] | [OK] | [Cancel]

Select About Ink: Workload: [None]

Cartridge Volume: [1.0] ml

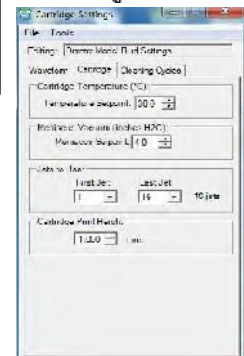
1	2	3	4
22.00	25.00	22.00	25.00
5	6	7	8
22.00	25.00	22.00	25.00
9	10	11	12
22.00	25.00	22.00	25.00
13	14	15	16
22.00	25.00	22.00	25.00

Ink Jet Control: [None]

Printed: [None]

Frequency: 22.1kHz

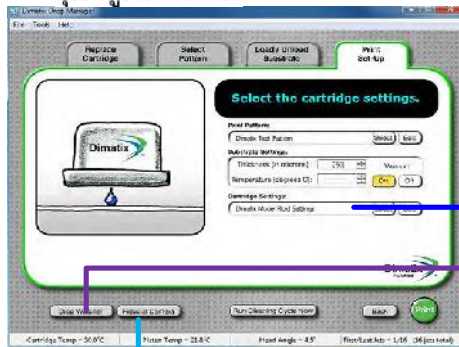
- เลือกอุณหภูมิ ความดัน จำนวนหัวพิมพ์ ความสูงหัวพิมพ์



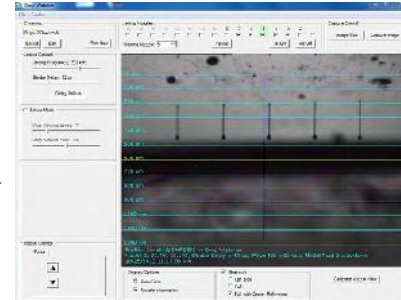
- เลือกความตึงค์ของ แต่ละหัวพิมพ์

3. เลือกสภาวะที่ต้องการ

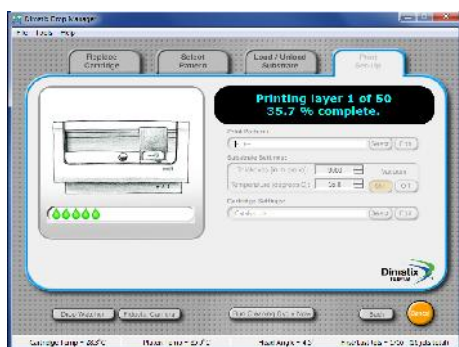
- * ความหนาวัสดุ
- * อุณหภูมิแผ่นรองรับ



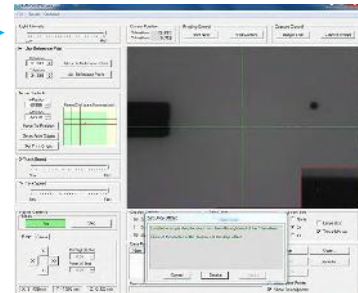
แสดงลักษณะหยดหมึกที่ได้จากการปรับค่าต่าง ๆ



4. เริ่มทำการพิมพ์



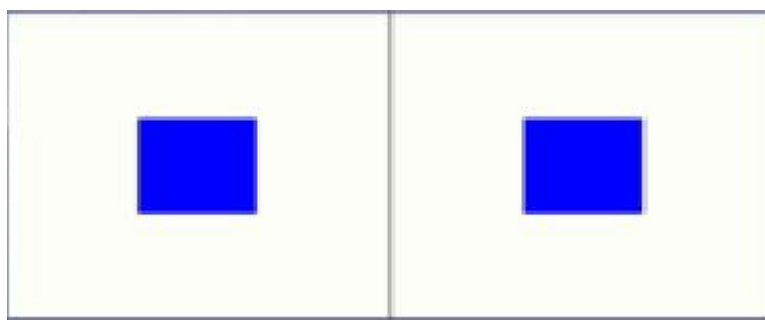
เลือกตำแหน่งที่จะพิมพ์



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมเครื่องพิมพ์อย่างง่าย [43]

3.5.5 การเตรียมเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Fujifilm Dimatix Materials Printer

1. เปิดเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Fujifilm Dimatix Materials และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมเครื่องพิมพ์ ตามลำดับ
2. เปิดโปรแกรม Dimatix Drop Manager
3. ใส่ตลับหมึกพิมพ์เข้ากับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทพร้อมยึดตัวล็อค
4. เลือกรูปแบบการพิมพ์ การพิมพ์บนแผ่นเพลลอนจะกำหนดพื้นที่การพิมพ์ขนาด 2.23×2.23 ตารางเซนติเมตร ดังภาพที่ 3.4 ตรงกลางของพื้นที่กรอบ ขนาด 7×7 ตารางเซนติเมตร ทั้งหมด 2 พื้นที่ติดกัน เพื่อควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ด้านของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนการพิมพ์บนผ้าคาร์บอนจะกำหนดพื้นที่การพิมพ์ขนาด 4.46×2.23 ตารางเซนติเมตร ไม่กำหนดกรอบ



ภาพที่ 3.4 การกำหนดพื้นที่การพิมพ์บนแผ่นเพลลอน

5. กำหนดความหนาของวัสดุรองรับที่ 600 ไมโครเมตรและอุณหภูมิแผ่นโลหะรองรับที่ 60 องศาเซลเซียส
6. กำหนดค่าต่างๆ ของตลับหมึกพิมพ์ให้เหมาะสมตามต้องการ
 - ค่าโวลต์ที่ใช้ของแต่ละหัวพิมพ์
 - ลักษณะเวลาที่ใช้ในการปล่อยโวลต์ที่หัวพิมพ์
 - จำนวนหัวพิมพ์ที่ใช้ทั้งหมด
 - อุณหภูมิ ความดันและความสูงของตลับหมึกพิมพ์

โดยตรวจสอบความเหมาะสมจากกล้องภายในเครื่องพิมพ์ ซึ่งสามารถดูลักษณะการไหลของหมึกแต่ละหัวพิมพ์ได้ ทำให้การไหลของพื้นที่การพิมพ์มีปริมาณและความสม่ำเสมอของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง

7. กำหนดตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการพิมพ์บนวัสดุรองรับ โดยจะมีกล่องช่วยในการกำหนดตำแหน่งที่แม่นยำและแน่นอน
8. จะได้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทพร้อมใช้งาน ตามภาพที่ 3.3

3.5.6 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) ที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์อิงค์เจ็ทบนผ้าคาร์บอน

1. ตัดผ้าคาร์บอนขนาด 5×2.5 ตารางเซนติเมตร
2. ชั่งน้ำหนักผ้าคาร์บอนและจดบันทึกค่า
3. ตัดผ้าคาร์บอนที่ได้บนแผ่นโลหะรองรับของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทที่เตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว
4. รวณอุณหภูมิแผ่นรองรับโลหะถึง 60 องศาเซลเซียสจึงเริ่มทำการพิมพ์
5. เมื่อพิมพ์ไปได้ระยะหนึ่ง นำผ้าคาร์บอนที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป่าด้วยไดร์จนผ้าคาร์บอนแห้งสนิท หลังจากนั้นแล้วแช่ในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อกำจัดแอลกอฮอล์ออก จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
6. ทำซ้ำข้อ 6 เรื่อยๆ จนกระทั่งผ้าคาร์บอนมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.15 มิลลิกรัมของโลหะต่อตารางเซนติเมตร
7. ตัดผ้าคาร์บอนที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด 2.23×2.23 ตารางเซนติเมตร 2 แผ่น หยดสารละลายเนฟลอนปริมาณ 5 ไมโครลิตร ลงบนผ้าคาร์บอนแต่ละแผ่น
8. วางแผ่นเทฟลอนที่ตัดช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.23×2.23 ตารางเซนติเมตร บนแผ่นสแตนเลส จากนั้นวางผ้าคาร์บอนลงในช่อง โดยหงายด้านที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้น
9. วางแผ่นเมมเบรนที่แห้งในตู้ดูดความชื้น ต่อจากผ้าคาร์บอน แล้วปิดด้วยผ้าคาร์บอน โดยคว่ำด้านที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลง ตามด้วยแผ่นเทฟลอนที่ตัดช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.23×2.23 ตารางเซนติเมตร แล้วประกบปิดด้วยแผ่นสแตนเลสอีกแผ่นหนึ่ง
10. นำชิ้นทั้งหมดที่เรียงไว้ บีบอัดด้วยเครื่อง Compression Mold ที่อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส และแรงบีบอัด 65 บาร์ เป็นเวลา 150 วินาที หลังจาก

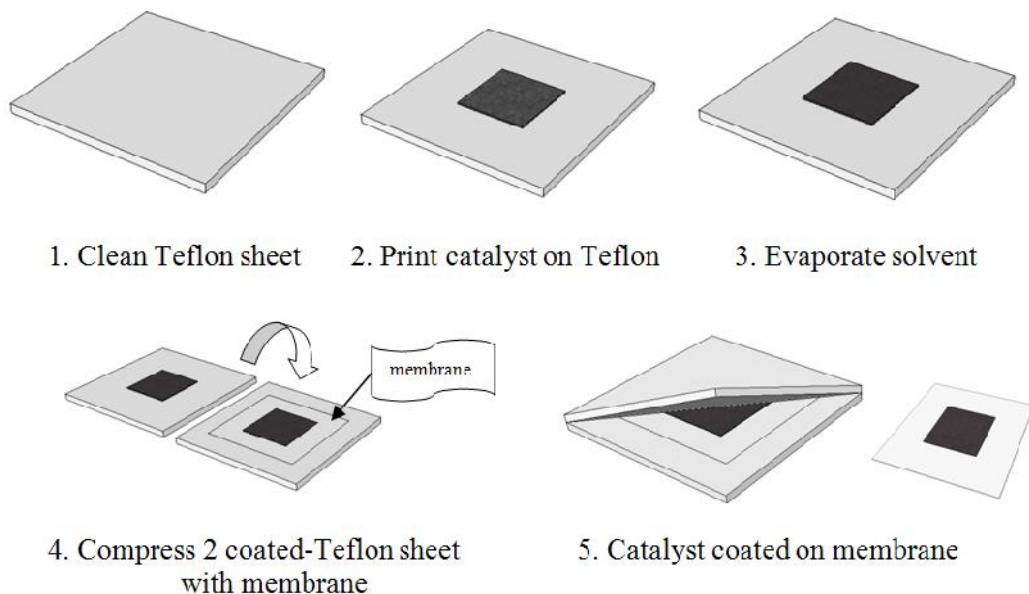
นั้นบีบอัดเย็นที่แรงบีบอัด 65 บาร์ เป็นเวลา 150 วินาที จะได้แผ่นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตบนผ้าคาร์บอน

11. นำแผ่นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ได้เก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น เพื่อรอทดสอบต่อไป

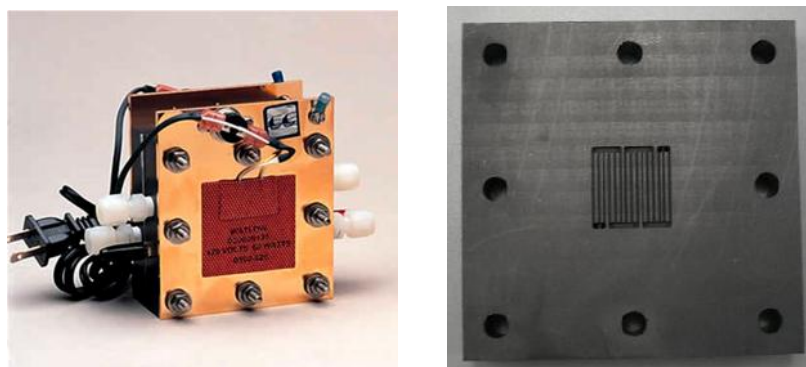
3.5.7 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) ที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตตามด้วยการถ่ายโอนรูปลอก

1. ตัดแผ่นเทฟลอนที่ขนาด 14×7 ตารางเซนติเมตร ล้างทำความสะอาด ไม่ให้มีคราบสกปรก แล้วเช็ดให้แห้ง
2. นำแผ่นเทฟลอนที่เตรียมได้ไปบีบอัดด้วยเครื่อง Compression Mold ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และแรงบีบอัด 100 บาร์ เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นบีบอัดเย็นที่แรงบีบอัด 100 บาร์ เป็นเวลา 120 วินาที จะได้แผ่นเทฟลอนที่พร้อมสำหรับการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ชั่งน้ำหนักแผ่นเทฟลอนและจดบันทึกค่า
4. ตัดแผ่นเทฟลอนที่ได้บนแผ่นโลหะรองรับของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตที่เตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว เช็ดทำความสะอาดแผ่นเทฟลอนอีกครั้ง ด้วยสารละลายไอโซโพรพานอล
5. รอจนอุณหภูมิแผ่นรองรับโลหะถึง 60 องศาเซลเซียสจึงเริ่มทำการพิมพ์
6. เมื่อพิมพ์ไปได้ระยะหนึ่ง นำชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้บนแผ่นเทฟลอน เป่าด้วยไดร์จนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแห้งสนิท หลังจากนั้นแล้วแช่ในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อกำจัดแอลกอฮอล์ออก จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
7. ทำซ้ำข้อ 6 เรื่อยๆ จนกระทั่งแผ่นเทฟลอนมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.15 มิลลิกรัมของโลหะต่อตารางเซนติเมตร
8. เมื่อได้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนแผ่นเทฟลอนแล้ว แบ่งครึ่งแผ่นเทฟลอนจากนั้นเรียงลำดับ การวางตามลำดับจากล่างขึ้นบนดังนี้
 - แผ่นสแตนเลสขนาด 5×5 ตารางนิ้ว ชัดเรียบ
 - แผ่นเทฟลอนเปล่าขนาด 7×7 ตารางเซนติเมตร

- แผ่นซิลิโคนขนาด 7×7 ตารางเซนติเมตร
 - แผ่นเทฟลอนที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้านบน
 - แผ่นเมมเบรนเนฟลอนที่แห้งในตัวดูดความชื้น
 - แผ่นเทฟลอนที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้านล่าง
 - แผ่นซิลิโคนขนาด 7×7 ตารางเซนติเมตร
 - แผ่นเทฟลอนเปล่าขนาด 7×7 ตารางเซนติเมตร
 - แผ่นสแตนเลสขนาด 5×5 ตารางนิ้ว ชัดเรียบ
9. นำชิ้นทั้งหมดที่เรียงไว้ บีบอัดด้วยเครื่อง Compression Mold ที่อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส และแรงบีบอัด 30 บาร์ เป็นเวลา 7 นาที หลังจากนั้นบีบอัดเย็นที่แรงบีบอัด 30 บาร์ เป็นเวลา 120 วินาที จะได้แผ่นเมมเบรนที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่
 10. ตัดผ้าคาร์บอนขนาด 2.23×2.23 ตารางเซนติเมตร 2 แผ่น หยดสารละลายเนฟลอนปริมาณ 5 ไมโครลิตร ลงบนผ้าคาร์บอนแต่ละแผ่น
 11. วางแผ่นเทฟลอนที่ตัดช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.23×2.23 ตารางเซนติเมตร บนแผ่นสแตนเลส จากนั้นวางผ้าคาร์บอนลงในช่อง โดยหงายด้านที่หยดสารละลายเนฟลอนขึ้น
 12. วางแผ่นเมมเบรนที่เตรียมได้ ต่อจากผ้าคาร์บอน แล้วปิดด้วยผ้าคาร์บอน โดยคว่ำด้านที่หยดสารละลายเนฟลอนลง ตามด้วยแผ่นเทฟลอนที่ตัดช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.23×2.23 ตารางเซนติเมตร แล้วประกบปิดด้วยแผ่นสแตนเลสอีกแผ่นหนึ่ง
 13. นำชิ้นทั้งหมดที่เรียงไว้ บีบอัดด้วยเครื่อง Compression Mold ที่อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส และแรงบีบอัด 65 บาร์ เป็นเวลา 150 วินาที หลังจากนั้นบีบอัดเย็นที่แรงบีบอัด 65 บาร์ เป็นเวลา 150 วินาที จะได้แผ่นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตตามด้วยการถ่ายโอนรูปลอก
 14. นำแผ่นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ได้เก็บไว้ในตัวดูดความชื้น เพื่อรอทดสอบต่อไป



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการพิมพ์อิงก์เจ็ตและถ่ายโอนรูปดอกอย่างง่าย



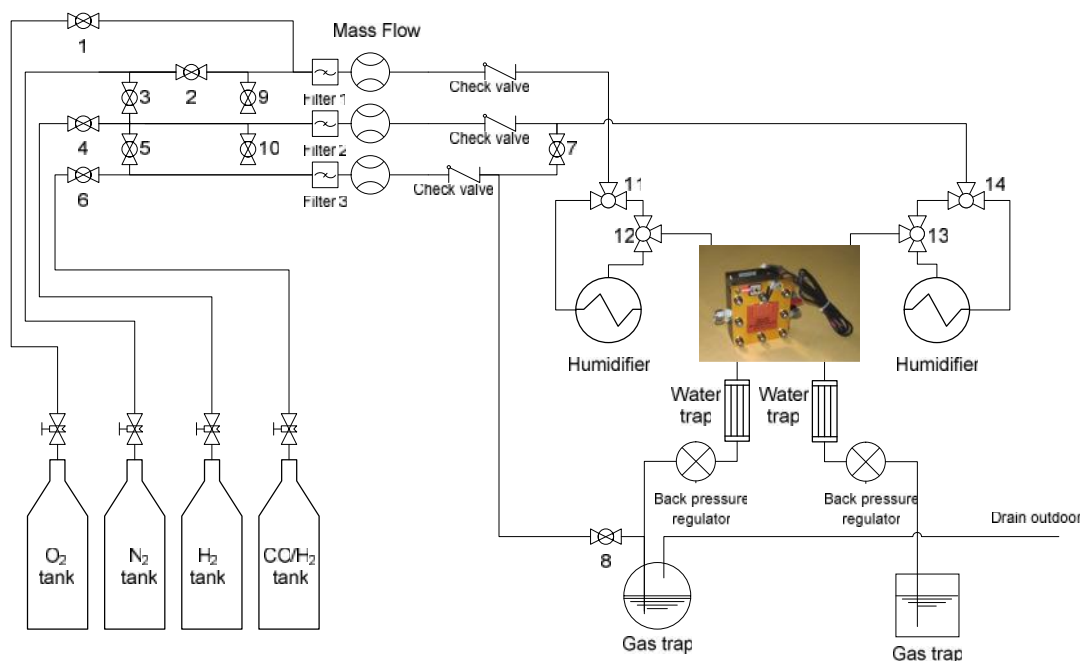
ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็ม และช่องการไหลของแก๊สภายในเซลล์เชื้อเพลิง

3.5.8 การวัดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 และ 25 ตารางเซนติเมตร

3.5.8.1 การประกอบเซลล์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง

1. ตรวจสอบสภาพของอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงให้พร้อมใช้งาน รวมทั้งทำความสะอาดช่องทางการไหลของแก๊ส ด้วยการใช้ลมเป่าได้
2. นำแผ่นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) ที่เตรียมได้ ประกอบด้วยแผ่นซิลิโคน 2 แผ่นที่เจาะช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5 ตารางเซนติเมตร เพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส

3. จากนั้นนำแผ่นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า และแผ่นซีลีโคน ประกบด้วยแผ่นกราไฟต์ที่เป็นช่องทางการไหลของแก๊ส และแผ่นให้ความร้อนทั้ง 2 ด้าน ก่อนใช้สกรูหัวจมนและน็อต 8 ตัว ยึดอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมดเข้าด้วยกัน
4. ใช้ประแจปอนด์หรือประแจวัดแรงบิด ที่แรง 40 แรงปอนด์*นิ้ว ในการยึดอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงให้แน่น
5. นำอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบเสร็จแล้ว ติดตั้งในระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (Test station)



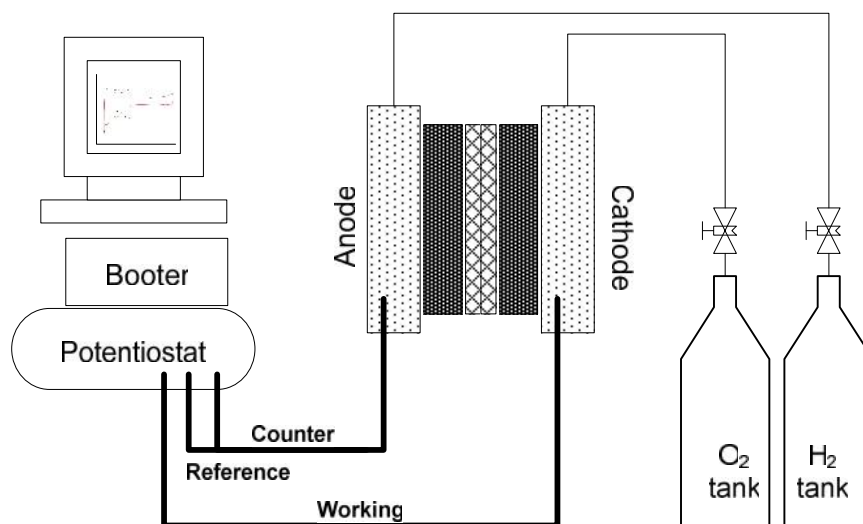
ภาพที่ 3.7 แผนภาพระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

3.5.8.2 การวิเคราะห์ Polarization Curve ของเซลล์เชื้อเพลิง

1. สถานที่ทดสอบสมรรถนะของเชื้อเพลิงจะแสดงดังภาพที่ 3.7
2. ตรวจสอบวาล์วทุกตัวให้อยู่ตำแหน่งที่ปิด พร้อมทั้งตรวจสอบสภาพของสถานที่ทดสอบให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

3. ตรวจสอบระดับน้ำของหม้อความชื้น (Humidifier) ให้มีระดับประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของหม้อความชื้น เพื่อการวัดอุณหภูมิที่แม่นยำและความชื้นที่ต่อเนื่อง
4. เชื่อมต่อท่อ นำแก๊สไฮโดรเจน (แอนโด) และออกซิเจน (แคโทด) กับอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิง ทั้งท่อ นำแก๊สเข้าและท่อ นำแก๊สออก
5. เชื่อมสายไฟเข้ากับขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองขั้วมายังเครื่อง Electronic load โดยให้ขั้วลบต่อเข้าด้านแก๊สไฮโดรเจน และขั้วบวกต่อเข้าด้านแก๊สออกซิเจน
6. เชื่อมต่ออุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) กับอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิง โดยสอดเข้าไปในช่องบริเวณกลางของอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิง
7. เปิดเครื่อง Electronic Load และเปิด Main switch ที่จ่ายกระแสไฟ และควบคุมอุณหภูมิระบบทั้งหมด โดยให้อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและหม้อความชื้นทางด้านไฮโดรเจน (แอนโด) และด้านออกซิเจน (แคโทด) ให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 60 65 และ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากนั้นรอจนกระทั่งอุปกรณ์ทั้งหมดมีอุณหภูมิถึงที่ตั้งไว้
8. เมื่ออุปกรณ์ทั้งหมดมีอุณหภูมิถึงที่ตั้งไว้ เปิดหัวถังแก๊สไฮโดรเจน แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนแก๊สไฮโดรเจน แล้วปรับ Regular ที่หัวถังของอยู่ที่ 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi)
9. ในขั้นแรกจะทดสอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน เพื่อทดสอบระบบ โดยเปิดวาล์วหมายเลข 2 และ 3 และตั้งอัตราการไหลของ เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สทั้งสองให้มีค่าเท่ากับ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่ภาวะมาตรฐาน (Standard cubic centimeter per minute, sccm) เมื่อตรวจการรั่วของแก๊ส และลักษณะการไหลของแก๊สคงที่ภายในเวลาประมาณ 10 นาทีแล้ว (สังเกตจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายใน Gas trap) จึงปิดเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส จากนั้นปิดหัวถังแก๊สไฮโดรเจน ไล่แก๊สไฮโดรเจนที่เหลือ ด้วยวาล์ว 9 และ 10 และเมื่อแก๊สไฮโดรเจนในระบบหมด จึงปิดวาล์วหมายเลข 2 และ 3 จากนั้นจึงคลาย Regular ของถังแก๊สไฮโดรเจน

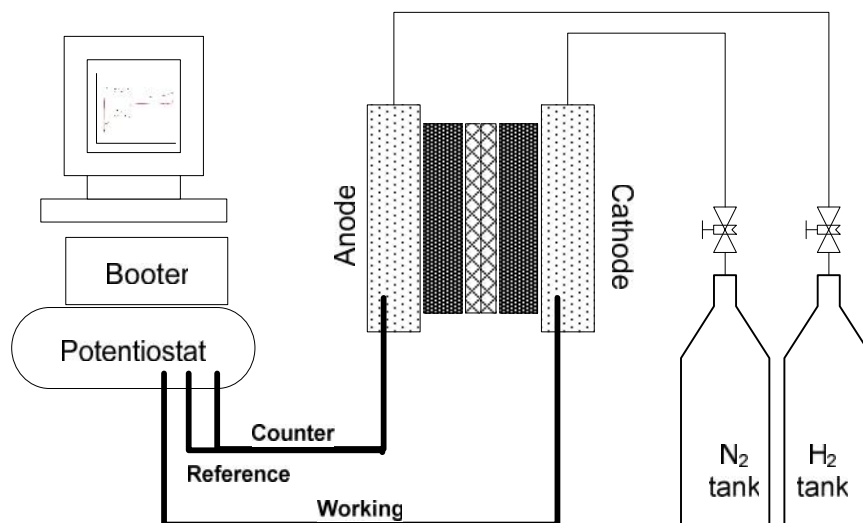
10. เปิดวาล์วหมายเลข 1 เพื่อให้แก๊สออกซิเจนไหลเข้าที่ขั้วแคโทด และเปิดวาล์วหมายเลข 4 เพื่อให้แก๊สไฮโดรเจนไหลเข้าที่ขั้วแอโนด ตั้งอัตราไหลของเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สทั้งสองให้มีค่าเท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่ภาวะมาตรฐาน (Standard cubic centimeter per minute, sccm)
11. ทำการ Run in โดยตั้งเครื่อง Electronic Load ที่ค่าความต่างศักย์ 0.2 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเปลี่ยนค่าความต่างศักย์เป็น 0.3 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
12. เริ่มทำการบันทึกค่า Polarization Curve ของเซลล์เชื้อเพลิง โดยจดค่าความต่างศักย์ขณะวงจรเปิด (Open Circuit Voltage, E_{ocv}) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ตั้ง 0.1 โวลต์ ไปจนถึงค่าความต่างศักย์ขณะวงจรเปิด (Open Circuit Voltage, E_{ocv}) บันทึกค่าซ้ำอีกประมาณ 3 – 4 รอบ
13. นำผลการทดสอบที่ได้ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) และความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์) หรือที่เรียกว่ากราฟโพลลาไรเซชัน



ภาพที่ 3.8 แผนภาพการทดสอบอิมพีแดนซ์ในเซลล์เชื้อเพลิง

3.5.8.3 การวิเคราะห์หิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า (Impedance spectroscopy)

1. เชื่อมต่อสายไฟเข้ากับเครื่อง Potentiostat และนำแก๊สไฮโดรเจน (แอโนด) และออกซิเจน (แคโทด) เข้าสู่ห้องการไหลของอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิง ดังภาพที่ 3.8
2. ควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงในอยู่ภาวะปกติ (ภาวะการรันเซลล์ เพื่อวิเคราะห์ Polarization Curve) และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (แอโนด) และแก๊สออกซิเจน (แคโทด) ที่ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่ภาวะมาตรฐาน (Standard cubic centimeter per minute, sccm)
3. เปิดเครื่อง Potentiostat ยกเว้นปุ่ม cell enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
4. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่อง Potentiostat โดยใช้โปรแกรม Frequency response analyzer (FRA) ในการเก็บข้อมูล
5. วิธีการทดสอบ จะทดสอบที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.7 โวลต์ และค่าความถี่ในช่วง 50 มิลลิเฮิรตซ์ ไปจนถึง 1 กิโลเฮิรตซ์
6. เริ่มต้นการวิเคราะห์หิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า โดยกด Cell enable ที่เครื่อง Potentiostat และกด start ที่โปรแกรม
7. เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์เสร็จสิ้น จึงทำการบันทึกค่าลงโปรแกรม Excel
8. วิเคราะห์ซ้ำอย่างน้อย 3 รอบ คำนวณผลการวิเคราะห์ หาค่าความต้านทานต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง
9. ปิดโปรแกรม FRA ตามด้วยคอมพิวเตอร์ และเครื่อง Potentiostat



ภาพที่ 3.9 แผนภาพการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมตรีในเซลล์เชื้อเพลิง

3.5.8.4 การวิเคราะห์แบบไซคลิกโวลแทมเมตรีในเซลล์เชื้อเพลิง (Cyclic voltammetry, CV)

1. เชื่อมต่อสายไฟเข้ากับเครื่อง Potentiostat และนำแก๊สไฮโดรเจน (แอนโนด) และไนโตรเจน (แคโทด) เข้าช่องการไหลของอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิง ดังภาพที่ 3.9
2. ปรับวาล์ว 11 12 13 และ 14 ในภาพที่ 3.7 ไปทิศทางตรงกันข้าม (หัวลูกศรของตัววาล์วบอกทิศการไหลของแก๊ส) ไม่ให้แก๊สผ่านหม้อความชื้น เพื่อป้องกันน้ำเข้าสู่ระบบ
3. ควบคุมเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมดให้อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง และตั้งอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (แอนโนด) และแก๊สไนโตรเจน (แคโทด) ที่ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีที่ภาวะมาตรฐาน (Standard cubic centimeter per minute, sccm)
4. เปิดเครื่อง Potentiostat ยกเว้นปุ่ม cell enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
5. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่อง Potentiostat โดยใช้โปรแกรม GPES ในการวิเคราะห์ข้อมูล
6. วิธีการทดสอบ ตั้งค่าสำหรับการวิเคราะห์ไซคลิกโวลแทมเมตรี ในช่วงค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 0 โวลต์ถึง 1.2 โวลต์ อัตราเร็วในการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อนาที และทำการวิเคราะห์ 20 รอบ

7. เริ่มต้นการวิเคราะห์หิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า โดยกด Cell enable ที่เครื่อง Potentiostat และกด start ที่โปรแกรม
8. เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์เสร็จสิ้น จึงทำการคำนวณหาปริมาณพื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยาในแต่ละรอบ และบันทึกค่าลงโปรแกรม Excel
9. ปิดโปรแกรม GPES ตามด้วยคอมพิวเตอร์ และเครื่อง Potentiostat

3.5.8.5 การวิเคราะห์ความทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (CO-tolerant)

1. การเชื่อมต่ออุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิง และใช้ภาวะต่างๆ ทั้งหมด เช่น อุณหภูมิ เหมือนการวิเคราะห์ Polarization Curve ของเซลล์เชื้อเพลิง
2. เริ่มทำการวิเคราะห์ความทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากวิเคราะห์ Polarization Curve ของเซลล์เชื้อเพลิง เสร็จเรียบร้อยแล้ว
3. เปิดหัวถังแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนความเข้มข้น 100 ppm แล้วปรับ Regular ที่หัวถังของอยู่ที่ 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi)
4. ตั้งอัตราไหลของเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่ภาวะมาตรฐาน
5. ตั้งอัตราไหลของเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สด้านแอโนด ตามความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจน โดยให้อัตราไหลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนความเข้มข้น 100 ppm และแก๊สไฮโดรเจนดังนี้
 - 20 ppm ใช้อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนความเข้มข้น 100 ppm เท่ากับ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแก๊สไฮโดรเจน เท่ากับ 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
 - 60 ppm ใช้อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนความเข้มข้น 100 ppm เท่ากับ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและแก๊สไฮโดรเจน เท่ากับ 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

- 100 ppm ใช้อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนความเข้มข้น 100 ppm เท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและไม่ใช้แก๊สไฮโดรเจน
6. เปิดวาล์ว 6 และ 7 ในภาพที่ 3.7 เพื่อเป็นการผสมแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนความเข้มข้น 100 ppm กับแก๊สไฮโดรเจน โดยเริ่มทำการทดสอบที่ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจน 20 ppm
 7. เริ่มทำการบันทึกค่า Polarization Curve ของเซลล์เชื้อเพลิง โดยจดค่าความต่างศักย์ขณะวงจรเปิด (Open Circuit Voltage, EOCV) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ตั้ง 0.1 โวลต์ ไปจนถึงค่าความต่างศักย์ขณะวงจรเปิด (Open Circuit Voltage, OCV) ตามเวลาดังแต่ 5 15 30 45 60 90 และ 120 นาทีตามลำดับ
 8. หลังจากนั้น ปิดวาล์ว 7 และเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนความเข้มข้น 100 ppm และเปลี่ยนอัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เพื่อเป็นการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา
 9. เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมง จึงเริ่มทำการทดสอบเหมือนเดิม โดยเปลี่ยนความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนเป็น 60 และ 100 ppm เริ่มทำการบันทึกค่า Polarization Curve ของเซลล์เชื้อเพลิง แล้วทำการฟื้นฟูสภาพเหมือนเดิม
 10. การทดสอบแบบ Cyclic ด้วยการตั้งค่าความต่างศักย์ที่ 0.6 โวลต์ จดบันทึกค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้ทุกๆ นาที จนกระทั่ง ค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้คงที่ จึงเริ่มทำการฟื้นฟูสภาพหลังจากนั้นจึงเปลี่ยนความเข้มข้น 60 และ 100 ppm
 11. เมื่อวิเคราะห์เสร็จสิ้น จึงปิดหัวถังแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นจึงปิดวาล์ว 7 และเปิดวาล์ว 8 เพื่อไล่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จนกระทั่งแก๊สหมด จึงคลาย Regulator

12. หลังจากนั้น จึงเริ่มทำการรันด้วยไนโตรเจนที่อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน เท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีอย่างน้อย 10 นาที เพื่อทำการล้างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบ
13. จากนั้นจึงปิดหัวถังแก๊สทั้งหมด คลาย Regulator และปิดระบบทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมด

3.5.8.6 ขั้นตอนการปิดระบบหลังการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

1. ปิดเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส และปิดวาล์วที่หัวถังแก๊ส
2. เปิดวาล์ว 9 และ 10 ในภาพที่ 3.7 เพื่อไล่แก๊สในระบบทั้งหมด จนกระทั่งความดันหัวถังแก๊สเหลือ 0 แล้วจึงคลาย Regulator ปิดวาล์วทั้งหมดในระบบ
3. ปิดสวิตช์อุปกรณ์ให้ความร้อนทั้งหมด และ Main switch รวมทั้งถอดปลั๊กอุปกรณ์ทั้งหมด
4. เก็บสายไฟที่ต่อกับเครื่อง Electronic load
5. ถอดอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงออกจากหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยวิธีการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ตให้มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งนี้การพิมพ์อิงก์เจ็ตสามารถกำหนดขนาดลักษณะรูปร่าง ปริมาณ และความสม่ำเสมอของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิมที่ต้องใช้มือเช่นการทำด้วยแปรงหรือการสเปรย์ ซึ่งขึ้นกับทักษะของผู้เตรียม ส่วนการถ่ายโอนรูปลอกซ์แก้ปัญหาการบวมของเมมเบรนเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลาย ในงานวิจัยต่างๆ พบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบนั้น ถ้าสามารถแยกชั้นกรงออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอย่างชัดเจนจะทำให้ทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีการถ่ายโอนรูปลอกซ์ หลังจากพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับจำพวกไมลาร์หรือเทฟลอน การรดร้อนเมมเบรนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบบนวัสดุรองรับ อาจทำให้ได้ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่แยกชั้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอย่างชัดเจน ซึ่งทำให้สามารถกรองคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.1 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน

4.1.1 หมึกพิมพ์เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต Fujifilm Dimatix Materials Printer

เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต Fujifilm Dimatix Materials Printer เป็นเครื่องอิงก์เจ็ตที่ใช้ระบบหัวพิมพ์แบบแรงดันโวลต์ขับเคลื่อน (Piezo-driven jetting device) ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณอัตราไหล และแม้กระทั่งรูปแบบในการไหลของหยดหมึก แต่ละหมึกพิมพ์ที่พิมพ์ลงไป

คุณสมบัติของหมึกพิมพ์ที่เหมาะสม

- ความหนืด 10 - 12 cps (Centipoise)
- แรงตึงผิว 28 – 36 dynes/cm
- ความถ่วงจำเพาะ > 1
- หมึกพิมพ์ควรกำจัดแก๊สออก อากาศหรือแก๊สที่ไม่ละลายจะมีผลต่อจังหวะหรือช่วงของการปล่อยโวลต์ และขัดขวางการพิมพ์
- หมึกพิมพ์ควรกรองอย่างน้อย 1 ไมครอนเมตร
- หมึกพิมพ์ควรมีความเป็นเนื้อเดียวกัน
- หมึกพิมพ์ควรระเหยได้ช้า

คุณสมบัติดังกล่าวที่เครื่องพิมพ์ต้องการสามารถปรับเปลี่ยนได้ต้องการ ตามสารละลายที่เลือกใช้ ดังนั้นสารละลายที่เลือกใช้ ควรจะเป็นสารละลายที่สามารถละลายตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี มีความหนืดและแรงตึงผิวที่พอเหมาะ

สารละลายที่ควรใช้

- Aliphatic alcohols
- Aromatic hydrocarbons เช่น anisole, trimethylbenzene
- Aliphatic hydrocarbons เช่น hexane, dodecane
- Cellusolves เช่น ethylene glycol monoethers
- Glycols, glycol ethers
- Lactate and similar esters
- Aliphatic and aromatic ketones including tetrahydrofuran
- Polyethylene glycols, polypropylene glycols

ในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะนำมาใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนนั้น จะต้องปรับเปลี่ยนหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความเหมาะสมต่อการพิมพ์แบบนี้ๆ โดยสมบัติของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องศึกษา มีด้วยกันหลายชนิด เช่น ความหนืด แรงตึงผิว ขนาดอนุภาคเฉลี่ย การแห้งของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสมบัติต่างๆจะขึ้นอยู่กับสารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.1.2 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนผสมของสารดังต่อไปนี้ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอน สารละลายเนฟิออน ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สารละลาย 1,2 โพรเพนไดออล สารละลายเอทิลีนไกลคอล สารละลายไอโซโพรพานอล (Iso-propanol) และน้ำปราศจากประจุ โดยกำหนดอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารละลายเนฟิออน คงที่ที่ร้อยละ 33 ของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา และทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารละลาย 1,2 โพรเพนไดออล สารละลายไอโซโพรพานอล สารละลายเอทิลีนไกลคอล และน้ำปราศจากประจุ เมื่อได้หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว จึงทดสอบหาค่าความหนืดและแรงตึงผิว เพื่อหาสูตรของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติของความหนืดและค่าแรงตึงผิวที่เหมาะสมตามความต้องการของการพิมพ์ โดยสารแต่ละชนิดจะมีสมบัติของความหนืดและค่าแรงตึงผิวแตกต่างกันไปตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงตึงผิวและความหนืดของสารละลายที่ใช้ทดสอบการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด

ชนิดของสาร	แรงตึงผิว dyn/cm	ความหนืด (cP)
1,2 โพรเพนไดออล	72	54
ไอโซโพรพานอล	21.4	2.4
น้ำปราศจากประจุ	72.8	1
1,2-ไดเมทอกซีอีเทน	20	1.1
เอทิลีนไกลคอล	48.4	16.1

ในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ได้กำหนดปริมาณรวมของส่วนประกอบของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 12 -15 มิลลิลิตร เพื่อให้สามารถเติมลงในตลับหมึกพิมพ์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ได้อย่างพอเหมาะและเติมสารละลาย 1,2 โพรเพนไดออล สารละลายเอทิลีนไกลคอล สารละลายไอโซโพรพานอล เพื่อปรับสมบัติของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ได้สมบัติตามต้องการ จากตารางที่ 4.2 หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาในสูตรทั้งหมดจะกำหนดให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและสารละลายเนฟิออนคงที่ และเปลี่ยนอัตราส่วนตามต้องการ

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนของสูตรหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ส่วนประกอบ	สูตรเดิม	สูตรใหม่หนึ่ง	สูตรใหม่สอง
ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	0.05	0.05	0.05
สารละลายเนฟิออน (มล.)	0.568	0.568	0.568
1,2-ไดเมทอกซีอีเทน (มล.)	1.5	-	-
เอทิลีนไกลคอล (มล.)	4	-	-
1,2 โพรเพนไดออล (มล.)	-	6	4
น้ำปราศจากประจุ (มล.)	7	6	4
ไอโซโพรพานอล (มล.)	-	-	4

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงตึงผิวและความหนืดของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

ส่วนประกอบ	สูตรเดิม	สูตรใหม่หนึ่ง	สูตรใหม่สอง	ค่าที่เหมาะสม
ค่าความหนืด (cP)	≈3.23	≈12.19	≈10.58	10-12
แรงตึงผิว (dyn/cm)	≈33.8	≈38.8	≈31.9	28-36

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 จะแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนของสารละลายต่างๆ เปลี่ยนไป ค่าแรงตึงผิวและความหนืดของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ในการเลือกใช้อัตราส่วนหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา จะคำนึงถึงค่าที่เหมาะสมของเครื่องพิมพ์ที่ใช้เป็นหลัก ซึ่งหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ สามารถละลายตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ค่าแรงตึงผิวและความหนืดที่พอเหมาะ และไม่มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากสูตรหมึกที่ได้ทั้งสองแบบ สามารถพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Fujifilm Dimatix Materials Printer ได้ทั้งคู่ สูตรใหม่หนึ่งจะมีความสามารถในการสร้างหยดหมึกได้สูงกว่า สร้างผิวหน้าของชั้นตัวเร่งได้ดีกว่า แต่ถ้าหากพิมพ์ลงบนเมมเบรนจะผลต่อการแห้งงอได้สูงกว่า อันเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่สูงกว่า สูตรใหม่สองจึงมีความเหมาะสมต่อการพิมพ์ลงบนเมมเบรนมากกว่าสูตรใหม่หนึ่ง

4.1.3 อิทธิพลของแอลกอฮอล์ในหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากงานวิจัยของวิฑูรย์ [44] ที่มีการศึกษาถึงผลของแอลกอฮอล์ที่เติมลงในหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง เนื่องด้วยแอลกอฮอล์ที่มีมวลโมเลกุลสูง และมีพันธะซับซ้อน โมเลกุลของแอลกอฮอล์จำพวกนี้ จะระเหยได้ยากและเกิดการตกค้างในตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะมีผลต่อการนำอิเล็กตรอนและไอออนที่เกิดขึ้นภายในระบบ อีกทั้งยังขัดขวางการกำจัดที่เกิดขึ้นในระบบ ในงานวิจัยนี้เมื่อมีการเติมมีการผสมสารละลาย 1,2 โพรเพนไดออล ในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา จึงจำเป็นต้องกำจัดแอลกอฮอล์ที่เหลือทิ้ง เพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของเซลล์เชื้อเพลิง โดยการแช่ในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อกำจัดแอลกอฮอล์ออก จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ก่อนจะนำไปประกอบเป็นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า

4.2 การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่พิมพ์อิงก์เจ็ตแล้ว

4.2.1 เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียม

ในการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า มีการเลือกลักษณะของการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ตให้มีความหนาแน่นคาร์บอนนอกไซด์ด้วยกัน 4 รูปแบบ คือ

MEA I เป็นการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต โดยการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนผงคาร์บอนด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนชั้นแพร์แก๊ส (GDL) จนกระทั่งมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร หลังจากนั้นจึงประกอบเข้ากับเมมเบรน ได้เป็นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (ภาพที่ 4.1(ก))

MEA II เป็นการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต โดยการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนผงคาร์บอนด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนวัสดุรองรับ จนกระทั่งมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร หลังจากนั้นจึงถ่ายโอนรูปลอกซ์ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมายังเมมเบรน แล้วจึงประกอบเข้ากับชั้นแพร์แก๊ส (GDL) ได้เป็นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (ภาพที่ 4.1(ข))

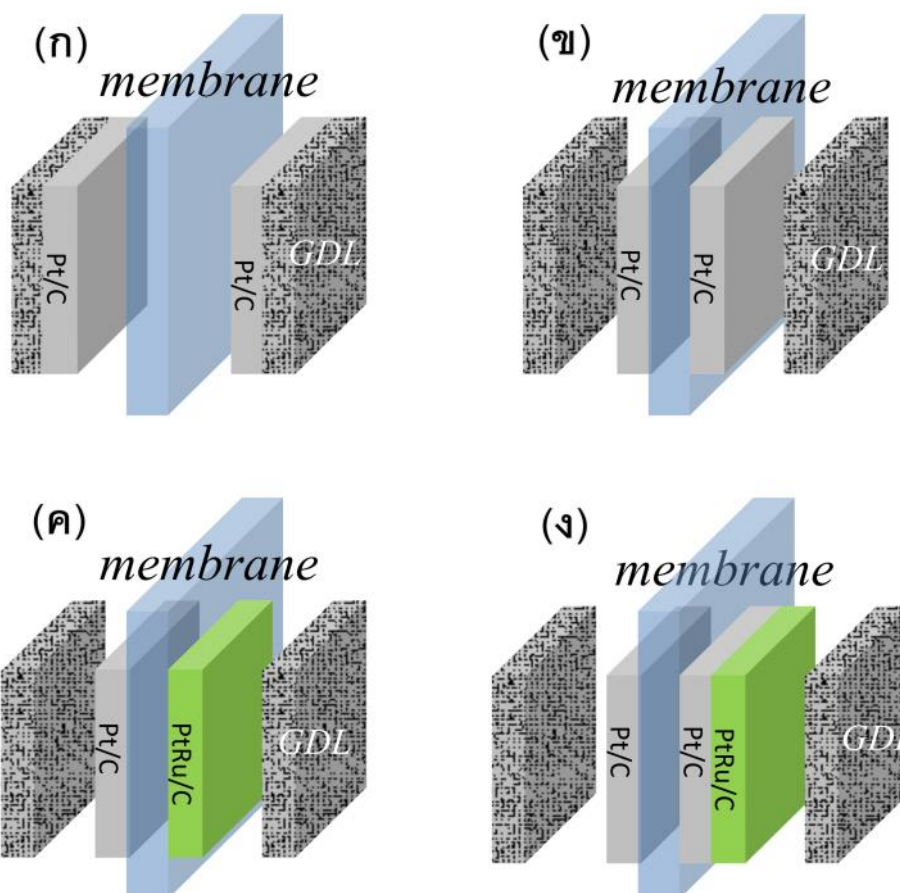
MEA III เป็นการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต โดยการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนผงคาร์บอนด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนวัสดุรองรับ จนกระทั่งมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร หลังจากนั้นจึงถ่ายโอนรูปลอกซ์ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมมายังเมมเบรน แล้วจึงประกอบเข้ากับชั้นแพร์แก๊ส (GDL) ได้เป็นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (ภาพที่ 4.1(ค))

MEA IV เป็นการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการถ่ายโอนรูปลอกซ์ไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต โดยการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนผงคาร์บอนด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนวัสดุรองรับ จนกระทั่งมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.075 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนผงคาร์บอนด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนวัสดุรองรับ จนกระทั่งมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.075 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรเช่น หลังจาก

นั้นจึงถ่ายโอนรูปลอกตามลำดับ ด้วยชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนรูทีเนียมมายังเมมเบรน แล้วจึงประกอบเข้ากับชั้นแพร่แก๊ส (GDL) ได้เป็นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (ภาพที่ 4.1(ง))

ตารางที่ 4.4 ลักษณะของ MEA แต่ละชนิด

ชนิด	ขั้วแคโทด	ขั้วแอโนด	บน
MEA I	Pt	Pt	ชั้นแพร่แก๊ส
MEA II	Pt	Pt	เมมเบรน
MEA III	Pt	PtRu	เมมเบรน
MEA IV	Pt	Pt/PtRu	เมมเบรน



ภาพที่ 4.1 รูปแบบของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้แต่ละแบบ

4.2.2 การพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับ

เมื่อเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาจนมีสมบัติใกล้เคียงกับหมึกพิมพ์ทางการค้าแล้ว ได้พิมพ์หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนลงบนวัสดุรองรับ โดยใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Fujifilm Dimatix Materials Printer เป็นเครื่องอิงค์เจ็ทที่ใช้ระบบหัวพิมพ์แบบแรงดันโวลต์ขับเคลื่อน (Piezo-driven jetting device) โดยการพิมพ์หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นวัสดุรองรับซ้อนทับกันจนได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามต้องการคือ 0.15 มิลลิกรัมแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร โดยจะควบคุมจากปริมาณหยดหมึกพิมพ์ที่ออกมา และแปรผลออกมาในรูปของจำนวนครั้งของการพิมพ์ซ้อนทับกัน พบว่า เมื่อมีการพิมพ์ซ้อนทับกันประมาณ 50 ครั้ง จะมีน้ำหนักเฉลี่ยของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงทำให้สามารถคาดคะเนจำนวนครั้งในการพิมพ์สำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าให้ได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามต้องการได้จากน้ำหนักเฉลี่ยต่อจำนวนครั้งการพิมพ์ ทำให้เกิดความรวดเร็วในการเตรียมขั้วไฟฟ้าและไม่ทำให้เกิดปัญหาการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเกินความต้องการ ทำให้การเตรียมครั้งต่อไปไม่ต้องผ่านขั้นตอนอบแห้งและการซังน้ำหนักเหมือนวิธีการทาและวิธีสเปรย์ ซึ่งต้องอบและซังซ้ำจนกว่าจะได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามต้องการ

4.2.3 การถ่ายโอนรูปลอก

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการโอนรูปลอกนั้น ต้องคำนึงปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น ความดัน อุณหภูมิ เวลาในการบีบอัด ฯลฯ ซึ่งปัจจัยจะขึ้นกับภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการถ่ายโอนรูปลอกทั้งหมด ทั้งปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของสารละลายที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การแห้งของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้บนเทพลอน

- **ความดัน** ความดันโดยปกติทั่วไป ที่ใช้กันอยู่จะต้องใช้ความดันที่น้อยที่สุด ที่ทำให้ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่ายโอนลงบนเมมเบรนได้ เพราะถ้าความดันที่มากเกินไปจะมีผลความเป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมไปถึงสภาพต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ความพรุน ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ความดันที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ประมาณ 30 บาร์ ซึ่งค่าความดันอาจจะมีการเปลี่ยนไป อันเนื่องมาจากความหนา หรือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้น

- **อุณหภูมิ** อุณหภูมิจะมีผลต่อการขยายตัวของวัสดุรองรับและเมมเบรน จึงส่งผลในเรื่องของการถ่ายโอนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจากวัสดุรองรับมายังเมมเบรน ในเรื่องของการหดตัวและขยายตัวของเนื้อเมมเบรน
- **ระยะเวลาที่ใช้** เวลาที่ใช้จะมีความเหมาะสมตามความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา และความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา
- **วัสดุรองรับในการพิมพ์** วัสดุที่เลือกใช้เป็นตัวรองรับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น สามารถเลือกใช้ได้หลายแบบ ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะตัวของแต่ละวัสดุนั้นๆ โดยวัสดุที่เลือกมาใช้นั้น ต้องสามารถทนอุณหภูมิ และความดันที่ต้องการใช้ได้ รวมไปถึงในเรื่องของความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic หรือ Hydrophobic) เพราะจะมีผลในเรื่องของการพิมพ์ลงบนตัวรองรับ และการกดอัดเพื่อถ่ายโอนรูปลูก วัสดุที่ใช้ทั่วไปมีอยู่หลายประเภท เช่น แผ่นเทฟลอน (PTFE) แผ่นไมลาร์ ฯลฯ
- **ปริมาณความชื้นในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับ** ความชื้นที่เหมาะสมจะมีผลต่อการถ่ายโอนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแห้งเกินไป ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกาะกันบนชั้นของวัสดุรองรับ ทำให้ยากต่อการถ่ายโอน

ในการทดลองการถ่ายโอนรูปลูกนั้น จะเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมพิมพ์อิงค์เจ็ท ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรบนวัสดุรองรับแผ่นเทฟลอน โดยทดสอบสภาวะที่เหมาะสมต่างๆ ทั้งความดัน อุณหภูมิ ระยะเวลา ฯลฯ

จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการถ่ายโอนรูปลูก ของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมพิมพ์อิงค์เจ็ท ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังนี้

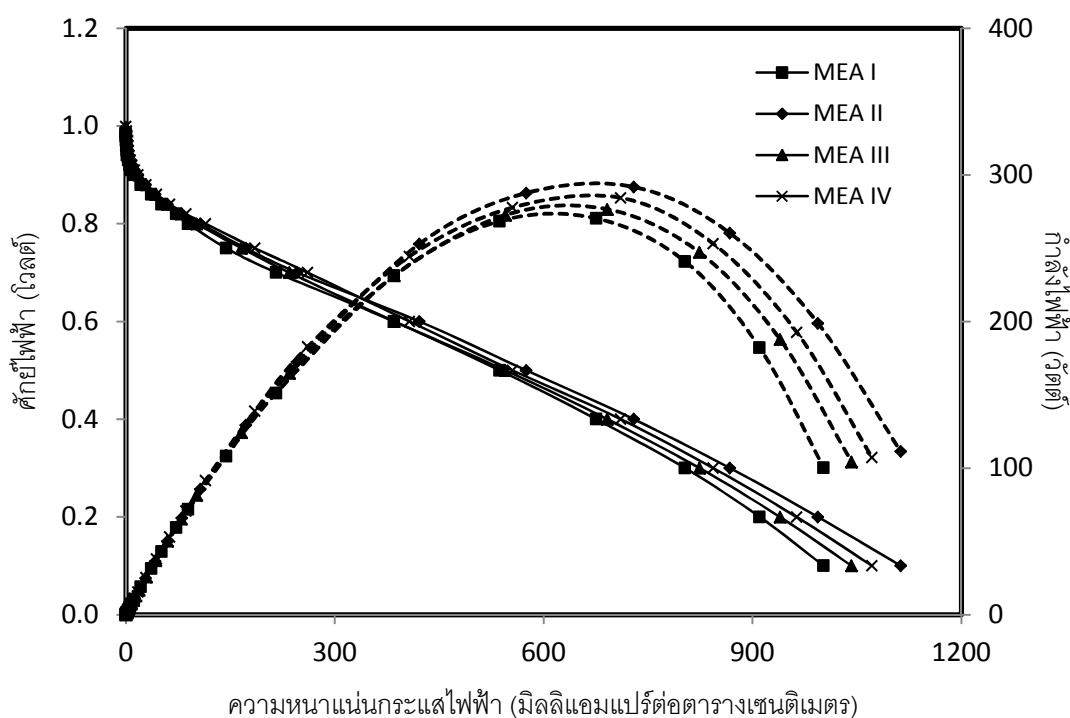
- ความดันที่ใช้ในการกดอัด 30 บาร์
- เวลาที่ใช้ในการกดอัด 5 นาทีกดอัดเย็น 2 นาที
- อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส
- วัสดุรองรับ เทฟลอน
- ปริมาณความชื้นในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับ อย่างน้อย 2%โดยน้ำหนัก

4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละแบบเตรียมได้

หลังจากที่เตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ชนิดได้เรียบร้อยแล้ว จึงทดสอบผลต่างๆ ที่เกิดขึ้น ทั้งวิเคราะห์สมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า วิเคราะห์พื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า วิเคราะห์ความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า วิเคราะห์ความพรุนของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า และวิเคราะห์ภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังนี้

4.3.1 สมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า

ในการทดลองหาสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า จะศึกษาสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิง ด้วยสถานีทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงข้างต้นได้ผลดังนี้



ภาพที่ 4.2 สมรรถนะ (—) และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ชนิดต่างๆ (■) MEA I (◆) MEA II (▲) MEA III และ (X) MEA IV

ตารางที่ 4.5 ค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละแบบ

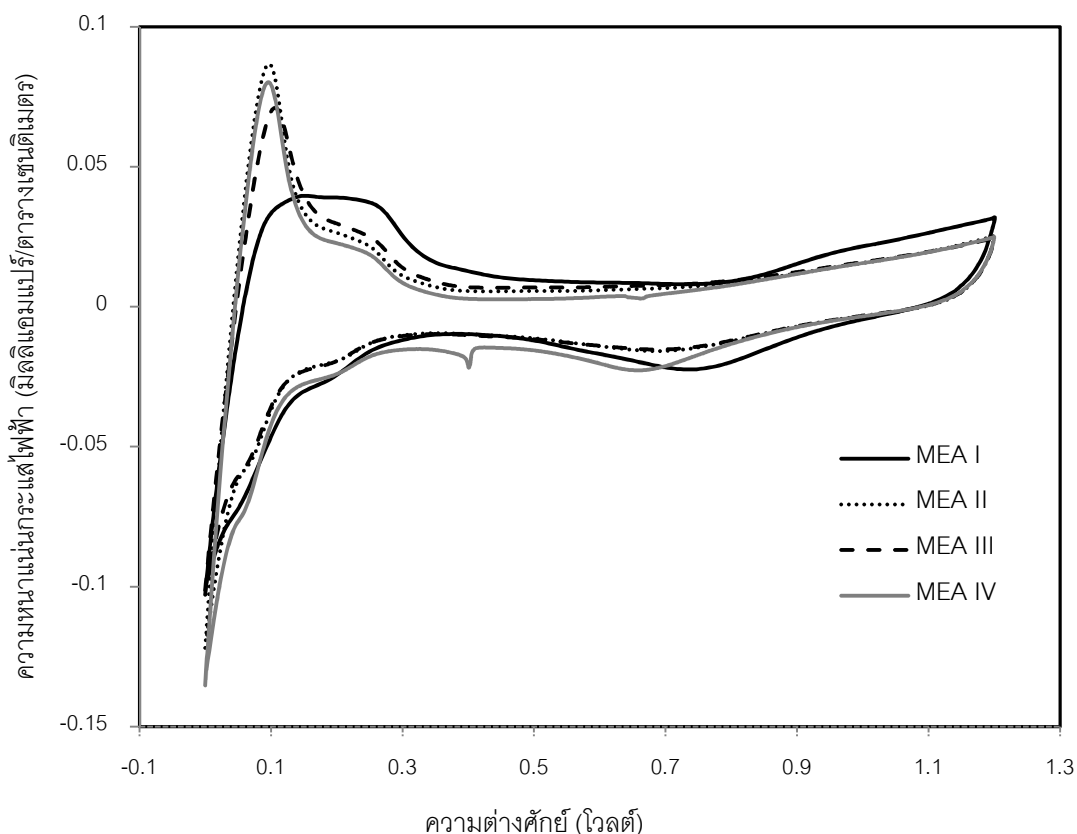
ค่าต่างๆ	MEA I	MEA II	MEA III	MEA IV
ความต่างศักย์วงจรเปิด (โวลต์)	0.986	0.994	0.998	1.000
ความหนาแน่นกระแส ที่ 0.6 (mA/cm ²)	385.3	421.4	385.4	419.5

จากภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำๆ โดยมีความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาหรือแอคติเวชัน (Activation loss) น้อยกว่า และในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น โดยพบว่ามีความต้านทานโอห์มมิกน้อยกว่าเช่นเดียวกัน ตามลำดับดังนี้ MEA I < MEA III < MEA IV < MEA II ซึ่งเป็นผลมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนรูทีเนียม จึงทำให้เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมสูงที่สุด จะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด และเมื่อเทียบในเรื่องของวิธีการเตรียมเมมเบรนไฟฟ้าที่ต่างกันระหว่าง MEA I ที่เตรียมโดยการพิมพ์ลงบนชั้นแพร์แก๊สกับ MEA II ที่เตรียมโดยการถ่ายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต จากผลการทดลองพบว่า MEA II ที่เตรียมโดยการถ่ายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า MEA I ที่เตรียมโดยการพิมพ์ลงบนชั้นแพร์แก๊ส ทั้งความต่างศักย์วงจรเปิด และความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ อันเนื่องมาจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการถ่ายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้าหลังจากการพิมพ์อิงก์เจ็ตนั้น มีความเรียบและสม่ำเสมอของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ลดความต้านทานการเกิดปฏิกิริยา และความต้านทานโอห์มมิกจะลดลง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจึงเพิ่มขึ้น รวมไปถึงการกำจัดน้ำหรือความชื้นในระบบ ซึ่งปริมาณน้ำหรือความชื้นที่มากขึ้นนี้อาจส่งผลให้ไปขัดขวางการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากด้านแอโนดไปยังด้านแคโทดในบริเวณชั้นแพร์แก๊ส ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ลดลงซึ่งส่งผลต่อช่วงของโอห์มมิก อีกทั้งน้ำหรือความชื้นนี้อาจขัดขวางการแพร่ของแก๊สเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา แก๊สเชื้อเพลิงจึงเข้าถึงชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนได้ลดลง ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้จึงลดลง

4.3.2 พื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า

การวิเคราะห์พื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้นั้น จะใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท AUTOLAB โดยตั้งค่าการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ไซคลิกโวลแทมเมทรี ในช่วงค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 0 โวลต์ถึง 1.2

โวลต์ ด้วยอัตราเร็วในการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อนาที และทำการวิเคราะห์ 20 รอบ และทำการเก็บข้อมูลในรอบที่ 20 ได้ผลดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 การทดสอบไซคลิกโวลแทมเมทรีของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ
(—) MEA I (.....) MEA II (- -) MEA III และ (—) MEA IV

ตารางที่ 4.6 ค่า Active surface area โดยเฉลี่ยจากการทดสอบไซคลิกโวลแทมเมทรีของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ

ชนิดของ MEA	Area (C)	Charge (mC/cm ²)	EAS (m ² /g _{pt})
MEA I	0.1845	36900	117.1429
MEA II	0.2071	41420	131.4921
MEA III	0.1875	37500	119.0476
MEA IV	0.1975	39500	125.3968

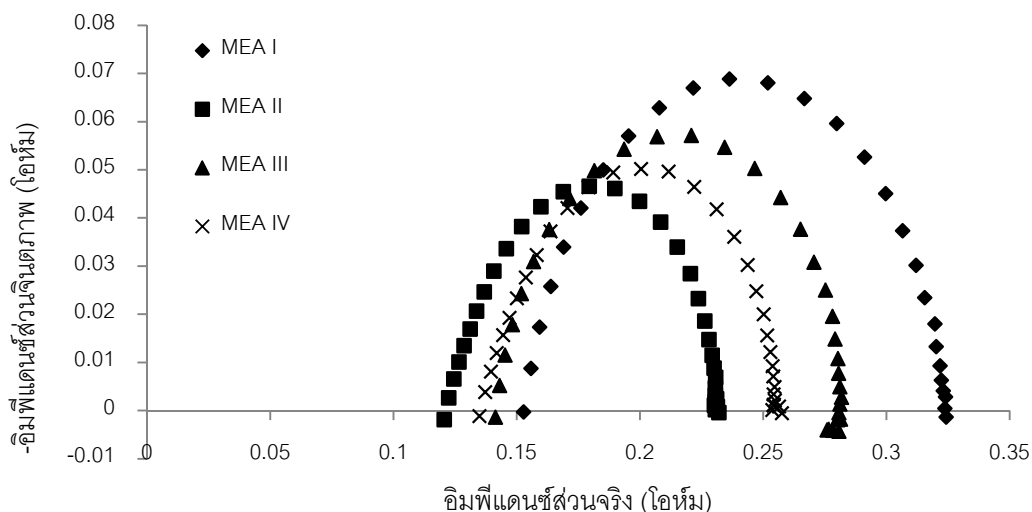
จากผลการทดสอบโพลาริเซชันที่ได้พบว่า มีความสอดคล้องกับผลของพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของของแต่ละชนิด MEA โดยพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของ MEA ทั้ง 4 ชนิดแสดงดังตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.3 ซึ่งคำนวณได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟของการคายซับของไฮโดรเจนหรือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน จากนั้นนำไปคำนวณหาพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาดังสมการ ก.1 ในภาคผนวก ก พบว่า พื้นที่การเกิดปฏิกิริยาเรียงลำดับได้ดังนี้ $MEA I < MEA III < MEA IV < MEA II$ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลสมรรถนะ ในเรื่องของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียม เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมสามารถเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีและเร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยารูทีเนียมมาก [69] เมื่อปริมาณของรูทีเนียมเพิ่มขึ้น ปริมาณของแพลทินัมจะลดลง ทำให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาลดลง และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการถ่างโหนดรูปลูกั่วไฟฟ้าหลังจากการพิมพ์อิงก์เจ็ทนั้น มีความเป็นระเบียบของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้การเข้าและออกของแก๊สทำได้ง่ายและดีกว่า

4.3.3 การวัดความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า

การวิเคราะห์พื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้นั้น จะใช้โปรแกรม FRA ในเครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท AUTOLAB โดยตั้งค่าการทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ความต้านทาน ในที่ความถี่ตั้งแต่ 0.7 โวลต์ ด้วยอัตราเร็วในการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อนาที และทำการวิเคราะห์ 4 รอบ แล้วหาค่าเฉลี่ย ได้ผลดังภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทานเฉลี่ยของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ

ชนิดของ MEA	ศักย์ไฟฟ้า วงจรเปิด (โวลต์)	ความต้านทาน	
		ความต้านทานโอห์มมิก (โอห์ม)	ความต้านทานจากการถ่าง โหนดประจุ(โอห์ม)
MEA I	0.986	0.1546	0.1694
MEA II	0.994	0.1215	0.1102
MEA III	0.998	0.1423	0.1391
MEA IV	1.000	0.1354	0.1221

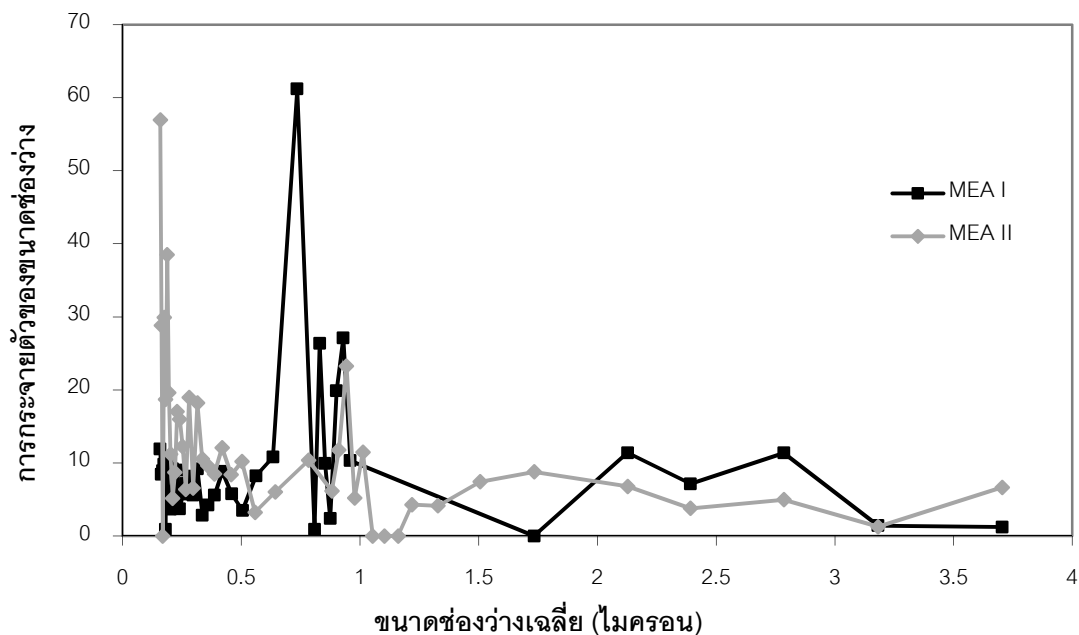


ภาพที่ 4.4 กราฟ Nyquist plot ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์
(◆) MEA I (■) MEA II (▲) MEA III (×) MEA IV

จากการทดสอบอิมพีแดนซ์ ดังภาพที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 พบว่า ความต้านทานโอห์มมิก และความต้านทานจากการถ่ายโอนประจุ เรียงลำดับได้ดังนี้ MEA II < MEA IV < MEA III < MEA I สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ขั้นตอนเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการถ่ายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้า หลังจากการพิมพ์อิงก์เจ็ตนั้น มีความเป็นระเบียบของขั้นตอนเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้การเข้าและออกของแก๊สทำได้ง่ายและดีกว่า รวมถึงขั้นตอนเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้อยู่ใกล้เมมเบรนมากกว่าการเตรียมขั้นตอนเร่งปฏิกิริยาบนชั้นแพร์แก๊ส จึงทำให้การถ่ายโอนประจุที่เกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้มากขึ้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดีขึ้น ส่งผลให้เกิดความต้านทานโอห์มมิกลดลง อีกทั้งความเป็นระเบียบของขั้นตอนเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้แก๊สเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลง

4.3.4 การวัดความพรุนของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า

การวัดความพรุนของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยเครื่อง Porosity meter นั้น มีการควบคุมความดันและอัตราการไหลของแก๊สที่ผ่านวัสดุที่นำมาทดสอบ โดยผลที่ออกมาจะแสดง ในรูปของขนาดช่องว่าง เฉลี่ยและปริมาณการกระจายตัวของช่องว่างนั้นๆ

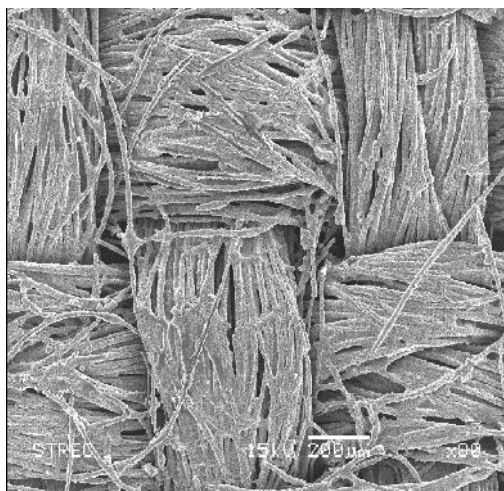


ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงขนาดช่องว่างเฉลี่ยกับการกระจายตัวของขนาดช่องว่างของ
(■) MEA I (◆) MEA II

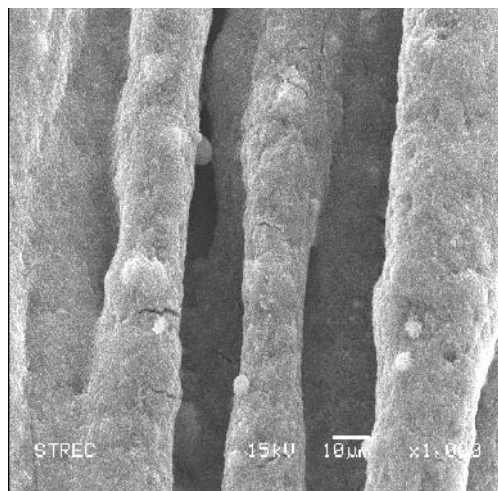
จากภาพที่ 4.5 MEA II ที่เตรียมได้จากการถ่ายโอนรูปดอกข้าวไฟฟ้าหลังจากการพิมพ์อิงก์เจ็ตนั้นมีการกระจายตัวของขนาดช่องว่างที่ขนาดเล็กๆ มากกว่า MEA I ที่เตรียมได้จากการพิมพ์อิงก์เจ็ตชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นแพร์แก๊ส ซึ่งเป็นผลจากการถ่ายโอนรูปดอกข้าวไฟฟ้า ทำให้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีความบาง และความสม่ำเสมอของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงเป็นทำให้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีช่องว่างขนาดเล็กเพียงพอสำหรับแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายยิ่งขึ้น

4.3.5 การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

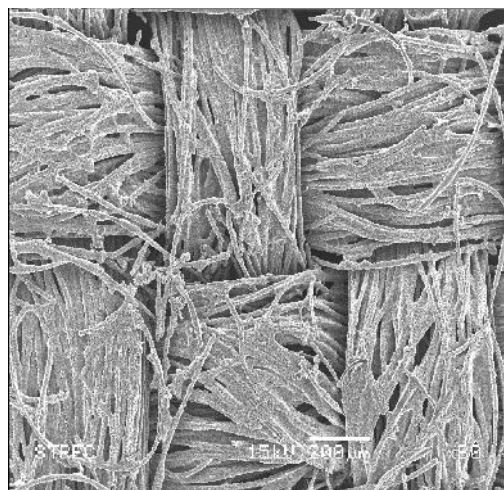
เมื่อเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่างๆ เรียบร้อยแล้ว จึงวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM 5800 LV ของบริษัท Jeol เพื่อศึกษารูปร่างลักษณะของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เตรียมได้จากการถ่ายโอนรูปดอกข้าวไฟฟ้า ที่เตรียมได้จากการพิมพ์อิงก์เจ็ตบนชั้นแพร์แก๊ส และบนวัสดุรองรับ ที่เตรียมได้จากการสเปรย์บนชั้นแพร์แก๊ส



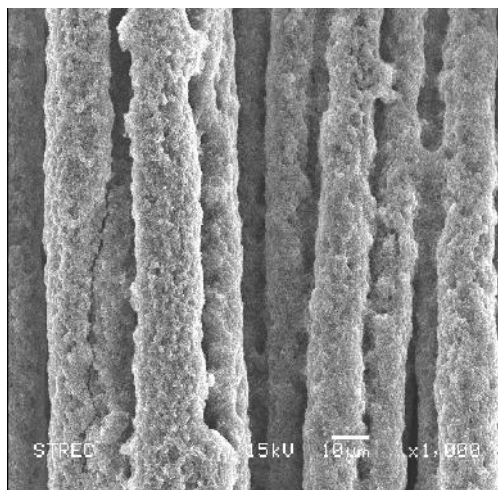
(n)



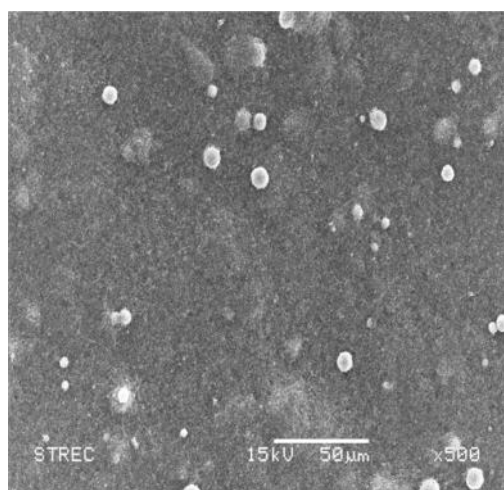
(ni)



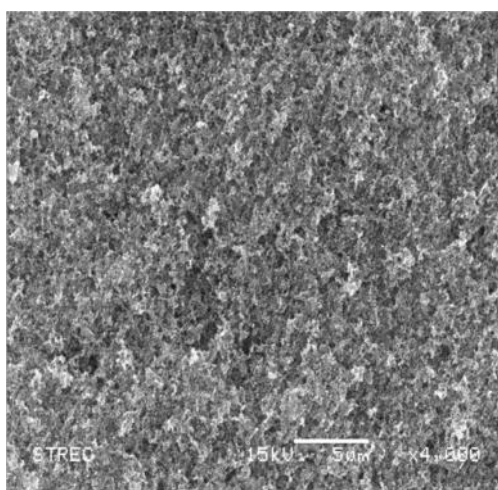
(ni)



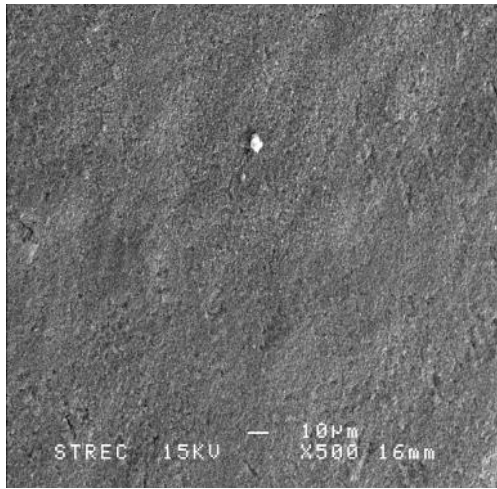
(nii)



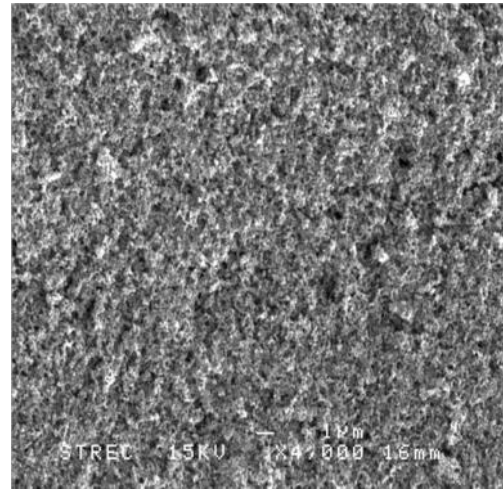
(nj)



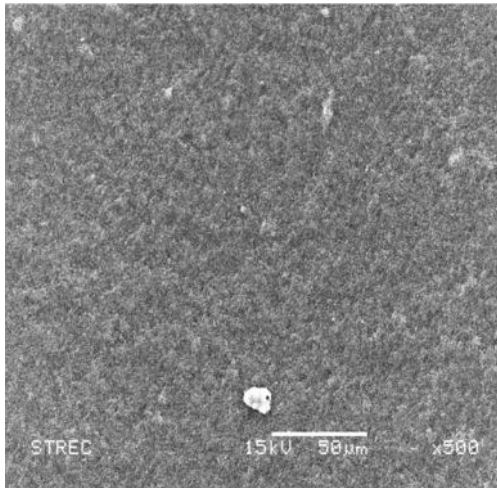
(nii)



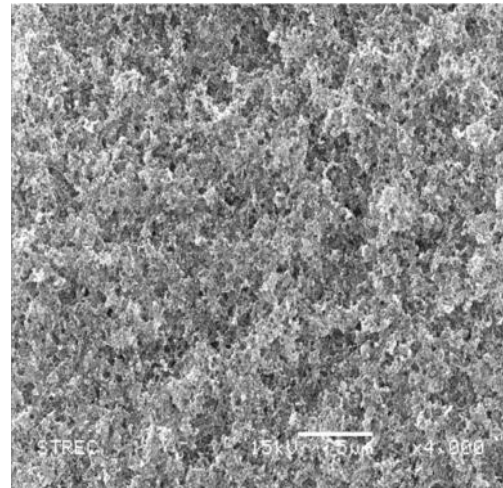
(අ)



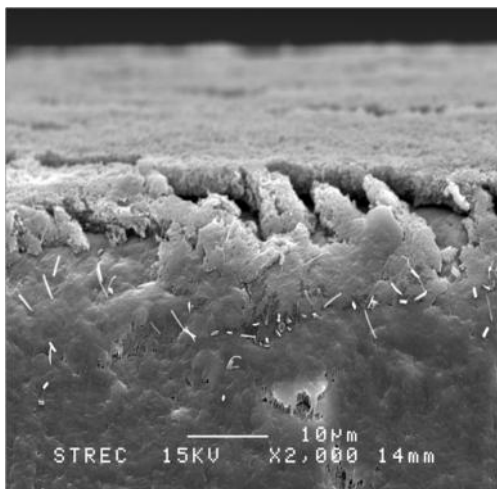
(ආ)



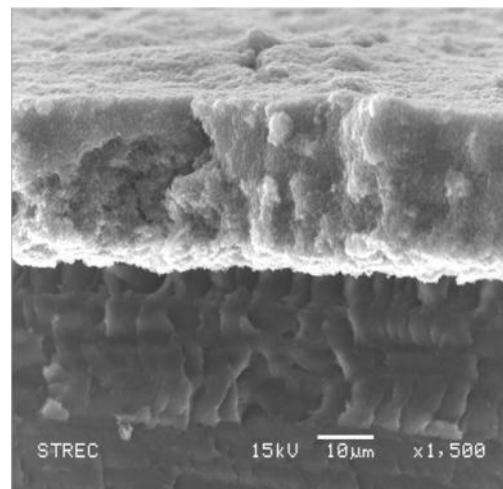
(ඇ)



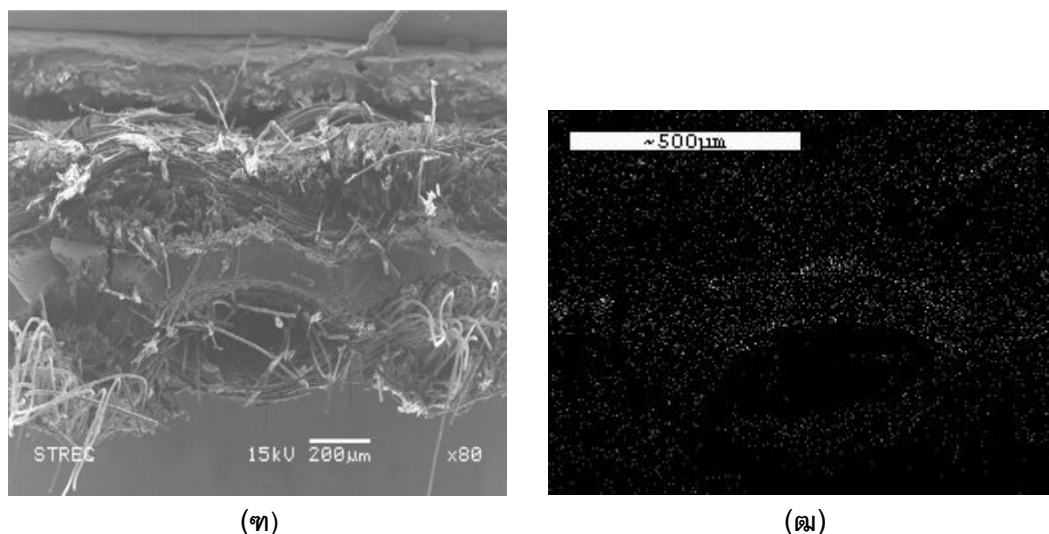
(ඈ)



(ඉ)



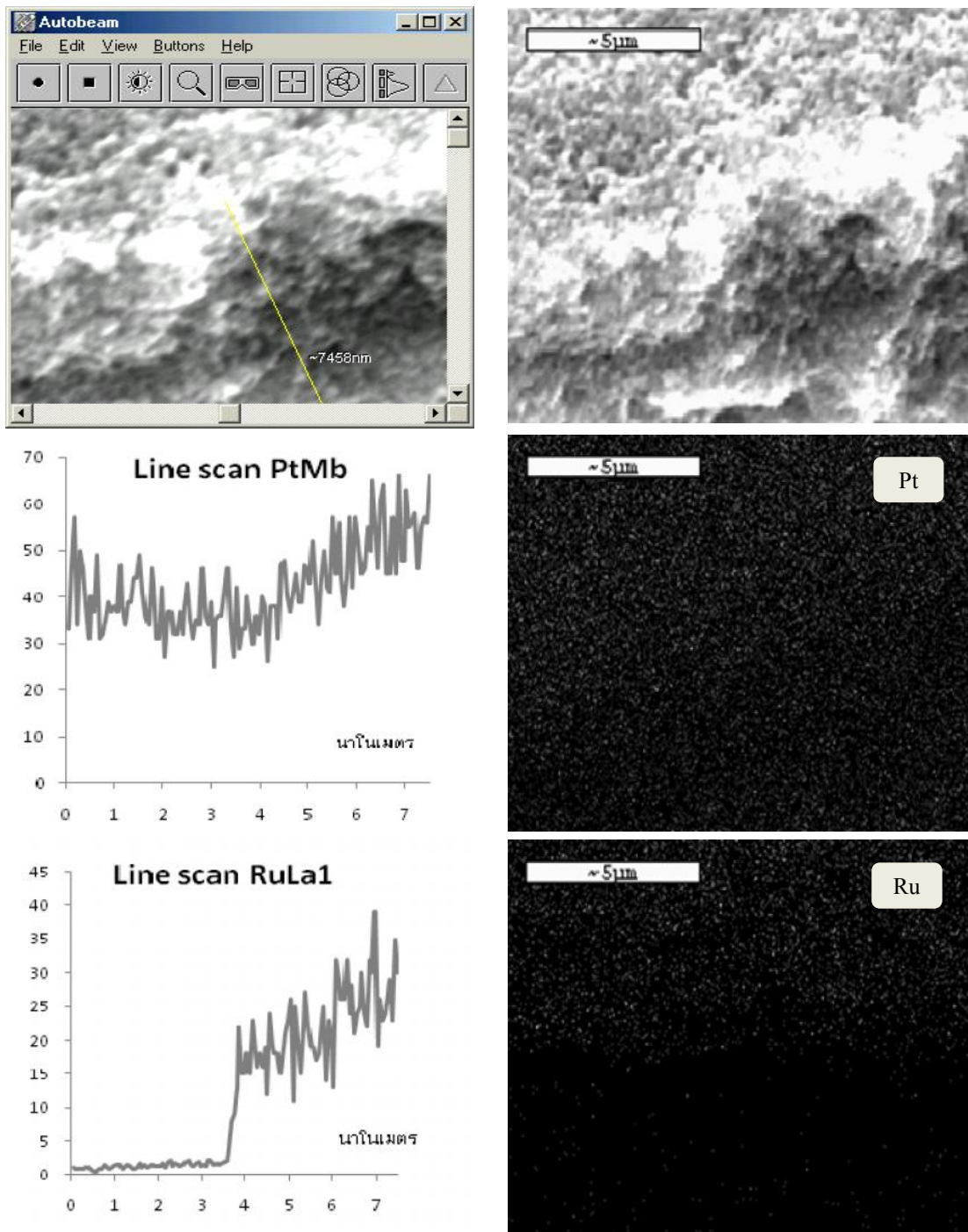
(ඊ)



ภาพที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM/EDX ของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างๆ (ก) 80 เท่า (ข) 1000 เท่า ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการสเปรย์ลงบนชั้นแพร์แก๊ส (ค) 80 เท่า (ง) 1000 เท่า ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการพิมพียงก์เจ็ดบนชั้นแพร์แก๊ส (จ) 500 เท่า (ฉ) 4000 เท่า พื้นผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการสเปรย์ลงบนเมมเบรน (ช) 500 เท่า (ซ) 4000 เท่า พื้นผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการพิมพียงก์เจ็ดบนเทฟลอน (ณ) 500 เท่า (ญ) 4000 เท่า พื้นผิวชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการถ่ายโอนรูปลอกหลังพิมพียงก์เจ็ด (ฎ) ภาพถ่ายตัดขวางชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการพิมพียงก์เจ็ดบนวัสดุรองรับ (ฏ) ภาพถ่ายตัดขวางชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการถ่ายโอนรูปลอกหลังพิมพียงก์เจ็ด (ท) และ (ฒ) ภาพถ่าย Mapping แสดงการกระจายตัวของโลหะแพลทินัม

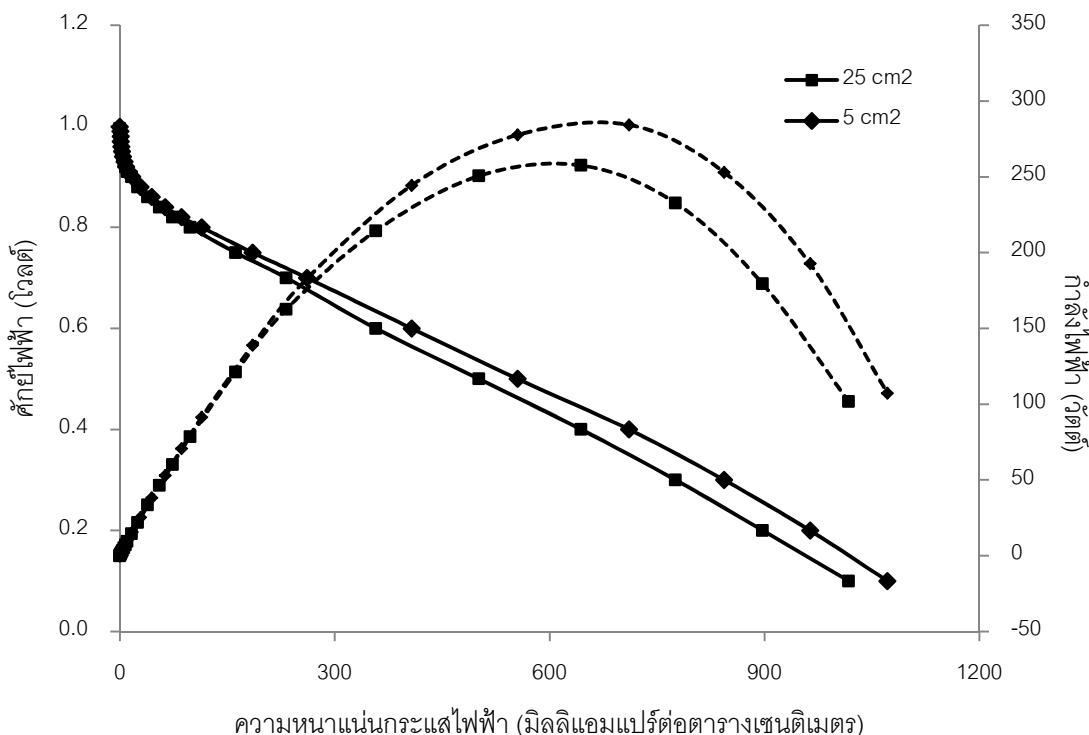
จากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการพิมพียงก์เจ็ดและการสเปรย์มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยการเตรียมชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการสเปรย์จะมีการเกาะกันเป็นกลุ่มเป็นก้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งต่างจากชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการพิมพียงก์เจ็ดที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ และมีการยึดเกาะกับผ้าคาร์บอนได้ดีกว่าการเตรียมโดยการสเปรย์

และจากภาพที่ 4.7 แสดงชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการถ่ายโอนรูปลอกหลังพิมพียงก์เจ็ดตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 1 ชั้น และตามด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมอีก 1 ชั้น จะเห็นได้ว่าชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองมีการกระจายตัวได้ดีบนเมมเบรนและแต่ละชั้นแยกออกจากกันอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM/EDX แสดงการแยกออกเป็นชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัม และ ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัทรูทีเนียม สำหรับ MEA IV

4.3.6 การขยายขนาด MEA IV จาก 5 เป็น 25 ตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 4.8 สมรรถนะ (—) และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า 2 ชั้น (MEA IV) โดยการถ่ายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้าหลังจากการพิมพ์อิงก์เจ็ตที่ขนาดพื้นที่การเกิดปฏิกิริยา (■) 25 ตารางเซนติเมตร (◆) 5 ตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4.8 ค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า 2 ชั้น (MEA IV) ที่ขนาดพื้นที่การเกิดปฏิกิริยา 25 ตารางเซนติเมตร และ 5 ตารางเซนติเมตร

	5 cm ²	25 cm ²
()	0.994	0.996
mA/cm ²	421.4	357.4

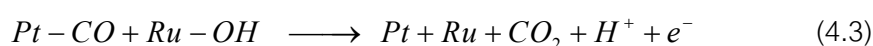
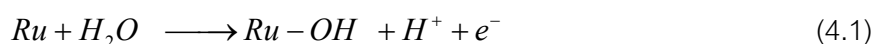
จากภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.7 จะพบว่า ขั้นตอนการขยายขนาดเป็น 25 ตารางเซนติเมตร โดยการถ่ายโอนรูปลอกหลังพิมพ์อิงก์เจ็ต มีความต่างศักย์วงจรเปิดใกล้เคียงกับขนาด 5 ตารางเซนติเมตร แต่ยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า อันเนื่องจากภาวะที่ใช้ในการถ่ายโอน

รูปลอกยังไม่เหมาะสมพอดีสำหรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นซึ่งควรมีการพัฒนาเพื่อหา
ภาวะที่เหมาะสมต่อไปโดยอาจจะเป็นการปรับเวลา อุณหภูมิหรือความดัน

4.4 ผลการเปรียบเทียบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า แต่ละแบบเตรียมได้ทดสอบ

หลังจากที่เตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการถ่ายโอนรูปลอก
หลังพิมพ์อิงก์เจ็ตแล้ว ทั้งสามแบบ (MEA II MEA III และ MEA IV) จึงมีการทดสอบความทนต่อ
คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้น 20 60 และ 100 พีพีเอ็ม ทำการทดสอบประสิทธิภาพของ
เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้นี้ด้วยเทคนิคโพลาริเซชัน โดยใช้ภาวะในการทดสอบ
เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น แต่เปลี่ยนแก๊สเชื้อเพลิงทางด้านแอโนดเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่มีแก๊ส
คาร์บอนมอนอกไซด์ผสมอยู่ โดยทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการบันทึกผลที่ 30 นาที และ 1
ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการฟื้นฟูสภาพเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้านั้นๆ ด้วยการป้อนแก๊สไฮโดรเจน
เข้าทางด้านแอโนด และแก๊สออกซิเจนเข้าด้านแคโทด ที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 ลูกบาศก์
เซนติเมตรต่อนาที ที่ภาวะมาตรฐาน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

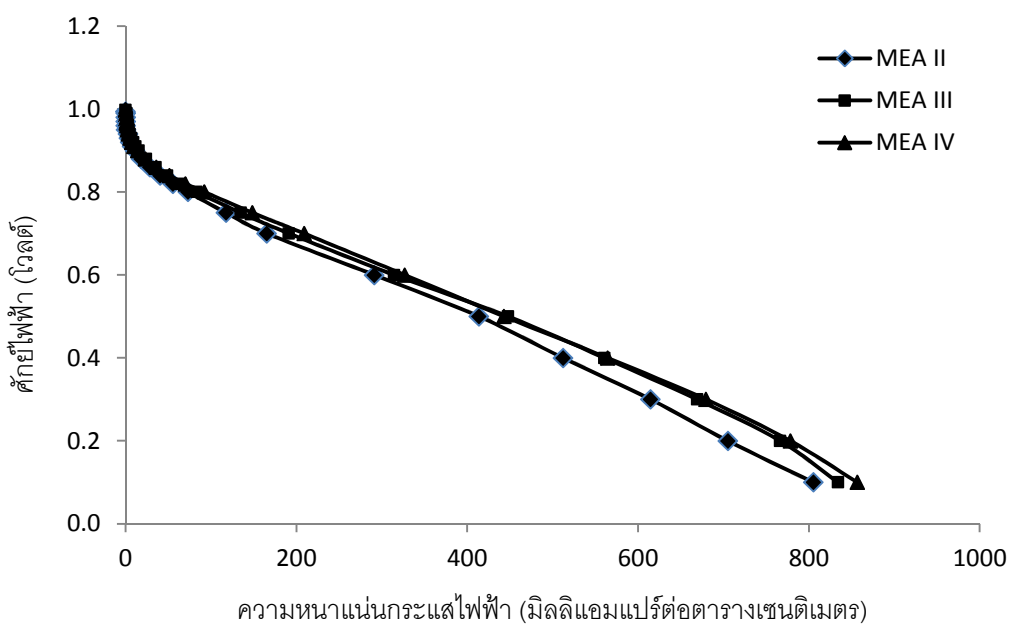
พบว่า เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมเตรียมนั้นมี
ประสิทธิภาพความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่ง
ปฏิกิริยาแพลทินัมบริสุทธิเพียงอย่างเดียว เนื่องจากโลหะรูทีเนียมนั้นจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยา
ออกซิเดชันของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ดูดซับอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมได้ที่มีความต่างศักย์
ต่ำกว่าโลหะแพลทินัม โดยหมู่ไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำที่อยู่ในเมมเบรนหรือไอน้ำ
ในหม้อความชื้น จะดูดซับอยู่บนผิวของโลหะรูทีเนียมเกิดเป็น Ru-OH ซึ่งหมู่ไฮดรอกไซด์นี้ทำ
หน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊ส
คาร์บอนมอนอกไซด์ที่ดูดซับอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม [49] โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดัง
สมการที่ 4.1-4.3 [50]



นอกจากนี้โลหะรูทีเนียมยังช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของแพลทินัม ส่งผลให้
พันธะระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับแพลทินัมอ่อนลง พลังงานในการดูดซับของแก๊ส

คาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง การปกคลุมของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจึงน้อยลง ทำให้แก๊สไฮโดรเจนสามารถดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนดีขึ้น

4.4.1 ทดสอบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 20 พีพีเอ็ม

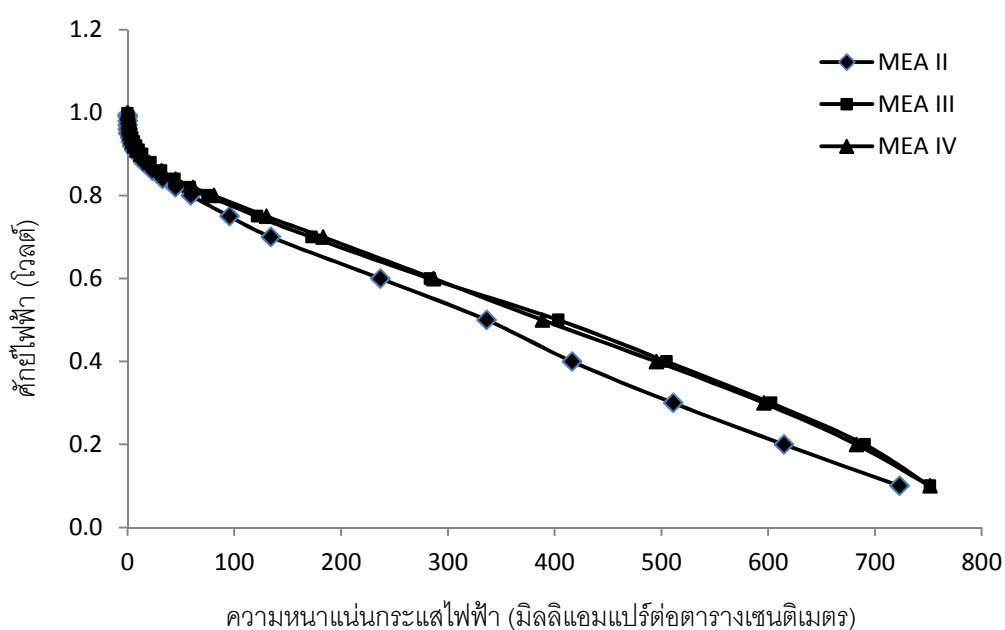


ภาพที่ 4.9 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 20 พีพีเอ็ม ที่เวลา 30 นาที (◆) MEA II (■) MEA III และ (▲) MEA IV

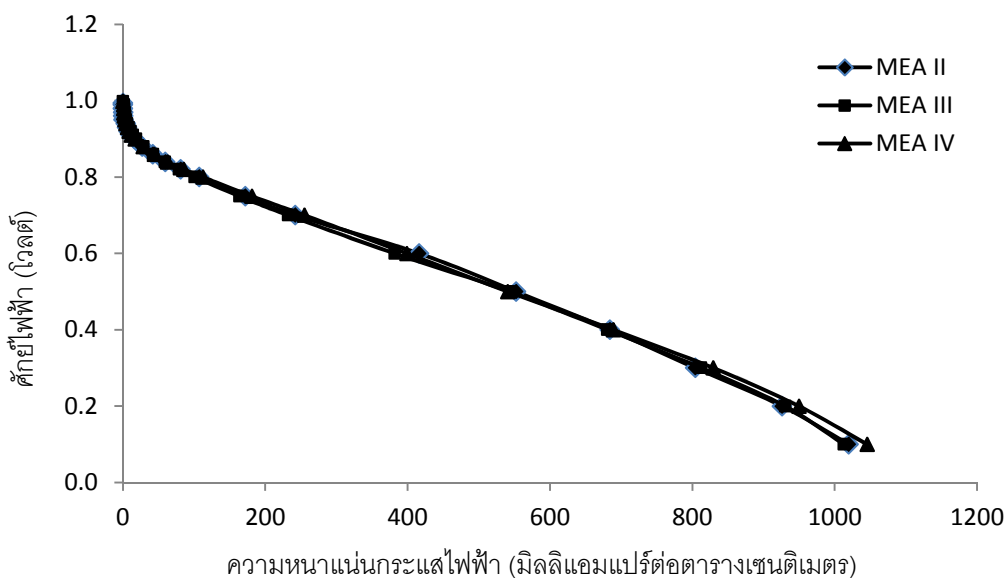
จากภาพที่ 4.9 และ 4.10 แสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ 2, 3 และ 4 เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 ppm เป็นเวลา 30 และ 60 นาที จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 แบบมีค่าลดลงโดยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ตกลงไปอย่างชัดเจนเนื่องจากการที่เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีเพียงชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมซึ่งจะถูกคาร์บอนมอนอกไซด์ยึดเกาะและเป็นการลดพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันส่งผลความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงซึ่งจะแตกต่างจากเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 และ 4 ที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมซึ่งรูทีเนียมที่จะคอยช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกไปจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมกลายเป็น

คาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันไม่ลดลงมากนักและ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงในปริมาณน้อยตามมา

และหลังจากที่มีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ จะเป็นการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 120 นาที แล้ววัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 4.11 จะเห็นว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นจนใกล้เคียงกับการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ในตอนแรก



ภาพที่ 4.10 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 20 พีพีเอ็ม ที่เวลา 60 นาที (♦) MEA II (■) MEA III และ (▲) MEA IV

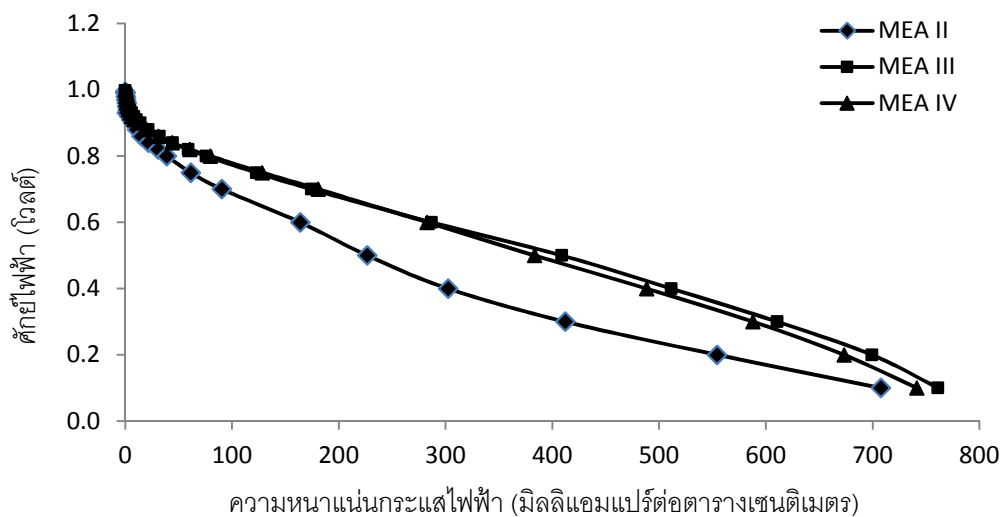


ภาพที่ 4.11 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 20 พีพีเอ็ม หลังฟื้นฟูสภาพ (◆) MEA II (■) MEA III และ (▲) MEA IV

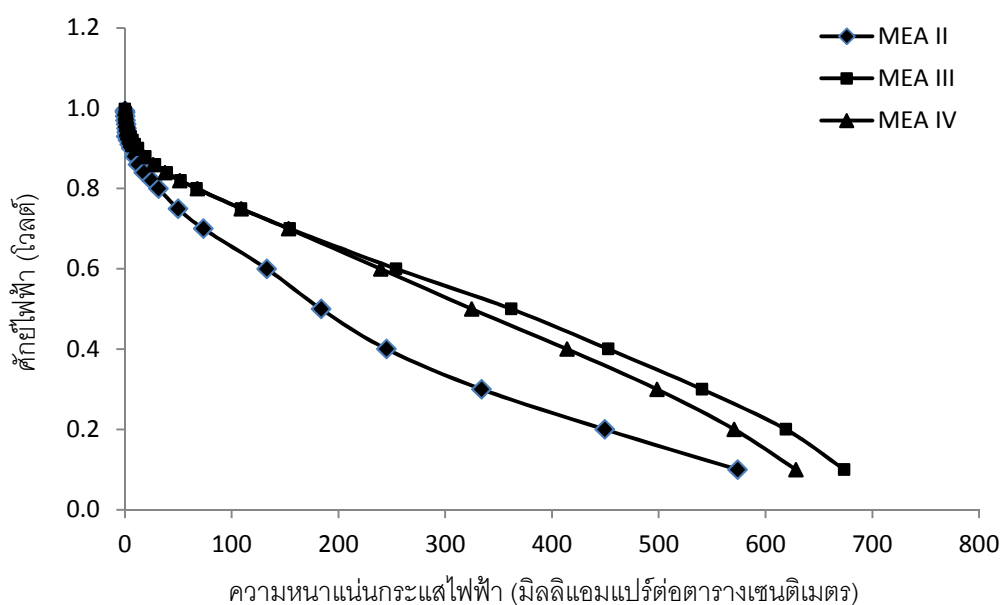
ตารางที่ 4.9 ผลค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ 20 พีพีเอ็ม

ชนิด	ค่าต่างๆ	เริ่มต้น	30 นาที	60 นาที	การฟื้นฟู
MEA II	ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm ²)	448.40	291.17	236.72	415.76
	% ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ ที่เหลือเทียบกับเริ่มต้น	100	64.94	52.79	92.72
MEA III	ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm ²)	386.60	314.31	283.16	381.59
	% ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ ที่เหลือเทียบกับเริ่มต้น	100	81.30	73.24	98.70
MEA IV	ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm ²)	408.40	326.72	286.60	398.71
	% ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ ที่เหลือเทียบกับเริ่มต้น	100	80.01	70.18	97.62

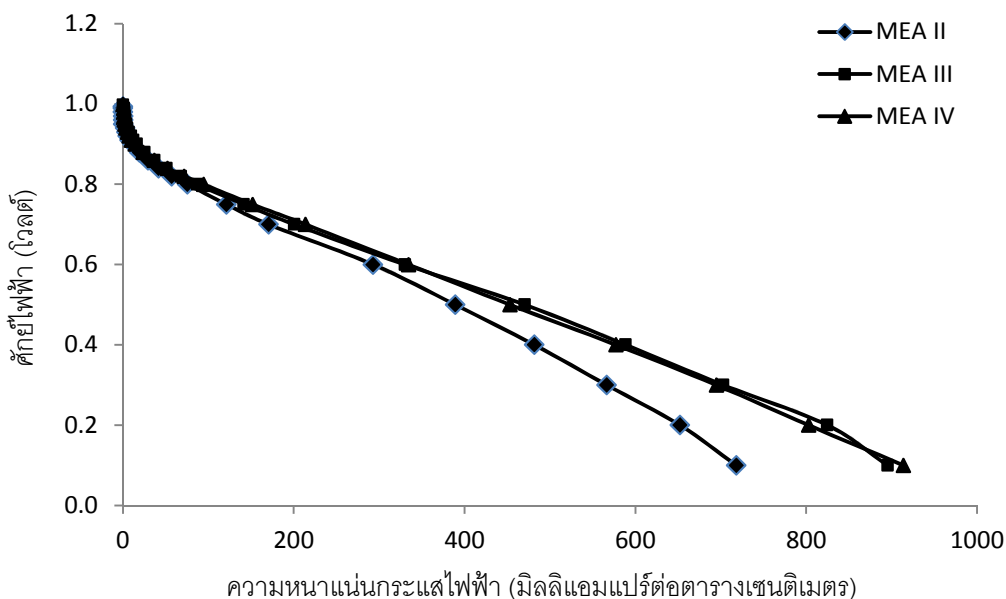
4.4.2 ทดสอบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 60 พีพีเอ็ม



ภาพที่ 4.12 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 60 พีพีเอ็ม ที่เวลา 30 นาที (◆) MEA II (■) MEA III และ (▲) MEA IV



ภาพที่ 4.13 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 60 พีพีเอ็ม ที่เวลา 60 นาที (◆) MEA II (■) MEA III และ (▲) MEA IV



ภาพที่ 4.14 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 60 พีพีเอ็ม หลังฟื้นฟูสภาพ (◆) MEA II (■) MEA III และ (▲) MEA IV

จากภาพที่ 4.12 และ 4.13 แสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ 2, 3 และ 4 เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 60 ppm เป็นเวลา 30 และ 60 นาที จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 แบบมีค่าลดลงเช่นเดียวกับเมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 20 ppm แต่จะลดลงในปริมาณที่สูงกว่า โดยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ตกลงไปอย่างชัดเจนเนื่องจากการที่เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีเพียงชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมซึ่งจะถูกคาร์บอนมอนอกไซด์ยึดเกาะและเป็นการลดพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันส่งผลความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงซึ่งจะแตกต่างจากเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 และ 4 ที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทึ้นเย็บซึ่งรูทึ้นเย็บที่จะคอยช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกไปจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันไม่ลดลงมากนักและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงในปริมาณน้อยตามมา

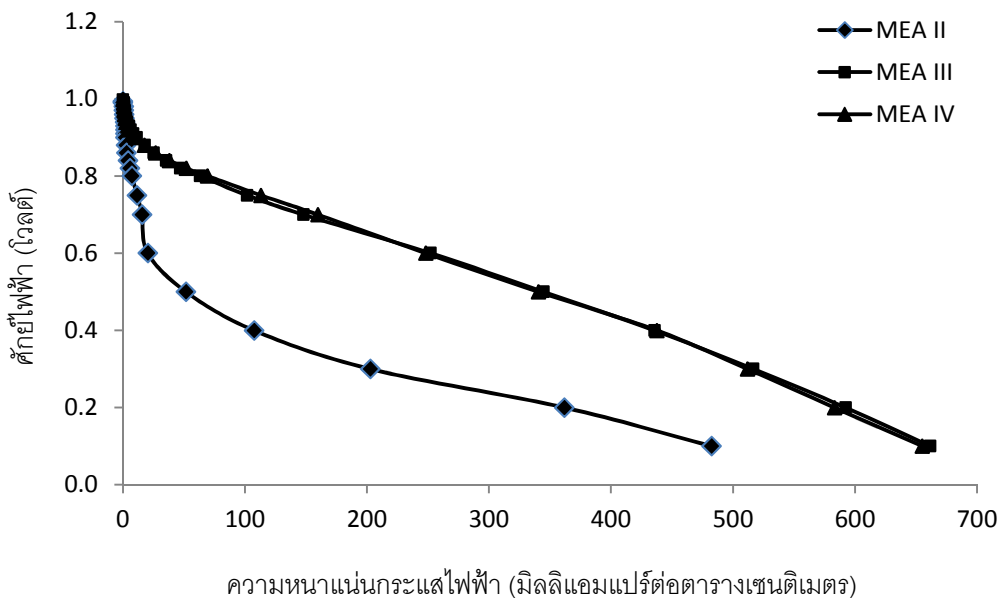
และหลังจากที่มีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ จะเป็นการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 120 นาที แล้ววัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 4.14 จะเห็น

ว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นจนใกล้เคียงกับการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ในตอนแรก

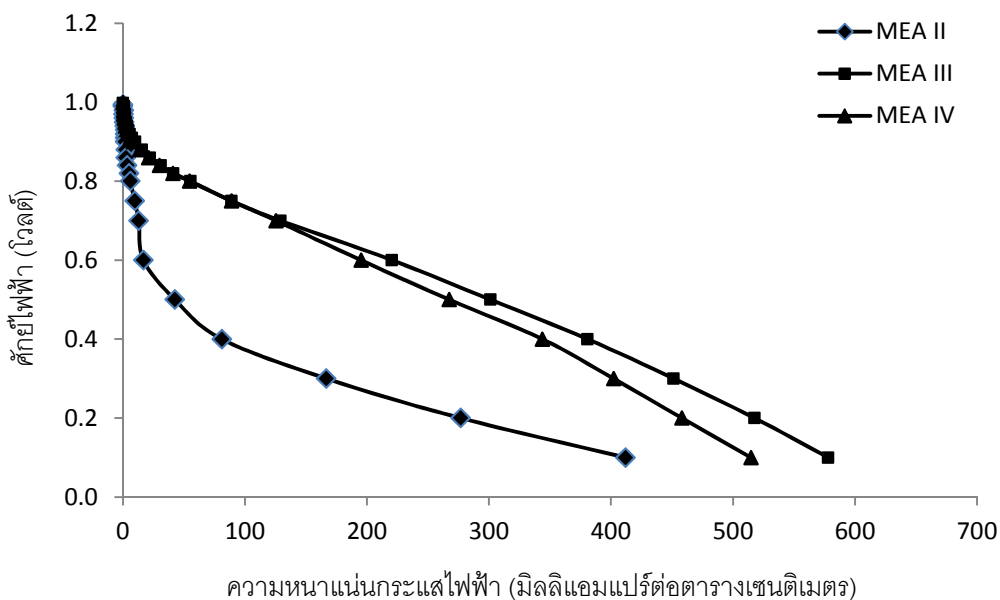
ตารางที่ 4.10 ผลค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ 60 พีพีเอ็ม

ชนิด	ค่าต่างๆ	เริ่มต้น	30 นาที	60 นาที	การฟื้นฟู
MEA II	ความหนาแน่นกระแส ที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm ²)	415.76	163.83	132.76	292.79
	% ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ ที่เหลือเทียบกับเริ่มต้น	100	39.40	31.93	70.42
MEA III	ความหนาแน่นกระแส ที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm ²)	381.59	286.91	253.90	330.04
	% ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ ที่เหลือเทียบกับเริ่มต้น	100	75.19	66.54	86.49
MEA IV	ความหนาแน่นกระแส ที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm ²)	390.18	282.74	239.61	334.11
	% ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ ที่เหลือเทียบกับเริ่มต้น	100	72.46	61.41	85.63

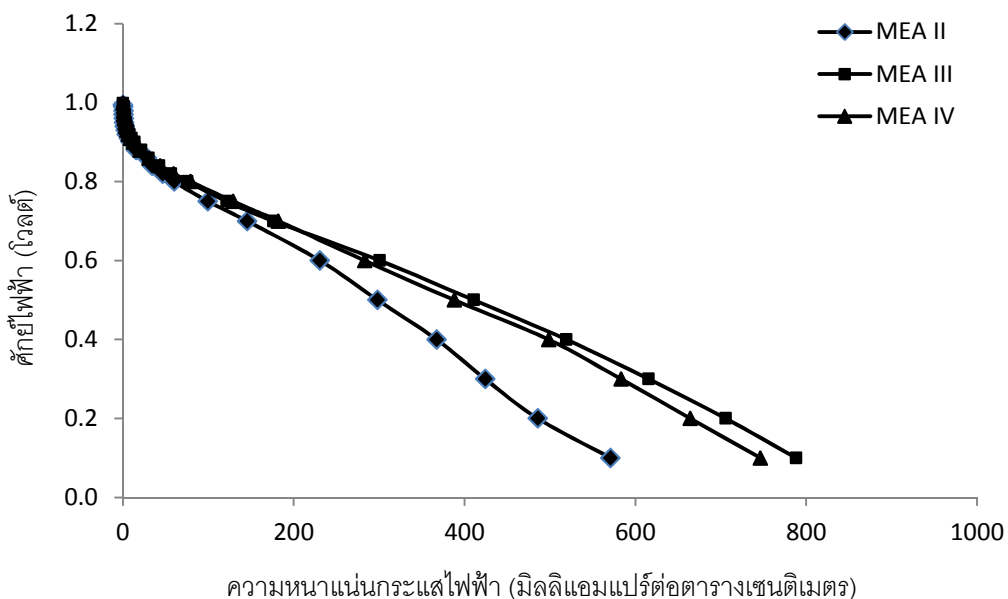
4.4.3 ทดสอบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 100 พีพีเอ็ม



ภาพที่ 4.15 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 100 พีพีเอ็ม ที่เวลา 30 นาที (◆) MEA II (■) MEA III และ (▲) MEA IV



ภาพที่ 4.16 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 100 พีพีเอ็ม ที่เวลา 60 นาที (◆) MEA II (■) MEA III และ (▲) MEA IV



ภาพที่ 4.17 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 100 พีพีเอ็ม หลังฟื้นฟูสภาพ (◆) MEA II (■) MEA III และ (▲) MEA IV

จากภาพที่ 4.15 และ 4.16 แสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ 2, 3 และ 4 เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 ppm เป็นเวลา 30 และ 60 นาที จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 แบบมีค่าลดลงเช่นเดียวกับเมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 20 และ 60 ppm แต่จะลดลงในปริมาณที่สูงกว่า โดยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ตกลงไปอย่างชัดเจนเนื่องจากการที่เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีเพียงชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมซึ่งจะถูกคาร์บอนมอนอกไซด์ยึดเกาะและเป็นการลดพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันส่งผลความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงซึ่งจะแตกต่างจากเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 และ 4 ที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทินเนียมซึ่งรูทินเนียมที่จะคอยช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกไปจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันไม่ลดลงมากนักและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงในปริมาณน้อยตามมา

และหลังจากที่มีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ จะเป็นการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 120 นาที แล้ววัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 4.17 จะเห็น

ว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นจนใกล้เคียงกับการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ในตอนแรก

ตารางที่ 4.11 ผลค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแต่ชนิดที่ 100 พีพีเอ็ม

ชนิด	ค่าต่างๆ	เริ่มต้น	30 นาที	60 นาที	การฟื้นฟู
MEA II	ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm^2)	432.60	20.32	16.75	230.61
	% ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ ที่เหลือเทียบกับเริ่มต้น	100	4.70	3.87	53.30
MEA III	ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm^2)	394.40	252.17	220.34	300.38
	% ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ ที่เหลือเทียบกับเริ่มต้น	100	63.94	55.87	76.16
MEA IV	ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm^2)	406.40	248.26	195.02	282.77
	% ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ ที่เหลือเทียบกับเริ่มต้น	100	61.09	47.99	69.58

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เหล่านี้จะไปขัดขวางการดูดซับของแก๊สไฮโดรเจนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและเข้าไปดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาแทนที่แก๊สไฮโดรเจนได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนได้ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ถึงแม้ว่าจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม/รูทีเนียมซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ก็ตาม แต่เมื่อมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น โลหะรูทีเนียมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผสมของแพลทินัมอาจมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ทั้งหมด เซลล์เชื้อเพลิงจึงมีประสิทธิผลลดลงอย่างมาก

สาเหตุที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านี้ลดลง เนื่องจากระบบมีการดูดซับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ในขณะเดียวกัน

เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะมีน้ำเกิดขึ้นภายในระบบ น้ำส่วนหนึ่งถูกใช้ในการส่งผ่านโปรตอนไปยังด้านแคโทดเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนและอีกส่วนหนึ่งจะแตกตัวเป็นหมู่ไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถดูดซับบนรูทินิยมได้ดี จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับสู่สภาพเดิมได้ส่วนหนึ่ง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อระบบทำงานอย่างเต็มที่ไปอีกระยะหนึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จะลดลงเนื่องจากการดูดซับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณมาก ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอที่จะช่วยให้คาร์บอนมอนอกไซด์หลุดออกจากพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทัน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จึงลดลง

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 60 และ 100 ppm จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มที่แตกต่างกันเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงและช่วงที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จะสูงขึ้นในช่วงที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าต่ำ [3]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยวิธีการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาผสม โดยการถ่ายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ตให้มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งนี้การพิมพ์อิงก์เจ็ตสามารถกำหนดขนาดลักษณะรูปร่าง ปริมาณ และความสม่ำเสมอของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิมที่ต้องใช้มือเช่นการทำด้วยแปรงหรือการสเปรย์ ซึ่งขึ้นกับทักษะของผู้เตรียม ส่วนการถ่ายโอนรูปลอกแก้ปัญหาการบวมของเมมเบรนเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลาย ในงานวิจัยต่างๆ พบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบนั้น ถ้าสามารถแยกชั้นกรงออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอย่างชัดเจนจะทำให้ทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีการถ่ายโอนรูปลอก หลังจากพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับจำพวกไมลาร์หรือเทฟลอน การกดร้อนเมมเบรนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบบนวัสดุรองรับ อาจทำให้ได้ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่แยกชั้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอย่างชัดเจน ซึ่งทำให้สามารถกรองคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและส่งผลดีต่อเซลล์เชื้อเพลิงยิ่งขึ้น

จากการศึกษาการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการถ่ายโอนรูปลอกหลังจากพิมพ์อิงก์เจ็ต พบว่า วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยพิมพ์อิงก์เจ็ตนั้น จะทำให้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีความสม่ำเสมอ เรียบ กำหนดขนาดรูปร่างได้แน่นอน และมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาได้แม่นยำและแน่นอนมากยิ่งขึ้น ส่วนวิธีการถ่ายโอนรูปลอกนั้น จะส่งผลในเรื่องสภาพของเมมเบรน โดยปกติเมมเบรนจะมีความไวต่อสารละลายต่างๆ จึงเกิดปัญหาการหึงงอ ยากต่อการกดอัด แต่เมื่อใช้วิธีการถ่ายโอนรูปลอกที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความชื้นน้อยๆ จึงไม่มีผลต่อการบวมของเมมเบรน อีกทั้งยังส่งผลในเรื่องของความใกล้ชิดของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับเนื้อเมมเบรน ส่งผลในเรื่องความต้านทานการถ่ายโอนไอออน ซึ่งการถ่ายโอนรูปลอกจะให้ผลที่ดีกว่า และยังส่งผลเนื่องกับสมบัติและประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากขนาดช่องว่างในเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กกว่า จึงทำให้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าการเตรียมชั้นปฏิกิริยาบนชั้นแพร์แก๊ส ซึ่งอาจจะมีปัญหาส่งผลไปถึงในเรื่องกำจัดน้ำที่เกิดขึ้นอีกด้วย และจากทดลองต่างๆนี้ แสดงให้เห็นว่า วิธีการเตรียมเมมเบรนโดยการถ่ายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้าหลังจากการพิมพ์อิงก์เจ็ตนั้น จะให้ผลที่ดีกว่า วิธีการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า โดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยา ลงบนชั้นแพร์แก๊ส ($MEA II > MEA I$) ทั้งสมรรถนะ พื้นที่การเกิดปฏิกิริยา ความต้านทานภายใน

เซลล์เชื้อเพลิง และขนาดช่องว่างภายในเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ส่วนในเรื่องการเตรียมเมมเบรนโดยการถายโอนรูปลอกขั้วไฟฟ้าหลังจากการพิมพ์อิงก์เจ็ตที่ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันนั้น จะให้ผลทั้งสมรรถนะ พื้นที่การเกิดปฏิกิริยา และความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง จะให้ผลตามปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีอยู่ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ เรียงลำดับได้เป็น MEA II > MEA IV > MEA III ซึ่งผลมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีประสิทธิภาพมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียม และเมื่อศึกษาประสิทธิภาพความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้นั้นจะให้ผลกลับกัน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมจะมีความสามารถในการทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมผลที่ได้จึงแปรผันตามปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมที่มีอยู่ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ เรียงลำดับได้เป็น MEA III > MEA IV > MEA II ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบกันในเรื่องของประสิทธิภาพที่ได้ของเซลล์เชื้อเพลิง และความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์แล้วนั้น เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่เตรียมเป็น 2 ชั้น โดยมีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมอยู่ภายนอก และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอยู่ภายในนั้น มีให้สมรรถนะและความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ดีกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเดี่ยวแพลทินัม หรือชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมเพียงชั้นเดียว

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต Fujifilm Dimatix Materials Printer จะมีความสามารถสูงในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาได้หลายชนิด และหลายรูปแบบ ดังนั้นในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อประกอบเป็นเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า ทั้งความหนืด แรงตึงผิว และระยะเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารละลายที่ใช้ จึงจำเป็นต้องศึกษาหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมก่อนที่จะนำหมึกของตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้สำหรับวิธีเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้านั้นๆ

ภาวะที่ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนั้นถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขของเวลา ณ เวลานั้นๆ เมื่อเวลาผ่านไป สภาพของเครื่องมือจึงมีการเสื่อมคุณภาพลง

ภาวะแวดล้อม ณ ที่ทำการทดลองนั้น จะแปรผันและส่งผลต่างกัน ในวันที่มีฝนตกและไม่ มีฝนตก ส่งผลต่อการระเหยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ซ้าลง รวมไปถึงการควบคุมอุณหภูมิเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าอากาศหนาวอุณหภูมิจะขึ้นช้ามาก

การศึกษาประสิทธิภาพความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น สถานที่ที่ใช้ทดสอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ควรมีการควบคุมสภาวะอื่นในการทดสอบด้วย อาทิเช่น ความดันในระบบเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นอันเนื่องมาจากเกิดน้ำภายในระบบ หรือแม้กระทั่งช่องการไหลภายในเซลล์เชื้อเพลิง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

รายการอ้างอิง

- [1] Wolf V., Hubert A.G. and Arnold L. Handbook of fuel cells – Fundamentals Technology and Applications, Vol. 2: Electrocatalysis, New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [2] Thompsett, D. Fuel cell technology handbook, edited by Hoogers G. Washington D.C.:CRC Press, 2003.
- [3] Apple by, A.J., and Foulkes, F.R. Fuel cell handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [4] Zang J. PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers. London: Springer-Verlag, 2008.
- [5] Fuel Cells [online]. 2010. Available from : <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/types.php> [2012, February 10].
- [6] Li, X. Principles of fuel cells. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- [7] Fuel Cells [online]. 2010. Available from : <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/index.html> [2012, February 3].
- [8] Fuel Cells type [online]. 2010. Available from : http://www.optodisc.com/Fuel_Cell/fuel_tech_type.html [2012, March 21].
- [9] Fuel Cells type [online]. 2010. Available from: http://www.infobarrel.com/Fuel_Cell_The_Energy_Source_of_the_Future [2012, March 21].
- [10] Fuel Cells type [online]. 2010. Available from: <http://www.cleantechinvestor.com/portal/fuel-cells/6426-the-main-types-of-fuel-cell-technology.html> [2012, March 21].
- [11] Mikkola, M. Modification to A PEM Fuel cell Stack. Special assignment, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology, 2000.
- [12] Barbir, F. PEM Fuel Cells: Theory and Practice. New York: Elsevier Academic Press, 2005..
- [13] Lee, J.S., et al. Polymer electrolyte membrane for fuel cells. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 12 (2006): 175-183.

- [14] Ryan P., Hayre O., Cha S.W., Colella W. and Prinz F.B. Fuel cell fundamentals. New York: John Willey & Sons LTD., 2003.
- [15] Litster, S. and Mclean, G. PEM fuel cell electrodes. Journal of Power Sources 130 (2004): 61–76.
- [16] Metha, V., and Cooper, J.S. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. Journal of Power Sources 114 (2003): 32-53.
- [17] Wolf, V., Hubert, A.G., and Arnold, L. Handbook of fuel cells – Fundamentals, Technology and Applications, Vol. 1: Fundamentals and survey of systems. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [18] Quincy, K., Kurek, E.H., and Kurek, K.H. Principles of High Performance Membrane Electrode Assembly Fabrication. Bachelor's Degree, Department of Science Worcester Polytechnic Institute, 2007.
- [19] กฤษยาพร ทินกร. ผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการขจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระแสเชื้อเพลิงของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [20] Li, C., and Suzuki, K. Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification. Renewable and Sustainable Energy-An Overview 13 (2009): 594-604.
- [21] Zhang, J. et. Al. High temperature PEM fuel cells. Journal of Power Sources 160 (2006): 872–891.
- [22] Larminie, J., and Dick, A. Fuel cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
- [23] Carr, R.W. Modeling of chemical reactions. Italy: Elsevier, 2007.
- [24] Foulkes F.R. Fuel cell handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 2000.
- [25] ศศิกานต์ เอ็นดู. ผลของตัวแปรต่อการเตรียมเอเอ็มอีในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

- [26] บุศรินทร์ เมษะปะบุตร. เคมีของกระบวนการเร่งปฏิกิริยา. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, 2551.
- [27] ศรวลี ธนศิลป์. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแพลเลเดียม/คาร์บอนเคลือบบนเมมเบรนสำหรับการรีดิวซ์ออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [28] Avgouropoulos, G., Ioannides, T. CO tolerance of Pt and Rh catalysts: effect of CO in the gas-phase oxidation of H₂ over Pt and Rh supported catalysts. Applied Catalysis B: Environmental 56 (2005): 77–86.
- [29] Pereira, L.G.S., Santos, F.R., Pereira, M.E., Paganin, V.A., and Ticianelli, E.A. CO tolerance effects of tungsten –based PEMFC anodes. Electrochimica Acta 51 (2006): 4061–4066.
- [30] Liang, Y., Zhang, H., Yi, B., Zhang, Z., and Tan, Z. Preparation and characterization of multi-walled carbon nanotubes supported PtRu catalysts for proton exchange membrane fuel cells. Carbon 43 (2005): 3144–3152.
- [31] Lopes, P.P., Freitas, K.S., Ticianelli, E. A. CO Tolerance of PEMFC Anodes: Mechanisms and Electrode Designs. Electrocatalyst 1 (2010): 200–212.
- [32] Li, Q., He, R., Gao, J.-A. Jensen, J.O., and Bjerrum, N.J. The CO Poisoning Effect in PEMFCs Operational at Temperatures up to 200°C. J. Electrochem. Soc 150 (2003): A1599-A1605.
- [33] Wee, J.-H., and Lee, K.-Y. Overview of the development of CO-tolerant anode electrocatalysts for proton-exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources 157 (2006): 128–135.
- [34] Hou, Z., Yi, B., Yu, H., Lin, Z., Zhang, H. CO tolerance electrocatalyst of PtRu-H_xMeO₃/C (Me = W, Mo) made by composite support method. Journal of Power Sources 123 (2003): 116–125.
- [35] Luis, G.S.P., Valdecir, A.P., and Edson, A.T. Investigation of the CO tolerance mechanism at several Pt-based bimetallic anode electrocatalysts in a PEM fuel cell. Electrochimica Acta 54 (2009): 1992–1998.

- [36] Towne S, Viswanathan V, Holbery J, Rieke P. Fabrication of polymer electrolyte membrane fuel cell MEAs utilizing inkjet print technology. *Journal of Power Sources* 171, 575–584 (2007)
- [37] Taylor A D, Kim E Y, Humes V P, Kizuka J, Thompson L T. Inkjet printing of carbon supported platinum 3-D catalyst layers for use in fuel cells. *Journal of Power Sources* 171, 101–106 (2007)
- [38] Yu H, Hou Z, Yi B, Lin Z. Composite anode for CO tolerance proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 105, 52–57 (2002)
- [39] Saha M S, Paul D K, Peppley B A, Karan K. Fabrication of catalyst-coated membrane by modified decal transfer technique. *Electrochemistry Communications* 12, 410–413 (2010)
- [40] Wee J-H, Lee K-Y. Overview of the development of CO-tolerant anode electrocatalysts for proton-exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 157, 128–135 (2006)
- [41] Qi Z, Kaufman A. CO-tolerance of low-load Pt/Ru anodes for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 113, 115–123 (2003)
- [42] Cho J H, Kim J M, Prabhuram J, Hwang S Y, Ahn D J, Ha H Y, Kim S-K. Fabrication and evaluation of membrane electrode assemblies by low-temperature decal methods for direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources* 187, 378–386 (2009)
- [43] FUJIFILM Dimatix, Inc. FUJIFILM Dimatix Materials Printer DMP-2800 Series User Manual. USA. December 8, 2010
- [44] วิทวัส รัตนถาวร. ผลการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนุ่มที่เนียม/คาร์บอนโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ทบนชั้นแพร์แก๊สสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [45] Wang, Z., Yin, G., and Shi, P. Preparation and influence of performance of anodic catalysts for direct methanol fuel cell. *Front. Chem. Eng. China* 1 (2007): 20–25.

- [46] Ermete, A., Leonardo, G., Francesco, C., and Enza, P. Physical and morphological characteristics and electrochemical behavior in PEM fuel cells of PtRu/C catalysts. J Solid State Electrochem 5 (2001): 131-140.
- [47] Garcia, G., Silva-Chong, J.A., Guillen-Villafuerte, O., Rodriguez, J.L., Gonzalez, E.R., and Pastor, E. CO tolerant catalysts for PEM fuel cells Spectroelectrochemical studies. Catalysis Today 116 (2006): 415–421.
- [48] Garcia, A., Paganin, V., and Ticianelli, E. CO tolerance of PdPt/C and PdPtRu/C anodes for PEMFC. Electrochimica Acta 53 (2008): 4309–4315.
- [49] Leng, Y. J., Wang, X., and Hsing, I.-M. Assessment of CO-tolerance for different Pt-alloy anode catalysts in a polymer electrolyte fuel cell using ac impedance spectroscopy. Journal of Electroanalytical Chemistry 528 (2002): 145-152.
- [50] Carmo, M., Paganin, V.A., Rosolen, J.M., and Gonzalez, E.R. Alternative supports for the preparation of catalysts for low-temperature fuel cells: the use of carbon nanotubes. Journal of Power Sources 142 (2005): 169–176.
- [51] Xu, C., Wang, L., Mu, X., and Ding, Y. Nanoporous PtRu Alloys for Electrocatalysis. Langmuir 26 (2010): 7437-7443.
- [52] Salgado, J.R.C., Alcaide, F., Alvarez, G., Calvillo, L., Lazaro, M.J., and Pastor, E. Pt–Ru electrocatalysts supported on ordered mesoporous carbon for direct methanol fuel cell. Journal of Power Sources 195 (2010): 4022–4029.
- [53] Santos, L., Colmati, F., and Gonzalez, E.R. Preparation and characterization of supported Pt–Ru catalysts with a high Ru content. Journal of Power Sources 159 (2006): 869–877.
- [54] Zhu, J., Su, Y., Cheng, F., and Chen, J. Improving the performance of PtRu/C catalysts for methanol oxidation by sensitization and activation treatment. Journal of Power Sources 166 (2007): 331–336.
- [55] Speciality carbon blacks-Cabot corporation. [online]. Available from: <http://www.cabot-corp.com/Specialty-Carbon-Blacks/Downloads/DL200808140915PM2185> [2011, Aug. 9]

- [56] Bagotsky, V.S. Fuel cell: problems and solutions. United States of America: John Wiley & Sons, 2009.
- [57] Wang, Z.-B., Zuo, P.-J., and Yin, G.-P. Effect of W on activity of Pt-Ru/C catalyst for methanol electrooxidation in acidic medium. Journal of Alloys and Compounds 479 (2009): 395-400.
- [58] Liu, Z., Ling, X.Y., Su, X., and Lee, J.Y. Carbon-Supported Pt and PtRu Nanoparticles as Catalysts for a Direct Methanol Fuel Cell. J. Phys. Chem. B 108 (2004): 8234-8240.
- [59] Hyun M.S., Kim S.K., Lee B., Peck D., Shul Y., Jung D. Effect of NaBH₄ concentration on the characteristics of PtRu/C catalyst for the anode of DMFC prepared by the impregnation method. Catalysis Today 132 (2008): 138–145.
- [60] Amanda C.G., Valdecir A.P., Edson A.T. CO tolerance of PdPt/C and PdPtRu/C anodes for PEMFC. Electrochimica Acta 53 (2008): 4309–4315.
- [61] Samant, P.V., Rangel, C.M., Romero, M.H., Fernandes, J.B., and Figueiredo, J.L. Carbon supports for methanol oxidation catalyst. Journal of Power Sources 151 (2005): 79-84.
- [62] แม้น อมรสิทธิ์. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ ฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.
- [63] Toya, T., Jotaki, R., Kato, A., Specimen Preparations in EPMA and SEM. JEOL Training Center EP Section, 1986.
- [64] ร้อยตำรวจเอก วิวัฒน์ ชินวร. การวิเคราะห์เขม่าป็นด้วยเทคนิค SEM/EDX. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเคมีศึกษา ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2547.
- [65] Scanning electron microscope. [Online]. Available from : http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope [2011, Aug 13]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry) [3]

ไซคลิกโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการดูดซับ/คายซับของไฮโดรเจน โดยจะให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วงที่ต้องการศึกษาและอัตราการแสกนที่คงที่เข้าไปในวงจร และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยเมื่อเริ่มให้ศักย์ไฟฟ้าจะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าจากค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดไปจนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดนั้นแสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อลดศักย์ไฟฟ้าลงไปจนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดจะแสดงการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน

องค์ประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี มีดังนี้

(ก) **ขั้วไฟฟ้า (Electrode)** เป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าภายในระบบ โดยเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก ขั้วไฟฟ้าสามารถแบ่งตามหน้าที่และการใช้งานได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้

- **ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode)** คือ ขั้วไฟฟ้าที่ต้องการศึกษา โดยการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในสารละลาย ซึ่งส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้

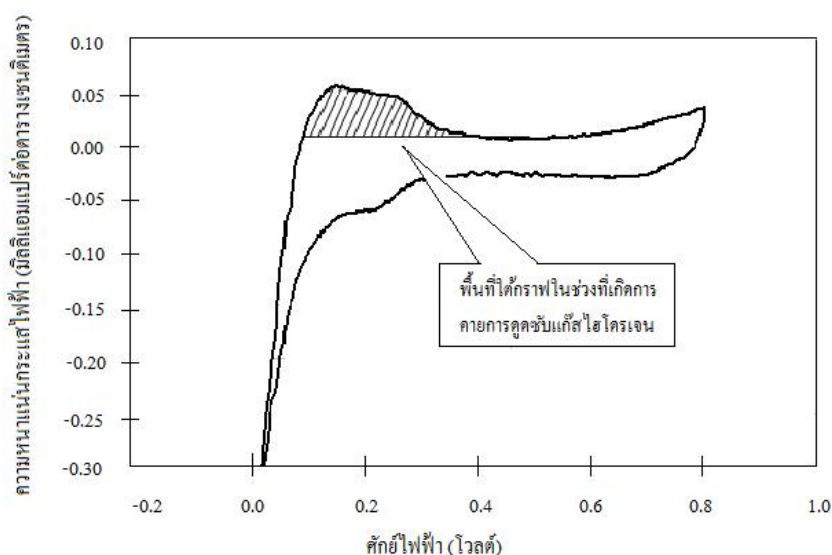
- **ขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode)** ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า โดยช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือกระแสไฟฟ้าจากขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ ขั้วไฟฟ้าวร่วมนี้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

- **ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)** คือ ขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเฉพาะ นั่นคือมีค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเฉพาะตัว ไม่เปลี่ยนแปลงตามการไหลของกระแสในวงจร โดยจะใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบค่า ดังนั้นจึงต้องทราบค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดที่จะนำมาทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง ตัวอย่างขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ได้แก่ ขั้วอิเล็กโทรดคาโลเมล ขั้วอิเล็กโทรดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

(ข) **สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)** ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ผ่านทางไอออนชนิดต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะเป็นตัวกลางในการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว โดยประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสมบัติต่างๆ ของสารอิเล็กโทรไลต์ เช่น ความเข้มข้น ค่าความเป็นกรด-เบส และองค์ประกอบ เป็นต้น

(ค) แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแบบวนรอบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับเซลล์ที่ศึกษา โดยบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามศักย์ไฟฟ้า

การคำนวณหาพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง จะนำกราฟไซคลิกโวลแทมเมตรีที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยา โดยเริ่มจากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรีในช่วงที่เกิดการคายซับแก๊สไฮโดรเจน ดังแสดงในภาพที่ ก.1 ซึ่งหาได้จากโปรแกรม GPES โดยเลือก Analysis จากนั้นเลือก Integrate between marker จากนั้นเลือกจุด 2 จุด โปรแกรมจะทำการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟเพื่อหาค่าประจุไฟฟ้า (Charge) ในหน่วยคูลอมบ์ (C) และนำค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาค่า S_{ECSA} ตามสมการ ก.1 [3]



ภาพที่ ก.1 พื้นที่ใต้กราฟในช่วงที่เกิดการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนจากกราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี [3]

$$S_{ECSA} = \frac{A}{[10 \times 210 \times C_L]} \quad (ก.1)$$

โดย S_{ECSA} คือ พื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

(ตารางเมตรของแพลทินัมต่อกรัมของแพลทินัม)

A คือ ประจุที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี

(ไมโครคูลอมบ์/ตารางเซนติเมตร)

210 คือ อัตราส่วนของปริมาณอิเล็กตรอนเทียบกับพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยา

C_L คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ตัวอย่างการคำนวณพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยา

จากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟไซคลิกโวลแทมเมทรีในช่วงที่เกิดการคายซับแก๊สไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรองรับบนคาร์บอน ของ MEA II ได้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากับ 0.2071 คุลอมป์ โดยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 5 ตารางเซนติเมตร ประจุที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟไซคลิกโวลแทมเมทรี 41420 ไมโครคุลอมป์/ตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถคำนวณพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$\text{จากสมการ ก.1} \quad S_{ECSA} = \frac{A}{[10 \times 210 \times C_L]}$$

$$\begin{aligned} \text{โดย} \quad A &= 41420 \text{ ไมโครคุลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร} \\ C_L &= 0.15 \text{ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

$$S_{ECSA} = \frac{41420}{[10 \times 210 \times 0.15]}$$

$$S_{ECSA} = 131.49 \text{ ตารางเมตรต่อกรัม}$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscopy, SEM /Energy dispersive X-ray diffraction, EDX) [63-65]

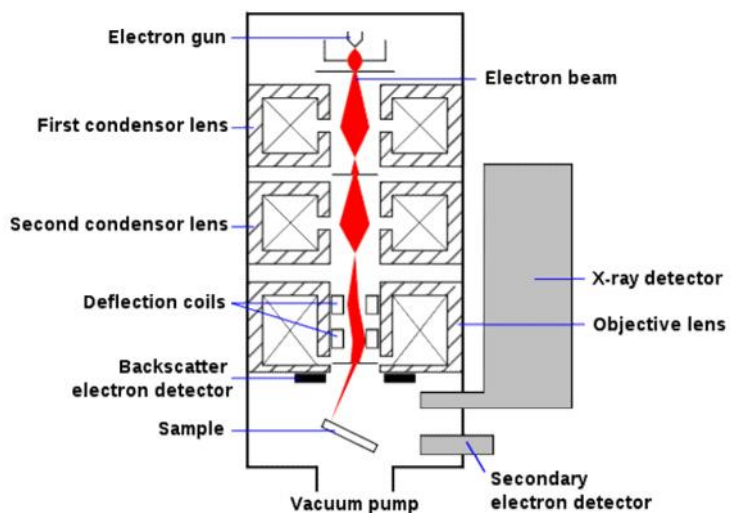
ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน (Morphology) และพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังสามารถศึกษาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาได้อีกด้วย โดยเทคนิคนี้จะใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการตรวจสอบพื้นผิวของสารตัวอย่างและสร้างเป็นภาพสามมิติของสารตัวอย่างออกมา ซึ่งส่วนประกอบและหลักการทำงานโดยสังเขปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในภาพที่ ข.1 โดยอิเล็กตรอนที่เกิดจากปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0 – 30 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอปเจอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ตามลักษณะการใช้งานเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และจะมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านี้ แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่าภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI)

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

เอกซเรย์ (X-Ray) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนวงในของธาตุที่ผิวตัวอย่างถูกชนจนอิเล็กตรอนหลุดออกไป เกิดเป็นระดับพลังงานที่ว่าง ทำให้อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานสูงกว่าลดระดับชั้นพลังงานลงพร้อมกับเกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปรังสีเอกซ์ออกมา ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบที่ผิวตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ

นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave), โอลิเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป



ภาพที่ ข.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [63]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุชาติ พงษ์ชัยผล เกิดเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2551 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552