

การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์
โดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

นายนราธิป กัลยากาญจน์

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 CO-TOLERANT COMPOSITE
CATALYST-COATED MEMBRANE BY INKJET PRINTING FOR PEM FUEL CELL

Mister Narathip Kanlayakan

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	การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่ ทนคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตสำหรับเซลล์ เชื้อเพลิงฟิวส์
โดย	นายนราธิป กัลยาภาณุจัน
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. คุณากร ภูจินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พฤษาทร)

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

นราธิป กัลยาภาณุจณ์ : การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่
 ทนคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการพิมพ์อิงค์เจ็ตสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม.
 (PREPARATION OF CO-TOLERANT COMPOSITE CATALYST-COATED
 MEMBRANE BY INKJET PRINTING FOR PEM FUEL CELL) อ. ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.คุณากร ภูจินดา, 90 หน้า.

เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มถือเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่สะอาดและมีประสิทธิภาพ
 จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจนและออกซิเจน อย่างไรก็ตามวิธีเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา
 แบบดั้งเดิม เช่น การทาหรือการสเปรย์ มักทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา
 และมีการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมาก ทำให้ต้นทุนสูงและมีการใช้ประโยชน์ตัวเร่ง
 ปฏิกิริยาน้อย งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพิมพ์
 ตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนเมมเบรนโดยตรงด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ตแบบไพโซอิเล็กทริก
 (Piezoelectric inkjet printer) เนื่องจากปริมาตรของหยดหมึกเล็กถึง 10 พิโกลิตรและการ
 พิมพ์เต็มพื้นที่ที่ตั้งค่าได้ ทำให้สามารถกำหนดรูปร่างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้แน่นอนโดยไม่
 จำเป็นต้องใช้หน้ากาก เมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน
 ปริมาณ 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่เตรียมได้ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 476
 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ นอกจากนี้ยังศึกษาความ
 ทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบเทียบกับชั้นตัวเร่ง
 ปฏิกิริยาเดี่ยว และพบว่าเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนตัวรองรับ
 คาร์บอนเพียงชั้นเดียวมีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ดีที่สุด อีกทั้งยังทำการขยายส่วนเมม
 เบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ตลงบนเมมเบรนจาก 5 ตาราง
 เซนติเมตรเป็น 25 ตารางเซนติเมตร พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการขยายส่วนมี
 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์ลดลงเพียงร้อยละ 11 เท่านั้น

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

5270343323: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CO-TOLERANCE / COMPOSITE CATALYST / CATALYST-COATED
MEMBRANE / INKJET PRINTING / PEM FUEL CELL

NARATHIP KANLAYAKAN: PREPARATION OF CO-TOLERANT COMPOSITE
CATALYST-COATED MEMBRANE BY INKJET PRINTING FOR PEM FUEL
CELL. ADVISOR: KUNAKORN POOCHINDA, Ph.D., 90 pp.

PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell is a clean and efficient energy conversion system using electrochemical reaction of hydrogen and oxygen to generate electricity. However, conventional catalyst loading methods, such as hand-painting and air-brushing, bring about a significant material loss and non-uniform catalyst layer, which pose problems in capital cost and platinum utilization. This research studied the preparation of catalyst coated-membrane by direct printing of catalyst onto Nafion membrane, using a piezoelectric inkjet printer. The small droplet size of 10 pL and programmable area printing help produce a well-defined shape of the catalyst layer without the need for a mask. The current density of membrane electrode assembly prepared by inkjet printing of Pt/C catalyst, with the loading of 0.15 mg/cm^2 , on membrane was found to be 476 mA/cm^2 at 0.6 V. Moreover, this research was carried out to develop the CO-tolerant composite catalyst-coated membrane in comparison with that prepared by single catalyst layer. It was found that MEA which has PtRu/C layer on anode side had the best CO-tolerance. This research also scaled up the catalyst-coated membrane from 5 cm^2 to 25 cm^2 by inkjet printing. The scaled up catalyst-coated membrane showed a lower current density of only 11 percent at 0.6 V.

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

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

Academic Year :2012.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. คุณากร ภูจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ คณาจารย์ทุกท่านในกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือให้งานวิจัย สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หนูนสม ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร และ รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนการศึกษา ในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์.....	11
2.3 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	16
2.4 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท.....	18
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	21
2.6 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง.....	23
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์.....	34
2.8 ปัญหาความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์.....	38
2.9 การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์.....	39
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	43

บทที่	หน้า
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	44
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	44
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	44
3.4.1 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
3.4.2 การเตรียมตลับหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	45
3.4.3 การเตรียมเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท.....	45
3.4.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงค์เจ็ทลงบนผ้าคาร์บอน.....	45
3.4.5 การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงค์เจ็ทลงบนเนฟิออนเมมเบรน.....	46
3.4.6 การปรับสภาพเนฟิออนเมมเบรน.....	48
3.4.7 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (Membrane Electrode Assembly) ที่ผ่านการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผ้าคาร์บอน.....	49
3.4.8 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (Membrane Electrode Assembly) ที่ผ่านการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนเนฟิออนเมมเบรน.....	49
3.4.9 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	50
3.4.10 การทดสอบอิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า (Impedance spectroscopy)...	52
3.4.11 การวิเคราะห์แบบไซคลิกโวลแทมเมทรีในเซลล์เชื้อเพลิง.....	52
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	54
4.1 ผลของการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนเมมเบรนและขั้วอิเล็กโทรด...	54
4.2 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์.....	57
4.3 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ.....	61
4.4 ความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า.....	63
4.5 การขยายส่วนเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา.....	76
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81

บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry: CV).....	85
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning Electron microscopy, SEM /Energy dispersive X-ray diffraction, EDX).....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ขนาดและความหนาของเมมเบรนชนิดต่างๆ	15
2.2 องค์ประกอบของวงจรไฟฟ้าสมมูล.....	32
4.1 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟูด้วยการบ่อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาทีเมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0 ppm ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1.....	64
4.2 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟูด้วยการบ่อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาทีเมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0 ppm ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2.....	66
4.3 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟูด้วยการบ่อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาทีเมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0 ppm ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3.....	69
4.4 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟูด้วยการบ่อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาทีเมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0 ppm ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4.....	72

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง.....	7
2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็ล.....	8
2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Direct Methanol Fuel cell.....	8
2.4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก.....	9
2.5 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์.....	10
2.6 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอนเนตหลอม.....	10
2.7 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล.....	11
2.8 โครงสร้างและส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล.....	12
2.9 โครงสร้างหลักของเนฟิออนเมมเบรน	14
2.10 กระบวนการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดด้วยการพิมพ์หรือการระบาย	17
2.11 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพ่นละออง.....	17
2.12 การพิมพ์อิงก์เจ็ตแบบหยดต่อเนื่อง.....	19
2.13 เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต Dimatix drop manager.....	20
2.14 เส้นทางการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..	21
2.15 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	25
2.16 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมทั่วไป.....	26
2.17 แสดงวงจร Potentiostatic อย่างง่าย.....	27
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี..	28
2.19 Nyquist plot และ Bode plot.....	29
2.20 การเคลื่อนที่ของน้ำที่เกิดขึ้นจากทุกกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล.....	35
2.21 ผลกระทบของการเพิ่มความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	37
2.22 ความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล.....	38
2.23 กลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์.....	39
3.1 ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมบนผ้าคาร์บอน.....	46
3.2 การพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนเมมเบรน.....	47
3.3 ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมบนเนฟิออนเมมเบรน.....	48

ภาพที่	หน้า
4.1 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนผ้าคาร์บอน และเมมเบรนโดยตรง	55
4.2 ภาพถ่ายภาคตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนผ้าคาร์บอนและเมมเบรน.....	55
4.3 ไชคลิกโวลแทมเมตรีของเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนผ้าคาร์บอนและเมมเบรน	56
4.4 กราฟ Nyquist plot ของเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนผ้าคาร์บอนและเมมเบรน ที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์..	56
4.5 โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (MEA I).....	57
4.6 โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (MEA II).....	57
4.7 โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 (MEA III).....	58
4.8 โครงสร้างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงภาพ ตัดขวางและ Pt, Ru mapping.....	59
4.9 โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 (MEA IV).....	60
4.10 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1-4 เมื่อทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ	61
4.11 ไชคลิกโวลแทมเมตรีของเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบที่ 1-4.....	62
4.12 กราฟ Nyquist plot ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1-4 ที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์.....	62
4.13 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 0, 20, 60 และ 100 ppm.....	63
4.14 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 ที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 0, 20, 60 และ 100 ppm	65

ภาพที่	หน้า
4.15 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที หลังจากทีป้อนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นเป็น 0, 20, 60 และ 100 ppm	66
4.16 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 ที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 0, 20, 60 และ 100 ppm	67
4.17 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที หลังจากทีป้อนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นเป็น 0, 20, 60 และ 100 ppm	69
4.18 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 ที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 0, 20, 60 และ 100 ppm	70
4.19 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที หลังจากทีป้อนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นเป็น 0, 20, 60 และ 100 ppm	71
4.20 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1-4 เมื่อทำการทดสอบโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 20 ppm ทางด้านขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแคโทด.....	73
4.21 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1-4 เมื่อทำการทดสอบโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 60 ppm ทางด้านขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแคโทด.....	74
4.22 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1-4 เมื่อทำการทดสอบโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 100 ppm ทางด้านขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแคโทด.....	74
4.23 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนขนาด 5 และ 25 ตารางเซนติเมตร.....	76
4.24 สมรรถนะและกำลังไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนขนาด 5 และ 25 ตารางเซนติเมตร.....	77

ภาพที่	หน้า
ก.1 พื้นที่ใต้กราฟในช่วงที่เกิดการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนจากกราฟไฮดรอลิกโวลแทมเมตรี..	86
ข.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการให้ความสนใจในการแก้ไขวิกฤตพลังงานเป็นอย่างมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ในปัจจุบันกำลังจะหมดไป ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแหล่งพลังงานอย่างอื่นมาทดแทน เซลล์เชื้อเพลิงก็เป็นหนึ่งในทางเลือกที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นการใช้พลังงานจากแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจน ซึ่งสามารถผลิตได้หลายวิธี นอกจากนั้นเซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาไหม้ ผลที่ได้คือประสิทธิภาพในการทำงานที่สูง โดยมีเพียงความร้อนและน้ำเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเท่านั้นจึงทำให้ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิด แต่ที่ได้รับความสนใจเป็นพิเศษคือเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ (50-120 °C) และมีขนาดค่อนข้างเล็ก จึงเหมาะกับการนำไปใช้งานกับยานพาหนะ

เซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนส่วนใหญ่จะได้มาจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งทำให้มีคาร์บอนมอนอกไซด์เจือปนมาด้วยซึ่งจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแพลทินัมแทนที่จะเป็นไฮโดรเจน ทำให้แพลทินัมเกิดการเสื่อมสภาพ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง การแก้ปัญหานี้อาจทำได้หลายวิธี ซึ่งอาจใช้แก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงแต่ก็ต้องใช้ต้นทุนสูง หรืออาจจะดำเนินการที่อุณหภูมิสูงแต่ก็จะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ยาก ดังนั้นจึงควรใช้โลหะชนิดอื่นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ดังนั้นจึงควรใช้โลหะเชิงประกอบฐานแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทน โดยโลหะเชิงประกอบจะทำหน้าที่จับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เปรียบเสมือนตัวกรองไม่ให้คาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับแพลทินัมโดยตรง ทำให้แพลทินัมสามารถทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีขึ้นและจะส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตบนเมมเบรนเนื่องจากวิธีนี้สามารถที่จะเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว และสามารถควบคุมปริมาณ ลักษณะรูปร่างและความสม่ำเสมอของตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนลงไปได้ดีกว่าวิธีทั่วไปซึ่งก็

คือวิธีการทำด้วยแปรงและการสเปรย์ และเนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบนั้นควรที่จะแยกชั้นออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอย่างชัดเจนเพื่อที่จะสามารถกรองคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การพิมพ์บนผ้าคาร์บอนจะทำให้เกิดการกระจายตัวผสมกันของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนเพื่อที่จะสร้างชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบที่แยกชั้นออกจากกันได้อย่างชัดเจน เพื่อที่จะสามารถกรองคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะที่สูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 พัฒนาเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

1.2.2 ขยายส่วนเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต เป็นขนาด 25 ตารางเซนติเมตร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการเตรียมเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตขนาด 5 ตารางเซนติเมตร และขยายส่วนเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นหาข้อมูลทฤษฎีของเซลล์เชื้อเพลิง ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนเมมเบรนโดยคำนึงถึงการบวมตัวของเมมเบรน

1.4.3 ศึกษาวิธีการทดลองและเตรียมความพร้อมของเครื่องมือและสถานที่ทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงให้พร้อมสำหรับการใช้งานกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

1.4.4 เตรียมหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดโดยคำนึงถึงความหนืด แรงตึงผิว และขนาดอนุภาค

1.4.5 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนเมมเบรน และศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้

1.4.6 เตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบและนำไปทดสอบสมรรถนะและความทนคาร์บอนมอนอกไซด์

1.4.7 ขยายส่วนเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์

1.4.8 วิเคราะห์ข้อมูล ผลการทดลอง สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถพัฒนาวิธีการเตรียมและการขยายส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตบนเมมเบรนได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีการให้ความสนใจในการแก้ไขวิกฤตพลังงานเป็นอย่างมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ในปัจจุบันกำลังจะหมดไป ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแหล่งพลังงานอย่างอื่นมาทดแทน เซลล์เชื้อเพลิงก็เป็นหนึ่งในทางเลือกที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นการใช้พลังงานจากแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจน ซึ่งสามารถผลิตได้หลายวิธี นอกจากนั้นเซลล์เชื้อเพลิงยังเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาไหม้ ผลที่ได้คือประสิทธิภาพในการทำงานที่สูง โดยมีเพียงความร้อนและน้ำเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเท่านั้นจึงทำให้ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง [1]

หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวิส Christian Friedrich Schönbein ในปี ค.ศ. 1838 และตีพิมพ์ในเดือนมกราคมปีถัดมาใน "Philosophical Magazine" อาศัยหลักการจากบทความชิ้นนี้ เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกสร้างขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเวลส์ Sir William Grove ต้นแบบของเขาได้ตีพิมพ์ในปี 1843 จนกระทั่งในปี 1959 วิศวกรชาวอังกฤษ Francis Thomas Bacon ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 กิโลวัตต์ได้สำเร็จ ในปีเดียวกันนี้เองที่กลุ่มที่นำโดย Harry Ihrig ได้ผลิตแทรกเตอร์ขนาด 15 กิโลวัตต์ให้กับ Allis-Chalmers ซึ่งได้นำไปแสดงทั่วสหรัฐอเมริกา ระบบนี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ไฮโดรเจนอัดและแก๊สออกซิเจนเป็นสารตั้งต้น ในปีเดียวกันนี้เองที่ Bacon และทีมงานได้สร้างเครื่องผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ที่ใช้งานได้จริงสำหรับเครื่องเชื่อม ซึ่งนำไปสู่สิทธิบัตรของ Bacon ในช่วง 1960s ซึ่งหลักการเดียวกันนี้ก็ถูกนำไปใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐด้วยเพื่อผลิตน้ำดื่มและพลังงาน ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงต้นนี้ยังสูงอยู่มากเพราะค่าวัสดุที่แพง นอกจากนี้ยังทำงานในอุณหภูมิที่สูงมากจนเป็นปัญหาในการประยุกต์ใช้ อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงยังคงเป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากเชื้อเพลิงที่หาง่าย (ไฮโดรเจนและออกซิเจน) และการทำงานที่สะอาด

การพัฒนาต่อไปในช่วงปี 1980s และ 1990s โดย Geoffrey Ballard เจ้าของบริษัทเซลล์เชื้อเพลิงในแคนาดาที่โด่งดัง Ballard Power Systems Inc. นำมาซึ่งการใช้ Nafion วัสดุที่ถูกรู้ว่า

และทนทานเป็นอิเล็กทรอนิกส์ และการลดการใช้แพลทินัม ทำให้อนาคตการใช้เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผู้บริโภค เช่นในรถยนต์มีความเป็นไปได้มากขึ้น

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ในการเปลี่ยนพลังงานเคมี (Chemical energy) เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาไหม้ ผลที่ได้คือประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา คือ น้ำและความร้อนเท่านั้น ส่งผลให้ไม่เกิดมลภาวะและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [2]

เซลล์เชื้อเพลิงจัดเป็นเซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) และมีหลักการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปซึ่งจะแตกต่างกับแบตเตอรี่ที่เป็นตัวเก็บพลังงานในตัวเองและไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนั้นเซลล์เชื้อเพลิงยังสามารถนำหน่วยย่อยเล็กๆมาต่อกันเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นอีกด้วย [2, 3, 4]

2.1.1 องค์ประกอบทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง [2, 5]

- ตัวแปรรูปเชื้อเพลิง (Fuel processor)

ตัวแปรรูปเชื้อเพลิงทำหน้าที่ในการแปรรูปเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปที่สามารถนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงได้ เช่น กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ผลิตจาก แก๊สโซลีน ดีเซล เมทานอล หรือชีวมวล จำเป็นต้องมีการใช้รีฟอร์มเมอร์ (Reformer) ในการแปลงเชื้อเพลิงเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของแก๊สผสมของไฮโดรเจนและสารประกอบคาร์บอน หลังจากนั้นก็ต้องนำแก๊สผสมที่ได้ไปแยกสิ่งเจือปนพวก ซัลเฟอร์หรือคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนที่จะส่งเข้าไปทำปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป เพื่อป้องกันไม่ให้อะไรเหล่านั้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเป็นการลดประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนในกรณีที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงนั้น ไม่จำเป็นต้องมีตัวแปรรูปเชื้อเพลิง แต่ก็ควรจะมีการติดตั้งตัวกรองเพื่อป้องกันสิ่งเจือปนเข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงเช่นกัน

- อุปกรณ์แปลงผันพลังงาน – ชุดเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack)

เซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานเคมีจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ากลายเป็นพลังงานในรูปของไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งโดยปกติเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์ให้แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า

1 โวลต์ ดังนั้นเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานจึงต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์มาต่อกันแบบอนุกรมเป็นชุดของเซลล์เชื้อเพลิง โดยกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ที่นำมาต่อ พื้นที่ผิวทั้งหมดของแต่ละเซลล์และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละตัว

- ตัวแปลงและปรับแต่งกระแสไฟฟ้า (Current inverters and conditioners)

กระแสไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อนำไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปได้

- ระบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ (Heat recovery system)

ระบบของเซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไปให้พลังงานในรูปแบบของกระแสไฟฟ้า แต่เนื่องจากในเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิดทำงานที่อุณหภูมิสูงจึงมีพลังงานความร้อนส่วนเกินออกมาเป็นจำนวนมากซึ่งพลังงานความร้อนส่วนเกินเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำหรือน้ำร้อนหรือกระแสไฟฟ้าโดยผ่านกังหันแก๊สหรืออาจใช้เทคโนโลยีอื่นๆเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

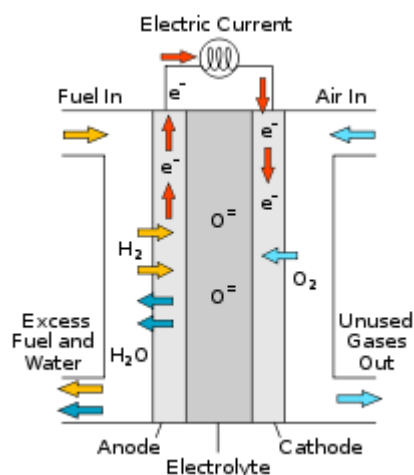
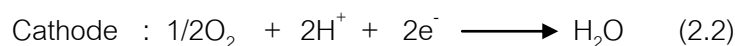
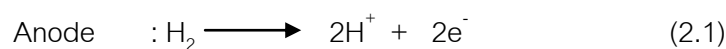
2.1.2 ชนิดและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [2, 5]

เซลล์เชื้อเพลิงมีอยู่หลายประเภท แต่ละประเภทแยกแยะโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีหรือชนิดของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่นำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงบางประเภทมีขนาดใหญ่ เพื่อจะได้กำลังไฟฟ้ามาก สามารถนำไปจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโรงงานได้ แต่บางชนิดทำให้มีขนาดเล็ก เพื่อนำไปให้พลังงานกับยานพาหนะ ที่ต้องการภาระเบาๆ หรือถ้ามีขนาดเล็กจนสามารถพกพาได้ ก็สามารถนำไปใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์แบบโน้ตบุ๊ก หรือ โทรศัพท์มือถือได้ โดยมีชนิดดังต่อไปนี้

- เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ถูกใช้งานกับระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงๆ เช่นในทางอุตสาหกรรม และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง จะใช้เซรามิกแข็งที่มีโครงสร้างของ Y_2O_3 Stabilized ZrO_2 เป็นอิเล็กโทรไลต์โดยอุณหภูมิการทำงานประมาณ $600-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงถึง 60 % และมีเสถียรภาพที่ดี อายุการใช้งานนานกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์

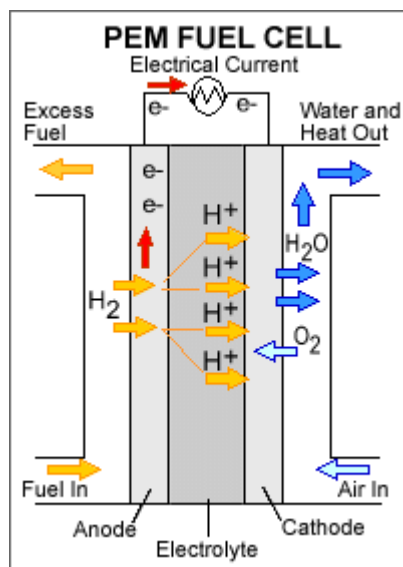
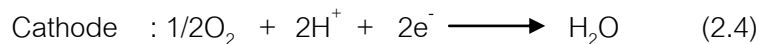
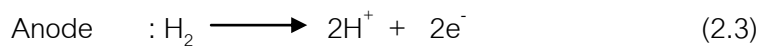


ภาพที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง [2]

- เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton Exchange Membrane Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ให้กำลังไฟฟ้าสูงและสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าได้รวดเร็วตามค่าที่ต้องการปัจจุบันได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น ในรถยนต์ อาคารสำนักงาน หรือใช้ในกล้องถ่ายภาพ ซึ่งเซลล์ชนิดนี้มีอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็งขนาดบางเรียกว่า Proton Exchange Membrane (PEM) ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาคือ แพลทินัม (Pt) โดยมีอุณหภูมิการทำงานอยู่ที่ $50-80\text{ }^{\circ}\text{C}$

ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์

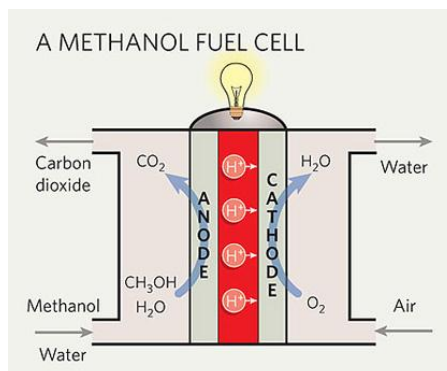
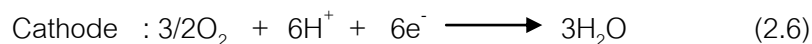
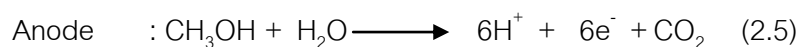


ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์ [2]

- Direct Methanol Fuel cell (DMFC)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาต่อมาจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC แต่ใช้เชื้อเพลิงเป็นสารละลายเมทานอล (Methanol Solution) การทำปฏิกิริยามีอุณหภูมิการทำงานในช่วง 60 °C - 90°C ความดันไม่เกิน 2 atm ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแอโนดเป็น Pt – Ru alloy และขั้วแคโทดเป็น Pt

ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์

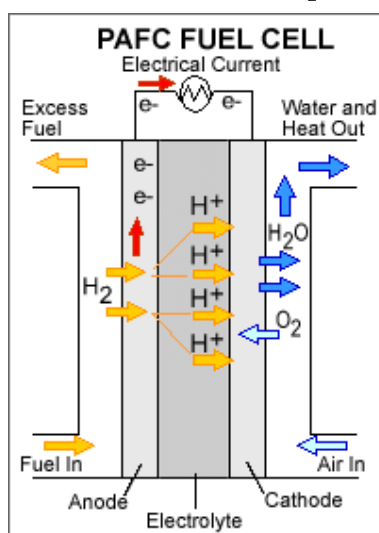
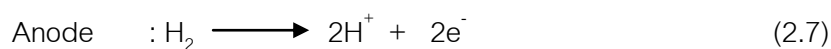


ภาพที่ 2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด Direct Methanol Fuel cell [2]

- เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้กำลังถูกพัฒนาเพื่อการค้าและอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายเพราะสามารถนำไปใช้ในโรงพยาบาล โรงแรม สำนักงาน โรงไฟฟ้าขนาดย่อมหรือใช้ในรถยนต์ขนาดใหญ่ เช่น รถเมล์ โดยเซลล์ชนิดนี้จะใช้กรดฟอสฟอริกเป็นอิเล็กโทรไลต์โดยอุณหภูมิการทำงานช่วง $160\text{ }^{\circ}\text{C} - 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้กรดฟอสฟอริกจะนำไฮออนได้ไม่ดีนัก

ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์

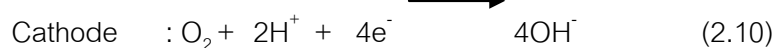
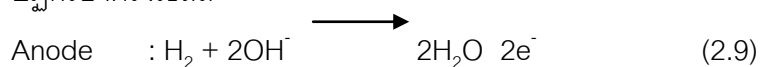


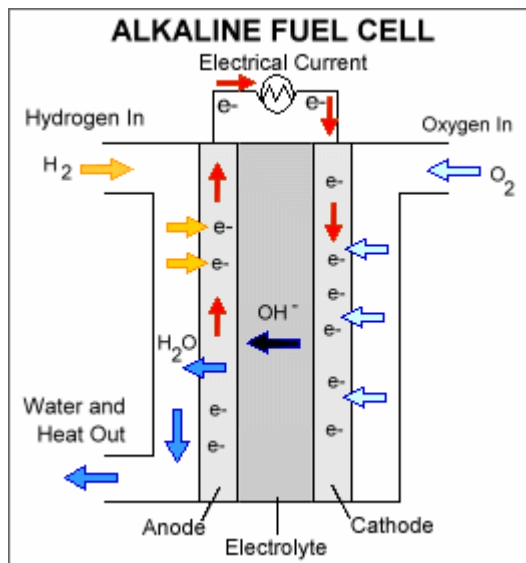
ภาพที่ 2.4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก [2]

- Alkaline Fuel Cell

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ถูกพัฒนาและนำไปใช้ในองค์การนาซา สำหรับใช้ในสถานีอวกาศ เนื่องจากสามารถให้ประสิทธิภาพได้เกือบ 70% แต่ยังมีราคาค่อนข้างสูง เซลล์ชนิดนี้ใช้ KOH (Potassium Hydroxide) เข้มข้น 30-50 wt% เป็นอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการทำงานอยู่ที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C} - 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด คือ nickel และด้านขั้วแคโทดคือ Nickel oxide

ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์



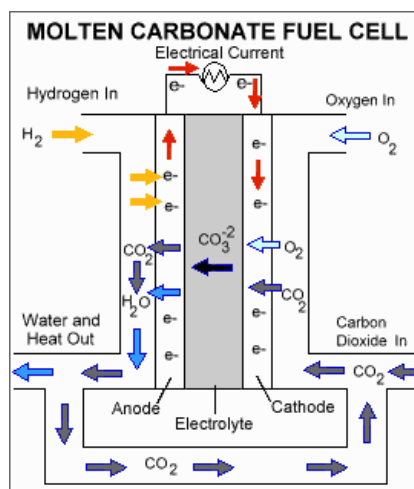
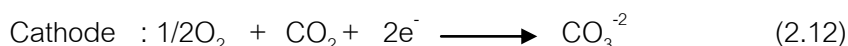
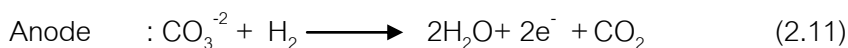


ภาพที่ 2.5 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ [2]

- Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด ใช้เชื้อเพลิงชนิด Coal-base fuel มีอิเล็กโทรไลต์เป็นส่วนผสมของ alkaline carbonate ซึ่งฝังอยู่ใน Lithium aluminates matrix มีอุณหภูมิการทำงานในช่วง 600 °C - 700°C จะทำให้ Alkaline carbonate สร้างทางเกลือที่นำประจุได้ดีมาก เซลล์ชนิดนี้มีตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนด คือ Nickel และด้านขั้วแคโทดคือ Nickel oxide

ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์



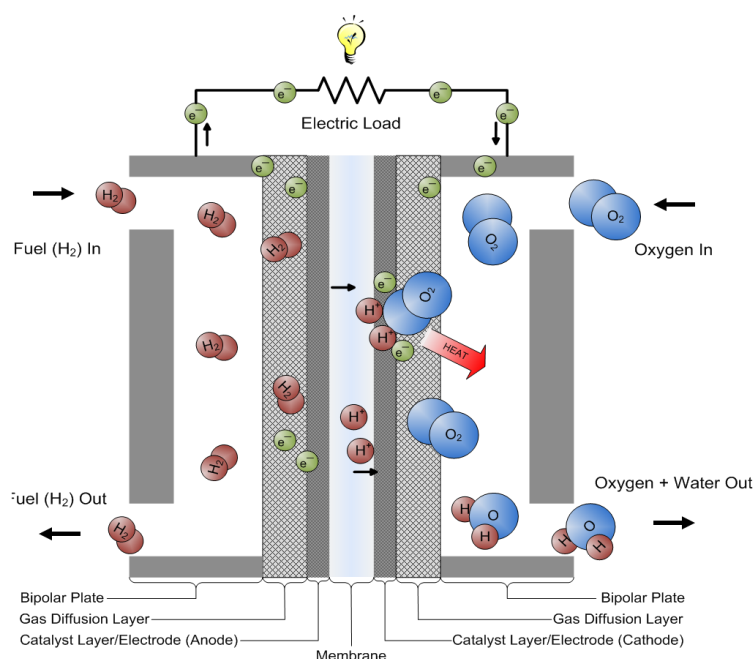
ภาพที่ 2.6 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton Exchange Membrane Fuel Cell; PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มหรือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นหนึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยม เนื่องจากให้ประสิทธิภาพและให้ความหนาแน่นพลังงานสูงจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยมีผลิตภัณฑ์คือน้ำและความร้อนเท่านั้น สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ (60-80 °C) ไม่ต้องใช้สารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนทำให้อุปกรณ์ในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงมีการสึกหรอน้อยและทำให้สามารถเริ่มต้นการทำงานได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีขนาดเล็กเหมาะสำหรับการใช้เป็นแหล่งพลังงานของอุปกรณ์พกพาขนาดเล็ก

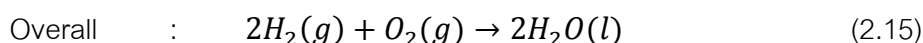
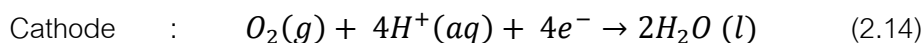
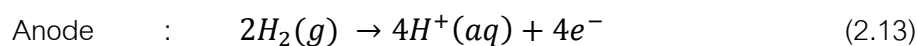
ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะมีตระกูล เช่น แพลตินัมซึ่งราคาแพง และมีความไวต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จึงจำเป็นต้องใช้กับแก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงหรือต้องใช้เตาปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นเพื่อลดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ผลิตจากแอลกอฮอล์ทำให้เป็นการเพิ่มต้นทุนมากขึ้นอีก ปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาหลักที่นักวิจัยในปัจจุบันกำลังพัฒนาและปรับปรุงต่อไป

2.2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [6, 7]



ภาพที่ 2.7 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [16]

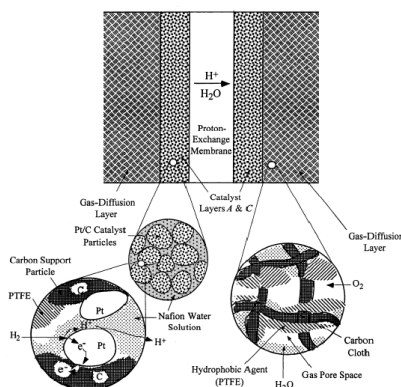
หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์แสดงในภาพที่ 2.7 จะเห็นว่าภายในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่มีความพรุน 2 ขั้ว คือ แอโนด (Anode) และ แคโทด (Cathode) ประกบติดกับเมมเบรนที่อยู่ตรงกลาง ปฏิกิริยาเริ่มต้นที่ขั้วแอโนด (ซ้ายมือ) โดยเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ถูกป้อนเข้ามาจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) บนตัวเร่งปฏิกิริยา (โดยทั่วไปเป็นแพลทินัม) ได้เป็น อิเล็กตรอน (e^-) และไฮโดรเจนไอออน (H^+) ดังสมการที่ (1) ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกไปยังด้านแคโทด ส่วนไฮโดรเจนไอออน (H^+) ก็เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนที่อยู่ตรงกลางไปยังด้านแคโทดเช่นกัน ส่วนที่ขั้วแคโทดแก๊สออกซิเจนซึ่งทำหน้าที่เป็นสารออกซิเดนต์ถูกป้อนเข้ามาจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และ อิเล็กตรอน (e^-) ได้เป็นน้ำ (H_2O) และความร้อน ดังสมการที่ (2)



2.2.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์

2.2.2.1 ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอ (Membrane Electrode Assembly, MEA) [8, 9]

ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอถือเป็นหัวใจสำคัญในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์ เนื่องจากเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ขั้วอิเล็กโทรดที่มีรูพรุน 2 ขั้วและเมมเบรนซึ่งถูกประกบและผ่านการกดอัดให้ติดกันด้วยอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างและส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์ [5]

2.2.2.1.1 ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode)

ขั้วอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนทั้งสองขั้วคือขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าซึ่งต้องประกอบไปด้วย 3 เฟส คือ แก๊สตั้งต้น อิเล็กโทรไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาโดยที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน ส่วนที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งแต่ละขั้วประกอบไปด้วยสองชั้นย่อยดังนี้

- ชั้นแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer, GDL) [9, 10]

ชั้นแพร่ของแก๊สเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างแผ่นสะสมของกระแสไฟฟ้าและชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทำหน้าที่เป็นทางผ่านและช่วยในการกระจายแก๊สเชื้อเพลิงที่มาจากช่องทางการไหลของแก๊สไปยังชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชั้นแพร่แก๊สจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเพื่อนำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังช่วยในการเป็นเส้นทางผ่านของน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าออกไปยังช่องทางการไหลของแก๊สและระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าออกจากเซลล์เชื้อเพลิง อีกทั้งยังเป็นตัวรองรับเชิงกล (Mechanical support) เพื่อป้องกันการซ้อนทับกันระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนกับช่องทางการไหลของแก๊ส ดังนั้นชั้นแพร่แก๊สที่ดีต้องสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี นอกจากนี้ควรมีความพรุนสูงแต่ไม่ควรสูงเกินไปเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีอนุภาคขนาดเล็ก ควรมีความยืดหยุ่นเพียงพอต่อการรักษาสภาพการนำไฟฟ้าและแข็งแรงพอที่สามารถช่วยให้เอ็มอีเอใช้งานได้

- ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) [11]

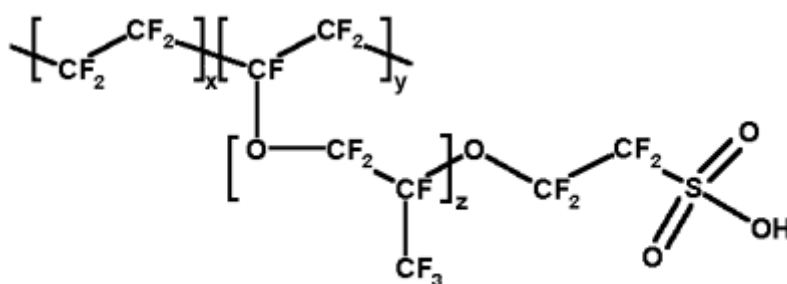
ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์โดยตรง ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีควรมีความหนาแน่นและควรมีความต้านทานการถ่ายมวลสารต่ำเพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากที่สุดและเป็นการลดระยะทางของแก๊สเชื้อเพลิงที่แพร่เข้าสู่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังควรนำไฟฟ้าและไอออนได้ดี มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีเอ็มส่วนใหญ่เป็นโลหะมีตระกูล เช่น แพลตินัม (Pt) แพลเลเดียม (Pd) หรือ นิกเกิล (Ni) เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มากที่สุดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตินัม เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดอื่น นอกจากนั้นยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อนอีกด้วย แต่พลทินมั้นมีราคาแพงและยังไม่สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เจือปนมากับแก๊สเชื้อเพลิงในระดับพีพีเอ็มซึ่งเป็นปัญหาหลักของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มในปัจจุบันและต้องมีการพัฒนาแก้ไขกันไป

2.2.2.1.2 เมมเบรน

เมมเบรนที่เหมาะสมสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มต้องมีความสามารถในการนำประจุไฟฟ้าได้ดีแต่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า คือยอมให้ออกซิเจนผ่านแต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน มีความยืดหยุ่นได้ดีแม้อยู่ในสภาวะแห้ง ยอมให้น้ำแพร่ผ่านได้แต่ไม่ยอมให้แก๊สผ่าน แข็งแรงมากพอที่จะรับแรงได้พอสมควร นอกจากนั้นยังควรทนทานต่อสารเคมี ความร้อนและการควบคุมปริมาณน้ำให้เหมาะสม เมมเบรนที่ใช้ส่วนใหญ่ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มคือ เปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิค เมมเบรน (Perfluorosulfonic membrane) ซึ่งมีชื่อทางการค้าคือ เนฟิออนเมมเบรน (Nafion membrane) โดยเป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทฟลอน (Tetrafluoroethylene, Teflon) กับ Perfluoro-3,-6-dioxa-4-methyl-7-octene sulfonic acid ซึ่งมีโครงสร้างภาพที่ 2.9 ส่วนของเทฟลอนเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยมีพันธะระหว่างคาร์บอนกับฟลูออรีนที่มีความแข็งแรงซึ่งทำให้มีความทนทานต่อสารเคมี และส่วนที่เป็นหมู่ซัลโฟเนต (SO_3) ซึ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีความสามารถในการดูดซึมโมเลกุลของน้ำโดยบริเวณที่เกิดการดูดซึมน้ำจะมีความแข็งแรงของพันธะระหว่างหมู่ซัลโฟเนตกับโปรตอนอ่อนจึงทำให้โปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ นอกจากนั้นเนฟิออนเมมเบรนแต่ละชนิดมีขนาดและความหนาที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างหลักของเนฟิออนเมมเบรน [7]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของเมมเบรน [7]

ตัวแปรในโครงสร้าง	ชื่อทางการค้า	น้ำหนักสมมูล	ความหนา (ไมโครเมตร)
	DuPont		
m=1, x=5-13.5, n=2, y=1	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

2.2.2.2 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate) และปะเก็น (Seal) [12]

แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate) เป็นส่วนที่คั่นอยู่ระหว่างเซลล์แต่ละเซลล์ ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงและเป็นช่องทางการไหลของแก๊ส (Gas flow field plate) ซึ่งอยู่บริเวณผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า โดยรูปแบบของช่องทางการไหลคำนึงถึงทิศทางและอัตราการไหลที่เหมาะสมกับเซลล์เชื้อเพลิง รูปแบบที่นิยมใช้ เช่น Serpentine, Parallel และ Spiral เป็นต้น นอกจากนี้แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้ายังเป็นส่วนที่ช่วยในการป้องกันการรั่วของแก๊ส ระบายความร้อน และจัดการน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็นแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น แกรไฟต์ พอลิเมอร์ผสม โลหะ เป็นต้น โดยสามารถแบ่งแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเป็น 2 ประเภท คือ แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Unipolar plate) และแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate)

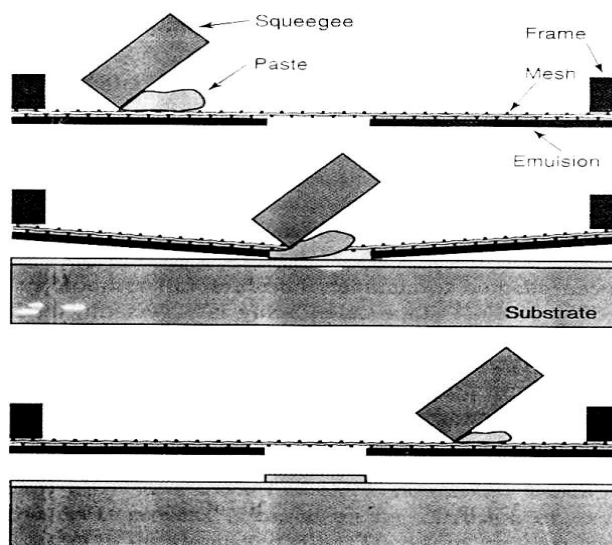
ส่วนปะเก็น (Seal) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้บริเวณแผ่นช่องทางการไหลยึดติดกับเอ็มอีเอ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการรั่วของแก๊สเชื้อเพลิงอีกด้วย

2.3 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา [13]

การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด และการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรน โดยการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 แบบสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดที่ต้องการตลอดจนทักษะในการเตรียม ในปัจจุบันมีวิธีที่นิยมใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น การระบาย (Brushing) การสเปรย์ (Spraying) การพิมพ์อิงค์เจ็ต โดยแต่ละวิธีมีวิธีการ ขั้นตอนการเตรียม และลักษณะของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้แตกต่างกันไปซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ได้ ไม่ว่าจะเป็น ความพรุน ความหนา การนำไฟฟ้าและความต้านทาน ซึ่งทั้งหมดจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

2.3.1 การระบาย [13]

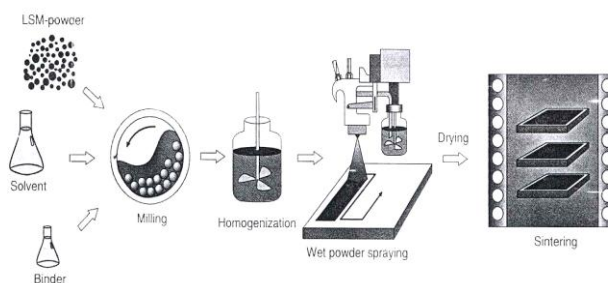
การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยการพิมพ์หรือการระบายจะเริ่มจากการผสมตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวทำละลายและสารเคมีอื่นๆ เช่นเดียวกับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยการพ่นละออง แต่สารผสมจะต้องมีความหนืดสูงกว่าการพ่นละออง และต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง จากนั้นจึงนำสารผสมไประบายบนแผ่นรองรับด้วยแปรงหรือแม่พิมพ์ แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่ก็ได้ แผ่นรองรับที่นิยมใช้ได้แก่ กระดาษคาร์บอน ผ้าคาร์บอน เป็นต้น ถ้ามีการใช้แผ่นรองรับขั้วอิเล็กโทรดจะมีชั้นแพร่ (Diffusion layer) เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงและรักษาระดับน้ำในเซลล์เชื้อเพลิง แต่ถ้าไม่ใช้แผ่นรองรับหรือใช้แผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุน เมื่อทำการประกบขั้วไฟฟ้าเข้ากับเมมเบรนจะต้องนำแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนออก โดยทั่วไปแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนที่ใช้ในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดจะเป็นพวกพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอน โดยมีขั้นตอนการเตรียมแสดงดังในภาพที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการเตรียมชั้นอิเล็กโทรดด้วยการพิมพ์หรือการระบาย [13]

2.3.2 การสเปรย์ [13]

สารละลายที่ใช้ในกระบวนการพ่นละอองนี้จะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง สำหรับแผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่ก็ได้โดยทั่วไปมักจะใช้กระดาษคาร์บอน ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยการพ่นละอองแสดงในรูปที่ 2.5 เริ่มจากการนำผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับตัวทำละลายและส่วนผสมอื่น แล้วนำไปพ่นบนตัวรองรับ ระหว่างการพ่นจะเกิดการระเหยของตัวทำละลายทำให้ผงตัวเร่งปฏิกิริยาจับกับแผ่นรองรับหลังจากนั้นนำไปประเหยให้แห้ง ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีนี้คือ ความหนืดของสารผสมก่อนการพ่นละอองและระยะเวลาในการแห้งของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.11 กระบวนการเตรียมชั้นไฟฟ้าด้วยวิธีการพ่นละออง [13]

2.3.3 การพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ต [14]

การพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ตมีจุดสำคัญอยู่ที่การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ต โดยหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีสมบัติทางกายภาพซึ่งก็คือความหนืดและแรงตึงผิวอยู่ในช่วงที่เครื่องพิมพ์สามารถพิมพ์ได้ จากนั้นสามารถดำเนินการพิมพ์อิงค์เจ็ตได้โดยสามารถกำหนดขนาดรูปร่างและความสม่ำเสมอของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี

2.4 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ต [15]

ในปัจจุบันมีการใช้การพิมพ์อิงค์เจ็ตได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นในสำนักงานหรือบ้านเรือนขนาดเล็กเนื่องจากใช้งานได้ง่ายและสะดวกในการทำงาน โดยหลักการทำงานของการพิมพ์อิงค์เจ็ตคือการสร้างหยดหมึกลงไปเกาะบนกระดาษจนกลายเป็นรูปภาพต่างๆ

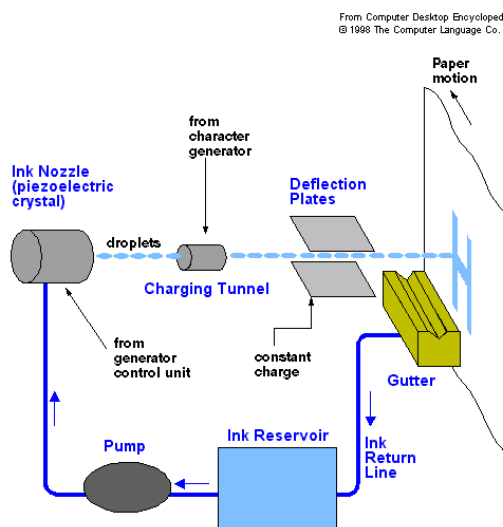
เทคโนโลยีการพิมพ์อิงค์เจ็ตนั้นได้มีการริเริ่มมาตั้งแต่ปี 1950 แต่เริ่มมีการใช้งานได้จริงๆในปี 1970 โดยบริษัท Epson, Hewlett-Packard (HP) และ Canon ซึ่งในปัจจุบันกลายเป็นบริษัทผู้นำทางด้านเทคโนโลยีการพิมพ์อิงค์เจ็ต

2.4.1 เทคโนโลยีการพิมพ์อิงค์เจ็ต [15]

เทคโนโลยีการพิมพ์อิงค์เจ็ตอาจแบ่งเป็น 2 แบบดังนี้

2.4.1.1 การพิมพ์แบบหยดต่อเนื่อง (Continuous inkjet) [15]

การพิมพ์แบบหยดต่อเนื่องเป็นการใช้ความดันสูงโดยตรงในการทำให้น้ำหมึกไหลผ่านหัวพิมพ์ขนาดเล็กระดับไมโครเมตร โดยหัวพิมพ์แบบ Piezoelectric crystal จะทำการสร้างเป็นหยดหมึกโดยการสั่น หลังจากนั้นหยดหมึกจะถูกส่งผ่านสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมทิศทางและไปเกาะบนกระดาษดังรูป



ภาพที่ 2.12 การพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบหยดต่อเนื่อง [15]

การพิมพ์แบบหยดต่อเนื่องเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างจะเก่าและใช้กันมานานแล้ว ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือหยดหมึกที่ได้จะมีความเร็วสูงซึ่งทำให้สามารถเพิ่มระยะห่างระหว่างหัวพิมพ์และแผ่นรองรับได้มากขึ้น สามารถพิมพ์ด้วยความถี่สูงทำให้พิมพ์ได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังไม่ค่อยพบปัญหาการอุดตันจึงสามารถใช้กับสารระเหยง่ายพวกแอลกอฮอล์หรือคีโตนเพื่อช่วยให้หยดหมึกที่ไปเกาะบนแผ่นรองรับได้แน่นและแห้งได้เร็วขึ้น

2.4.1.1.1 การพิมพ์แบบควบคุมการหยด (Drop-on-demand) [15]

การพิมพ์แบบควบคุมการหยดใช้หลักการพ่นน้ำหมึกผ่านหลอดฉีกรเล็กๆที่เรียงตัวกันเป็นแถวซึ่งถูกควบคุมด้วยไฟฟ้า เมื่อได้รับคำสั่งน้ำหมึกจะถูกพิมพ์ออกมาที่ละแถวจนครบบรรทัด ปัจจุบันการพิมพ์แบบควบคุมการหยดแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

2.4.1.1.2 การพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบใช้ความร้อน (Thermal drop-on-demand inkjet printing) [15]

เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นการพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบใช้ความร้อนซึ่งจะพบได้ในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทจากบริษัท Canon, Hewlett-Packard หรือ Lexmark ซึ่งเครื่องพิมพ์ประกอบไปด้วยตลับหมึกพิมพ์ที่มีการติดตั้งแผงวงจรให้ความร้อน หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบนี้คือการผ่านกระแสไฟฟ้าแบบเป็นจังหวะให้เกิดความร้อนในขณะหนึ่งทำให้ของเหลวหรือหมึกพิมพ์เกิดการระเหยอย่างรวดเร็วกลายเป็นไอและฟุ้งอากาศซึ่งจะเป็นการเพิ่ม

ความดันให้หมึกไหลผ่านหัวพิมพ์กลายเป็นหยดหมึกไปเกาะบนแผ่นรองรับ โดยหมึกพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบใช้ความร้อนจะมีส่วนประกอบที่มีน้ำเป็นหลักและสามารถระเหยได้ง่าย

2.4.1.2 การพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบใช้แรงดัน (Piezoelectric drop-on-demand inkjet printing)

ในทางการค้าและอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบใช้แรงดันซึ่งในปัจจุบันผลิตโดยบริษัท Epson และ Brother Industries เครื่องพิมพ์แบบใช้แรงดันจะแตกต่างกับแบบใช้ความร้อนโดยสิ้นเชิง เนื่องจากเครื่องพิมพ์แบบใช้แรงดันจะใช้วิธีการให้กระแสไฟฟ้าผ่านไปยังแผ่นคริสตัลทำให้แผ่นคริสตัลสั่นตัวและเปลี่ยนรูปร่างซึ่งจะทำให้น้ำหมึกที่อยู่ด้านบนในถังเก็บถูกพ่นออกจากหัวพิมพ์ โดยสามารถควบคุมขนาดหยดหมึกได้โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยังแผ่นคริสตัล ถ้าแผ่นคริสตัลสั่นแรงขนาดของหยดหมึกที่ได้จะใหญ่ แต่ในทางกลับกันถ้าแผ่นคริสตัลสั่นเบาจะทำให้หยดหมึกมีขนาดเล็ก เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบใช้แรงดันมักใช้กับงานพิมพ์ที่มีความละเอียดสูงนอกจากนั้นยังสามารถพิมพ์ได้รวดเร็วกว่า

2.4.2 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Dimatix drop manager



ภาพที่ 2.13 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Dimatix drop manager

เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท Dimatix drop manager เป็นเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบใช้แรงดัน (Piezoelectric drop-on-demand inkjet printing) ที่ใช้ในการพิมพ์สารเคมีหรือหมึกพิมพ์ต่างๆ ได้หลายชนิดโดยภายในประกอบด้วยหัวพิมพ์ขนาด 21.5 ไมโครเมตรจำนวน 16 หัวพิมพ์ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ถึง 70 องศาเซลเซียส สามารถพิมพ์อิงค์เจ็ทของไหลที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายที่มีความหนืดอยู่ในช่วง 10-12 เซนติพอยส์ และมีความหนืดอยู่ในช่วง 2.8-3.3 นิวตันต่อเมตร

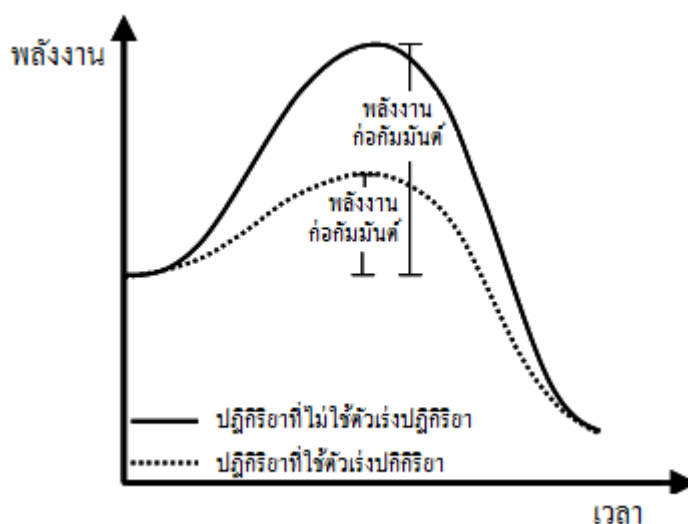
นอกจากนั้นยังมีตัวกรองสิ่งแปลกปลอมที่อาจเข้ามากับหมึกพิมพ์ที่มีขนาดมากกว่า 0.2 ไมครเมตร

2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา [16]

ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญมากสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมี บางปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแม้มีตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกล่าวคือไม่มีการสูญหายไปของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ในขณะที่ตัวยับยั้ง (Inhibitor) เป็นสารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

2.5.1 กลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา นั่นคือทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงเส้นทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยาไปในทิศทางที่มีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยที่สุดที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ และเมื่อเส้นทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยามีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยลงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 เส้นทางกาณ์ดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [16]

2.5.2 การจำแนกระบบของตัวเร่งปฏิกิริยา [17]

ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกจำแนกได้ 3 ชนิดโดยพิจารณาจากเฟส (Phase) ของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้น

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ส่วนใหญ่มักเป็นสารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นละลายอยู่ด้วยกัน ตัวเร่งปฏิกิริยา เอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน แต่มีข้อเสียคือ มักสลายตัวหรือเสถียรภาพในภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง ตัวเร่งปฏิกิริยา เอกพันธ์ได้รับความสนใจมาก เนื่องจากมีความสามารถในการเลือกทำปฏิกิริยาสูงและไวต่อปฏิกิริยาโดยเฉพาะปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งระบบปฏิกิริยาเอกพันธ์มีข้อดีคือสามารถกำจัดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าในระบบปฏิกิริยารีดอกซ์ แต่มีข้อเสียคือการแยกสารผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากกันทำได้ยาก

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะแตกต่างกับสารตั้งต้น หรือไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยส่วนใหญ่จะมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้นเป็นแก๊ส ของเหลว หรือเป็นแก๊สอยู่ร่วมกับของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งมีสมบัติทางเคมีของผิว จึงเกิดปฏิกิริยาจำเพาะตามธรรมชาติทางเคมีของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็งในการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและระบบของสารตั้งต้นกับสารผลิตภัณฑ์ต้องไม่เปลี่ยนแปลงธรรมชาติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา ยกเว้นบริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่ผิว (Surface interaction) จึงต้องไม่เกิดปฏิกิริยาทะลุเข้าไปในเนื้อชั้นในของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นปฏิกิริยาที่ผิวจะเป็นปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) เท่านั้น

3. เอนไซม์ (Enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกี่ยวกับปฏิกิริยาชีวเคมี โดยทั่วไปแล้วเอนไซม์จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจำเพาะ (Specific catalyst) นั่นคือจะเร่งปฏิกิริยาได้เพียงหนึ่งปฏิกิริยาของหนึ่งสารตั้งต้น

2.6 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง [17]

การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

2.6.1 โพลาริเซชัน

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่อเข้ากับวงจรภายนอกและมีการป้อนเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงไม่เท่ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีหรือที่ได้จากกระบวนการผันกลับได้ (Reversible process) ซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนจะให้ค่าต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีประมาณ 1.229 โวลต์ ซึ่งผลต่างระหว่างค่าความต่างศักย์จริงที่จ่ายให้กับวงจรภายนอกกับความต่างศักย์ตามกระบวนการผันกลับได้ตามหลักอุณหพลศาสตร์ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Overpotential) การลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงเกิดในกระบวนการที่เรียกว่า โพลาริเซชัน (Polarization) โดยการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้านั้นลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.16)

$$E_{cell} = E_{cell,rev} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (2.16)$$

เมื่อ $E_{cell,rev}$ คือ ศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้ของเซลล์เมื่อเทียบขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (โวลต์)

η_{act} คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินจากปฏิกิริยาทางเคมีของทั้งขั้วแคโทดและแอโนด (โวลต์)

η_{ohm} คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากความต้านทานที่ขั้วแอโนด (โวลต์)

η_{conc} คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากความเข้มข้น (โวลต์)

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มมาเขียนกราฟโพลาริเซชัน แสดงดังภาพที่ 2.15 จากรูปพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้ตามทฤษฎี โดยเรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้

ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open-circuit potential) แต่จะมีค่าน้อยกว่าค่าทางทฤษฎีเนื่องจากเกิดการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (Reactant cross over) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเมมเบรน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งหนึ่งจะมีการเกิดปฏิกิริยากับผิวขั้วไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เมื่อแก๊สไฮโดรเจนแพร่ข้ามฝั่งไปยังขั้วแคโทดก็เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นประกอบกับฝั่งขั้วแคโทดมีแก๊สออกซิเจน ก็เกิดปฏิกิริยารีดักชันภายในขั้วแคโทดเดียวกันส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าภายใน (Internal current) [2] ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินขึ้นที่ขั้วแคโทด เช่นเดียวกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของออกซิเจนก็จะเกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าลดลง

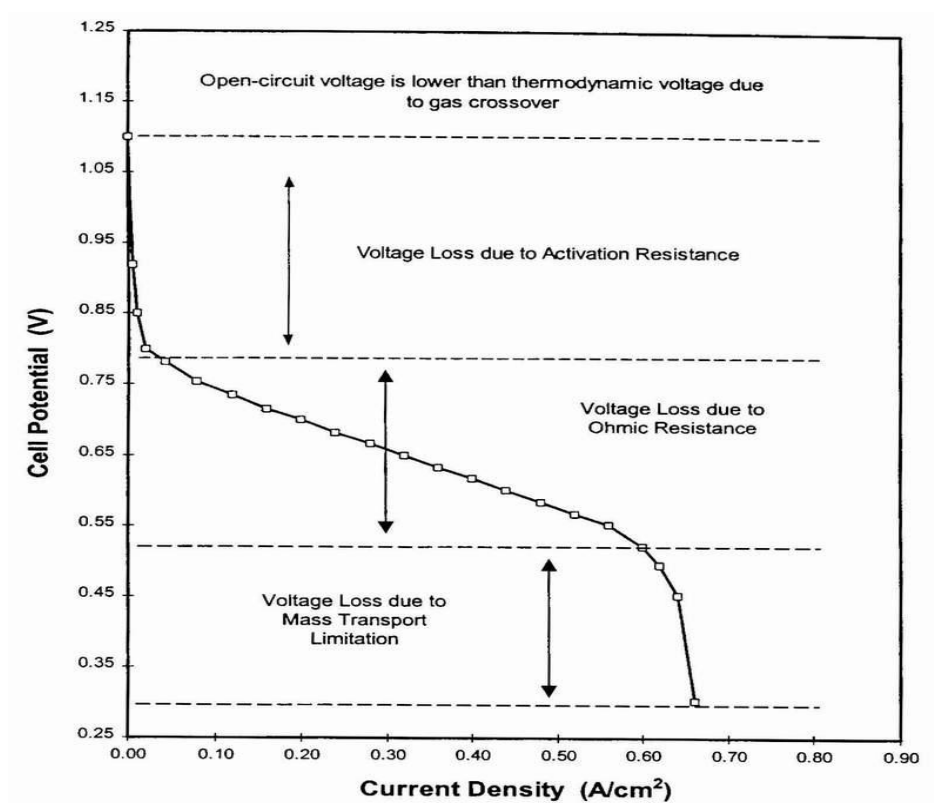
การเกิดโพลาริเซชันขณะที่มีการทำงานเซลล์เชื้อเพลิงเกิดจากการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพลาริเซชันได้ 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.15

1. โพลาริเซชันทางเคมี (Chemical polarization) หรือการสูญเสียจากการเกิดปฏิกิริยา (Activation losses) เป็นโพลาริเซชันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของแก๊สเชื้อเพลิงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากการอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และความดัน ทั้งนี้ปัจจัยต่างๆ ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง หากอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันในทางเคมีที่สูง การลดค่าโพลาริเซชันทางเคมีสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง หรือการเพิ่มความดัน

2. โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization) หรือความต้านทานโอมมิก (Ohmic resistance) เกิดจากการต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนภายในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น ความต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่บริเวณขั้วไฟฟ้าและที่บริเวณแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า และความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนประจุ การลดโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน ทำได้โดยการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวสะสมกระแสไฟฟ้า ชั้นการแพร่และขั้วไฟฟ้าที่มีความต้านทานต่ำ นอกจากนี้การลดความหนาของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนประจุ และขั้วไฟฟ้าเพื่อลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอนและอิเล็กตรอน ก็เป็นอีกหนทางในการลดความต้านทานโอมมิกได้เช่นกัน

3. โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization) หรือความต้านทานจากการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer resistance) เกิดจากเชื้อเพลิงถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าทำให้ความเข้มข้นหรือความดันของสารตั้งต้นลดลง เนื่องจากสารไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นต่างๆ เข้าไปที่ผิวขั้วไฟฟ้าเพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนินสต์

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมาเขียนกราฟจะทำให้ได้กราฟที่ชื่อว่า กราฟโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.15

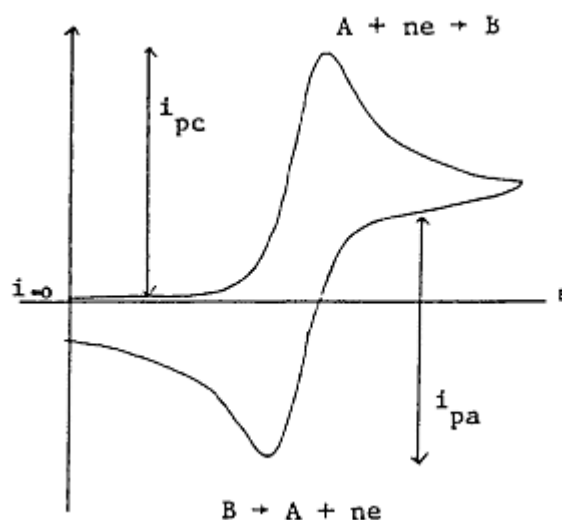


ภาพที่ 2.15 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน [18]

2.6.2 ไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry) [4]

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่จะทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าแบบฟาราเดย์ (Faradaic current) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดอกซ์ ในช่วงความต่างศักย์ที่กำหนด โดยการวัดค่าจะเริ่มจากที่ค่าความต่างศักย์เริ่มต้น จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าความต่างศักย์จำกัด

ที่กำหนดไว้ ซึ่งที่ความต่างศักย์นี้อาจเรียกได้ว่าเป็นความต่างศักย์สลับ (Switching potential) และที่จุดนี้การวัดค่าจะเริ่มไปในทางย้อนกลับ และค่าที่ได้จะเหมือนกับในช่วงแรกของการวัดค่า แต่อยู่ในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งข้อมูลที่ได้จะอยู่ในกราฟไซคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งในส่วนนี้จะหมายถึงในช่วงแรกของการวัดค่า หรือช่วงที่วัดไปข้างหน้ามีการเกิดสารตัวกลางขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากนั้นสารตัวกลางนี้จะถูกรีดิวซ์ในช่วงหลังของการวัดค่าหรือช่วงที่การวัดค่าย้อนกลับนั่นเอง ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อที่จะวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของกระบวนการรีดอกซ์ เนื่องจากสามารถทำได้โดยง่าย นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของระบบนั้นๆ ได้ด้วย



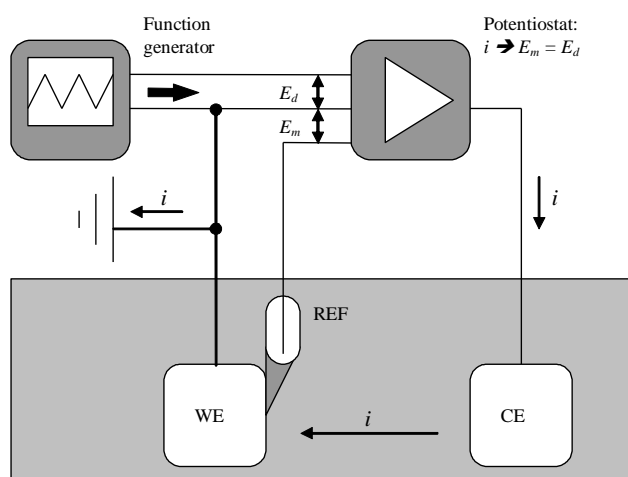
ภาพที่ 2.16 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมทั่วไป [19]

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยไซคลิกโวลแทมโมแกรมนี้ โดยทั่วไปแล้วจะทำการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว (Three-electrode method) ซึ่งระบบจะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าต่างๆดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode, REF) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบค่า ดังนั้นจึงต้องทราบค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าที่จะนำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง นอกจากนี้ยังต้องมีความเสถียร ค่าความต่างศักย์ต้องคงที่ไม่ว่าระบบจะเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด
2. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode, WE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ต้องการศึกษา โดยเป็นการวัดค่าความต่างศักย์หรือควบคุมเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

3. ขั้วไฟฟ้าสวนทาง (Counter electrode, CE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้วงจรไฟฟ้าเคมี สมบูรณ์ เพื่อให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบ

สำหรับการติดตั้งขั้วไฟฟ้านั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 แสดงวงจร Potentiostatic อย่างง่าย โดย WE CE และ REF แทนขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าสวนทาง และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของเซลล์เคมีไฟฟ้าตามลำดับ ขณะที่ E_d คือ ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มเติมที่ป้อนและ E_m คือศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ เมื่อ Potentiostat ทำหน้าที่ปรับทั้งสองค่านี้ให้เท่ากัน [20]

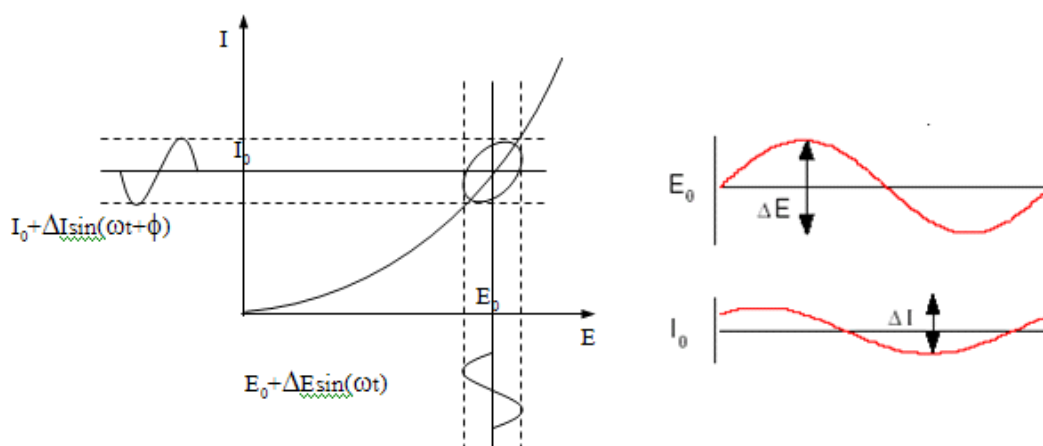
2.6.3 การวิเคราะห์หิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS) [4]

การวิเคราะห์หิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ลักษณะของระบบเคมีไฟฟ้าโดยอาจจะช่วยในการแยกแยะอิทธิพลของลักษณะทางกายภาพและปรากฏการณ์ทางเคมีที่ศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งด้วยการทดลองเพียงขั้นตอนเดียวซึ่งได้รวบรวมช่วงความถี่ที่ใช้งานไว้อย่างเพียงพอ

ในปัจจุบันการวิเคราะห์หิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้าได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในด้านวัสดุศาสตร์ โดยมักใช้ในการศึกษาลักษณะการเคลือบ แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง และการกัด

ก่อน อีกทั้งได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในการวิเคราะห์การแพร่ของไอออนผ่านเมมเบรนและการศึกษารอยต่อของสารกึ่งตัวนำ

หลักการของการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้าคล้ายกับวิธีการวัดอิมพีแดนซ์ทั่วไป ซึ่งทำโดยการให้สัญญาณกระตุ้นในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าแอมพลิจูดต่ำไปยังระบบภายใต้การวิเคราะห์ และวัดการตอบสนองในรูปของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า หรือสัญญาณอื่นๆ ที่สนใจ ภาพที่ 2.18 แสดงกราฟเส้นโค้งของกระแสไฟฟ้า-ศักย์ไฟฟ้า ของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี ในระบบเคมีไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า E_0 จะถูกกระตุ้นด้วยคลื่นรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูดต่ำของ $\Delta E \sin(\omega t)$ ณ ความถี่ค่าหนึ่ง ส่งผลให้เกิดการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากค่า I_0 อยู่ในคลื่นรูปไซน์ของ $\Delta I \sin(\omega t + \phi)$ การตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามศักย์ไฟฟ้าที่ให้ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จาก กฎของโอห์ม (Ohm's Law) ดังสมการที่ (2.17)



$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \quad (2.17)$$

ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี[21]

ค่าอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อนกับขนาดและการเลื่อนเฟส (Phase shift) ซึ่งขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสัญญาณที่ให้จึงสามารถทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ โดยทั่วไปในระบบเคมีไฟฟ้าจะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ไปจนถึง 0.1 เฮิร์ตซ์ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า $Z(\omega)$ เป็นปริมาณเชิงซ้อนจึงสามารถแสดงได้โดยในพิกัดเชิงขั้ว อิมพีแดนซ์ของข้อมูลสามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ (2.18)

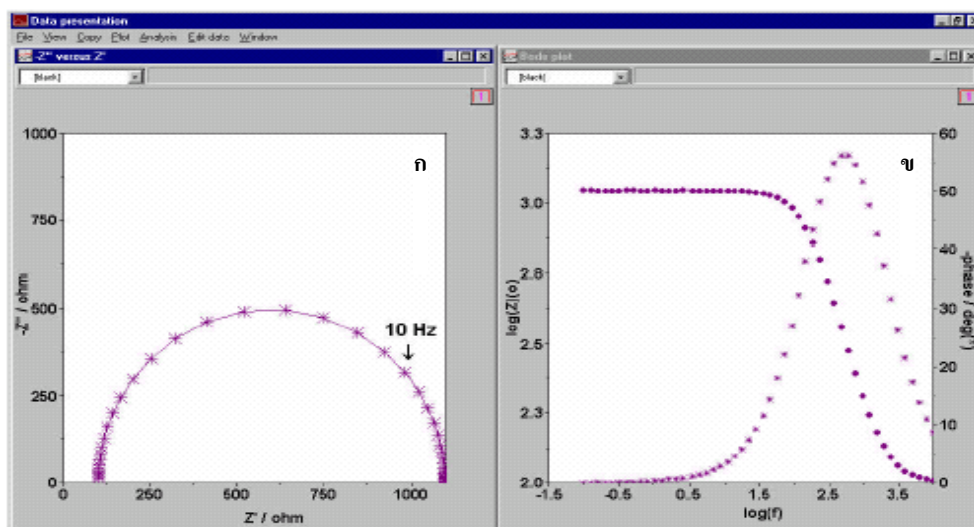
$$Z(\omega) = |Z(\omega)|e^{j\phi(\omega)} \quad (2.18)$$

เมื่อ $|Z(\omega)|$ คือขนาดของอิมพีแดนซ์ และ ϕ คือการเลื่อนเฟส ในพิกัดคาร์ทีเซียน อิมพีแดนซ์เขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ_j(\omega) \quad (2.19)$$

เมื่อ Z_r คือส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ และ Z_j คือส่วนจินตภาพ และ $j = \sqrt{-1}$ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์จะแสดงอยู่ในกราฟที่เรียกว่า Nyquist plot ดังแสดงในภาพที่ 2.19 (ก) ข้อดีของ Nyquist plot คือสามารถแสดงภาพรวมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและยังสามารถอธิบายได้ในเชิงคุณภาพ โดยที่แกนของส่วนจริงจะมีค่าเท่ากับแกนของส่วนจินตภาพ ข้อเสียของ Nyquist plot คือการไม่ได้แสดงมิติของค่าที่ แนวทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยการระบุนค่าความถี่ลงไปบนกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์และการเลื่อนเฟสจะเขียนได้ในรูปฟังก์ชันของความถี่ในรูปแบบของ Bode plot ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ข) ซึ่งจะทำให้การแสดงผลของข้อมูลมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.19 (ก) Nyquist plot และ (ข) Bode plot [22]

ความสัมพันธ์ระหว่างการแสดงผลของข้อมูลในรูปของ Nyquist plot และ Bode plot เป็นไปตามสมการ

$$|Z|^2 = (Z_r)^2 + (Z_j)^2 \quad (2.20)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Z_j}{Z_r} \quad (2.21)$$

$$Z_r = |Z| \cos \phi \quad (2.22)$$

$$Z_j = |Z| \sin \phi \quad (2.23)$$

การทดลองเพื่อหาอิมพีแดนซ์ของระบบเคมีไฟฟ้าจะประกอบด้วยเซลล์เคมีไฟฟ้า (หรือระบบภายใต้การวิเคราะห์) เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Potentiostat) หรือเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Galvanostat) และเครื่องวิเคราะห์การตอบสนองของค่าความถี่ (Frequency Response Analyzer, FRA) ทั้งนี้เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองของค่าความถี่จะใช้คลื่นรูปไซน์ และการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบ เพื่อระบุอิมพีแดนซ์ของระบบ

เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาอิมพีแดนซ์จะประกอบไปด้วยขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 2, 3 หรือ 4 ขั้ว เซลล์พื้นฐานที่สุดจะประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 2 ขั้ว โดยปกติขั้วอิเล็กโทรดภายใต้การวิเคราะห์จะเรียกว่า ขั้วอิเล็กโทรดทำงาน (Working electrode) และขั้วอิเล็กโทรดที่ทำให้วงจรไฟฟ้าครบวงจรเรียกว่า ขั้วอิเล็กโทรดสวนทาง (Counter electrode) ขั้วอิเล็กโทรดมักจะจุ่มอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว สำหรับระบบของแข็งอาจใช้อิเล็กโทรไลต์ซึ่งเป็นของแข็งหรืออาจไม่มีอิเล็กโทรไลต์ก็ได้

ส่วนโครงสร้างของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 3 ขั้ว ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุด ขั้วอิเล็กโทรดที่สามนี้ คือขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการกำหนดศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดทำงานให้มีความแน่นอน เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าสัมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าเดี่ยวไม่สามารถวัดค่าได้ การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบเคมีไฟฟ้าจึงใช้ขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงเป็นหลักในการทำงาน เพราะฉะนั้นขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงจึงควรผันกลับได้ และศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงควรมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาทำงาน

โดยทั่วไปการทดลองเพื่อหาอิมพีแดนซ์จะทำภายใต้การควบคุมศักย์ไฟฟ้า รูปแบบของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะทำการทดลองโดยการกำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง แล้วเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในรูป

ฟังก์ชันไซน์เข้าไปรบกวนศักย์ไฟฟ้าและนำไปใช้กับเซลล์ ค่ากระแสไฟฟ้าจะถูกวัดเพื่อนำไปประมวลค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่โดยทั่วไปการวัดจะทำในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์ฟังก์ชันเดียว แต่หากใช้ฟังก์ชันไซน์แบบหลายฟังก์ชันจะช่วยให้ประหยัดเวลาเมื่อทำการวัดที่ความถี่ต่ำ โดยสัญญาณกระตุ้นที่ใช้มักมีขนาดเล็ก ประมาณ 10 มิลลิโวลต์ โดยช่วงความถี่ที่ใช้ถูกกำหนดโดยข้อจำกัดของเครื่องมือและระบบ ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดของแต่ละค่าความถี่คือส่วนกลับของค่าความถี่นั่นเอง ดังนั้นเมื่อความถี่ต่ำมากก็จะใช้เวลาสูงมากเช่นกันในการอ่านข้อมูลอย่างสมบูรณ์ เช่น การวัดข้อมูลที่ค่าความถี่ 1 มิลลิเฮิร์ตซ์ จะใช้เวลา 1000 วินาที โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะใช้เวลาในการวัดทั้งสิ้นประมาณ 10 นาที สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จะสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของวงจรไฟฟ้าสมมูลและแบบจำลองกระบวนการ ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณขอบเขตที่ใช้ในการอธิบายข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้อย่างเหมาะสมและยังสามารถช่วยในการคาดการณ์พฤติกรรมของระบบภายใต้ภาวะที่หลากหลายได้ วงจรไฟฟ้าสมมูลได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในการแปลงข้อมูลอิมพีแดนซ์ โดยวงจรไฟฟ้าสมมูลสร้างขึ้นมาจากองค์ประกอบที่เป็นที่รู้จักกันดี เช่น ตัวต้านทาน (Resistance) ตัวเก็บประจุ (Capacitance) และ ขดลวดเหนี่ยวนำ รวมไปถึงองค์ประกอบอื่นๆ เช่น เอลิเมนต์เฟสคงที่ (Constant phase element) วาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์ (Warburg impedance) และแทนเจนต์อิมพีแดนซ์ (Tangent impedance) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะต่อกันแบบอนุกรมและขนานเพื่อให้วงจรไฟฟ้าสมมูลมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น ซึ่งองค์ประกอบต่างๆสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของวงจรไฟฟ้าสมมูล [22]

องค์ประกอบของวงจร	อิมพีแดนซ์	การเลื่อนเฟส (องศา)
ความต้านทาน (R)	R	0
ตัวเก็บประจุ (C)	$\frac{1}{j\omega C}$	90-
ขดลวดเหนี่ยวนำ (L)	$j\omega L$	90+
เอลิเมนต์เฟสคงที่ (CPE)	$\frac{1}{(j\omega C)^\alpha}$	-
วาร์เบอร์อิมพีแดนซ์ (Z_{war})	$\frac{R}{\sqrt{j\omega}}$	-
แทนเจนต์อิมพีแดนซ์ (T)	$R \frac{\tanh \sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}}$	-

2.6.3.1 ตัวต้านทาน

มีค่าเทียบเท่ากับอิมพีแดนซ์คือ

$$Z = R \quad (2.24)$$

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะไม่ขึ้นกับค่าความถี่ และไม่มีส่วนจินตภาพ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานจะมีเฟสเดียวกับศักย์ไฟฟ้าเสมอ ตัวอย่างของตัวต้านทานที่ใช้อธิบายระบบเคมีไฟฟ้าได้แก่

1. ความต้านทานโอห์มมิก (Ohmic resistance, R_O) คือความต้านทานที่ทำให้ ศักย์ไฟฟาลดลงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง ในบางครั้งอาจแทนด้วย R นอกจากนี้ค่าความต้านทานชนิดนี้ยังขึ้นกับการเคลื่อนที่ของประจุบริเวณ เมมเบรนและลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดอีกด้วย

2. ความต้านทานเชิงโพลาริไรซ์ (Polarization resistance, R_p) ในขณะเกิดปฏิกิริยา ทางเคมีไฟฟ้านั้นจะทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของขั้วอิเล็กโทรด ขนาดของกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยพลศาสตร์ของปฏิกิริยา และ การแพร่เข้า-ออกของสารตั้งต้นที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดนั่นเอง

2.6.3.2 ตัวเก็บประจุ [22]

มีค่าเทียบเท่ากับอิมพีแดนซ์ คือ

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.25)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ชนิดนี้จะขึ้นกับค่าความถี่และจะมีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้น เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสเลื่อนเป็น -90 องศา เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า ตัวอย่างของตัวเก็บประจุที่ใช้อธิบายระบบเคมีไฟฟ้า ได้แก่ตัวเก็บประจุชั้นซ้อนทับ (Double layer capacitance, C_{dl}) จากการที่บริเวณรอยต่อของขั้วอิเล็กโทรดและเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีชั้นซ้อนทับของประจุ (Electrical double layer) เกิดขึ้นซึ่งตรงนี้จะเปรียบเสมือนกับที่เก็บประจุจากสารละลายที่จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งประจุเหล่านี้จะแยกออกมาจากประจุที่ขั้วอิเล็กโทรด ค่าของตัวเก็บประจุนี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด อุณหภูมิ ความหนาแน่นของประจุ ชนิดของประจุ และความบริสุทธิ์ของสาร

2.6.3.3 เอลิเมนต์เฟสคงที่ [22]

ในการอธิบายของระบบเคมีไฟฟ้านั้นมักจะใช้ตัวเก็บประจุอุดมคติ นั่นคือสมมติให้ลักษณะของพื้นผิวที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเดียวกันตลอดทั้งแผ่น ซึ่งปกติแล้วจะเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงมีการใช้เอลิเมนต์เฟสคงที่อธิบายในส่วนที่ไม่เป็นลักษณะเดียวกันของพื้นผิว

$$Z = \frac{1}{(j\omega C)^\alpha} \quad (2.26)$$

เมื่อ C คือตัวเก็บประจุคความคิต และ α คือค่าคงที่ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $0-1$ โดยที่เมื่อค่า $\alpha = 1$ เอลิเมนต์เฟสคงที่จะทำหน้าที่เสมือนกับตัวเก็บประจุคความคิตนั่นเอง

2.6.3.4 ขดลวดเหนี่ยวนำ [22]

ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำคือ

$$Z = j\omega L \quad (2.27)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น และจะมีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้น แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะมีเฟสเลื่อนเป็น 90° องศาเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า

ค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์เคมีไฟฟ้าบางครั้งก็เป็นผลมาจากการดูดซึมของสารตั้งต้นบนพื้นผิว ซึ่งจะสามารถสร้างแบบจำลองโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำแทนได้นั่นเอง นอกจากนี้การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า การตอบสนองที่ช้าของขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง ในกรณีนี้จะสามารถอธิบายถึงผลของการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้ว่ามีสาเหตุมาจากข้อผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดได้นั่นเอง

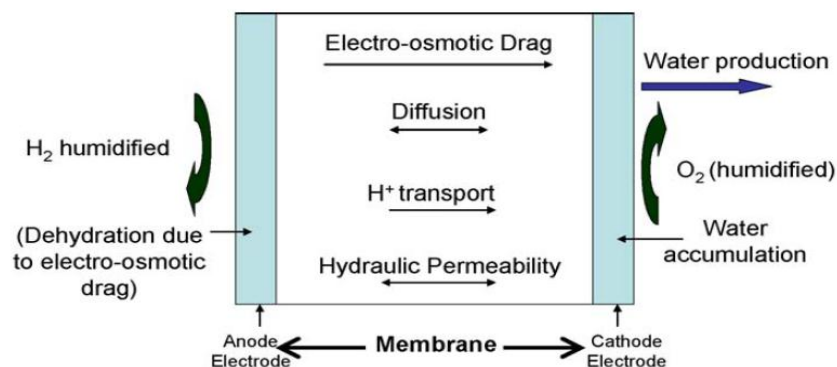
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.7.1 ปริมาณน้ำ [10, 13]

ประสิทธิภาพในการนำโปรตอนของเมมเบรนขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในเมมเบรน ซึ่งโดยปกติเมมเบรนต้องชุ่มน้ำตลอดเวลาเพื่อให้เป็นตัวพาโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด การนำโปรตอนนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณของน้ำมากเกินไปที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับเมมเบรนส่งผลให้ขั้วอิเล็กโทรดถูกน้ำท่วม (Flooding) โดยน้ำเข้าไปอุดตันรูพรุนบนขั้วอิเล็กโทรด ทำให้แก๊สแพร่ผ่านเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง แต่ถ้ามีปริมาณของน้ำน้อยเกินไป ทำให้เมมเบรนแห้ง เกิดความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและอาจเกิดการแตกออกของเมมเบรน ทำให้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากันโดยตรง ทำให้เกิดความร้อนสูง ส่งผลให้เซลล์ถูกทำลาย

ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการน้ำในระบบให้เหมาะสมเพื่อให้มีความสามารถในการนำโปรตอนได้ดี โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การเคลื่อนที่ของน้ำที่เกิดขึ้นจากทุกกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [23]

จากภาพเห็นว่าน้ำอยู่ในเซลล์เชื้อเพลิงในหลายๆ ส่วนด้วยกัน ซึ่งปริมาณน้ำที่มีอยู่นั้นเกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด กระบวนการให้ความชื้น (Humidification) ของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่เซลล์ อีกทั้งยังเกิดจากปรากฏการณ์ที่น้ำถูกพาจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดหรือที่เรียกว่า Electro-osmotic drag ซึ่งเมื่อทำงานไปสักระยะหนึ่งทำให้ปริมาณน้ำที่ขั้วแคโทดสูงมากขึ้น ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองมีปริมาณน้ำแตกต่างกัน ทำให้เกิดการแพร่ย้อนกลับของน้ำจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด หรือที่เรียกว่า Back diffusion แต่การแพร่ของน้ำภายในเซลล์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขึ้นอยู่กับความหนาของเมมเบรน โดยเมมเบรนที่บางต้องการน้ำหรือความชื้นน้อยกว่าเมมเบรนที่หนา และความสมดุลของปริมาณความชื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง น้ำส่วนเกินภายในเซลล์เชื้อเพลิงถูกกำจัดออกจากเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยการระเหยและออกไปพร้อมกับสารตั้งต้นที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

2.7.2 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [24, 25]

อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิสูง ทำให้ค่าโพลาริเซชันทางเคมีลดลงที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับค่าคงที่ค่าหนึ่งของปฏิกิริยานั้นๆ ตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.28

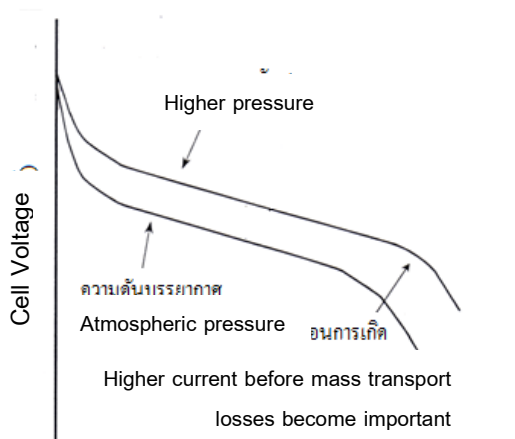
$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.28)$$

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 2.28 พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูง ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงมีพลังงานจลน์ (Kinetic energy) สูง เกิดการชนกันของโมเลกุลทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูงกว่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์ดีขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิการทำงานสูงมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำที่บริเวณเมมเบรนภายในเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ขาดความสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง และค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงควรใช้อุณหภูมิให้เหมาะสมกับความสามารถในการทำงานสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงฟUEL CELL สามารถทำได้

2.7.3 ความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ [2, 26]

จากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงฟUEL CELL ขนาดเล็กสามารถทำงานที่ความดันบรรยากาศจึงมีผลต่อประสิทธิภาพน้อย แต่ในเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 10 กิโลวัตต์ หรือใหญ่กว่าอาจต้องใช้ความดันสูงในการทำงาน เนื่องจากการใช้ความดันสูงทำให้เกิดการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินในการก่อกัมมันต์ (Activation over voltage) ที่ขั้วแคโทด ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าแรงดันวงจรเปิดสูงขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานอิสระกิบส์ นอกจากนี้ยังทำให้ค่าโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นลดลงดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 ผลกระทบของการเพิ่มความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า [24]

การเพิ่มความดันแก๊สโดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สที่เป็นสารออกซิเดนต์มีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ของเซลล์มีค่ามากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.29

$$\Delta E_{cell} = \left(\frac{RT}{2F} \right) \ln \left(\frac{P''}{P'} \right) \quad (2.29)$$

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)

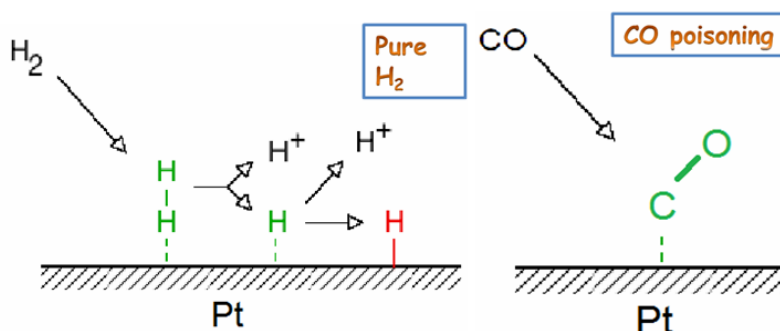
จากสมการที่ 2.10 พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มควรทำงานที่ค่าความดันสูง (มีค่าอยู่ในช่วง 300-500 กิโลปาสคาล) ทั้งแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน แต่ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิเดนต์ การใช้ความดันสูงสามารถช่วยลดปัญหาในการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้เนื่องจากเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิเดนต์ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณขั้วอิเล็กโทรดลดลงเร็วกว่าการใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดมากกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

2.7.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา [27]

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์เช่นเดียวกัน เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงนั้นไม่เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนเป็นไอออนที่อุณหภูมิปกติ จึงต้องมีตัวกระตุ้นเพื่อให้เกิดการแตกตัว เช่น การเพิ่มอุณหภูมิหรือการเติมสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดพลังงานกระตุ้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ต้องเลือกให้มีความว่องไวและเหมาะสมต่อระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมากที่สุด โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย โดยรายละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

2.8 ปัญหาความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ [28]

โดยปกติแล้วเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์จะให้ประสิทธิภาพสูงจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าโดยตรงของไฮโดรเจนและออกซิเจน แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ใช้ส่วนใหญ่มาจากกระบวนการรีฟอร์มมิ่ง ซึ่งมีการเจือปนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งจะเข้าไปทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมในเซลล์เชื้อเพลิงเสื่อมสภาพ เนื่องจากการที่คาร์บอนมอนอกไซด์มีความสามารถในการยึดเกาะกับแพลทินัมมากกว่าไฮโดรเจนถึง 15 เท่า จึงทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนลดลง ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงตามลำดับ



ภาพที่ 2.22 แสดงความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์

ปัญหาความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นสามารถแก้ไขได้หลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีก็จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันดังนี้

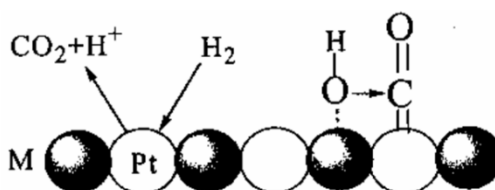
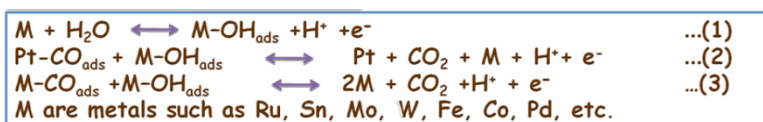
- **การเติมสารออกซิไดซ์** หลักการของวิธีนี้สามารถทำให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีขึ้นโดยการที่สารที่เติมเข้าไปจะเข้าไปออกซิไดซ์

คาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียคือสารออกซิไดซ์ที่เติมเข้าไปส่วนใหญ่จะเป็นออกซิเจนซึ่งจะมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังนั้นจึงมีส่วนที่เหลือซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับไฮโดรเจนได้และอาจส่งผลให้เมมเบรนเป็นรูและทำให้เซลล์เชื้อเพลิงนั้นล้มเหลวสำหรับการใช้งาน

- การพัฒนากระบวนการรีฟอร์มมิ่ง เพื่อให้ได้แก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียคือจะต้องใช้ต้นทุนที่สูงมาก
- การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นวิธีที่ได้รับ ความนิยมมากที่สุดในปัจจุบันเนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการทน คาร์บอนมอนอกไซด์และนอกจากนั้นยังมีการเปลี่ยนแปลงระบบการทำงานของเซลล์ เชื้อเพลิงน้อยมาก

2.9 การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ [28]

หลักการสำคัญของการเตรียมชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์คือการใช้ โลหะชนิดที่สองควบคู่กับแพลทินัมและสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำแล้วได้ไฮดรอกไซด์ที่ดูดซับอยู่ บนโลหะนั้นที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าแพลทินัม ซึ่งไฮดรอกไซด์ที่ดูดซับอยู่บนโลหะนี้จะทำหน้าที่เหมือน เป็นแหล่งของออกซิเจนที่จะเข้าไปออกซิไดซ์คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกาะอยู่บนแพลทินัมให้ กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ดังรูปที่ 4 ทำให้แพลทินัมถูกปลดปล่อยออกมาสำหรับเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันของไฮโดรเจนมากขึ้น



ภาพที่ 2.23 แสดงกลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์ [28]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shi และคณะ [29] ศึกษาการปรับปรุงขั้วแอโนดให้มีความทนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการรีดิวซ์กระดาษคาร์บอนที่ผ่านการเตรียมขั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการทำให้เอิบชุ่ม (Impregnation) ด้วยไฮโดรเจน และการฉีดอากาศเข้าไปในปริมาณเล็กน้อย พบว่าการฉีดอากาศเข้าไปในปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์สามารถช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความทนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้น และพบว่าขนาดอนุภาคของแพลทินัมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการรีดิวซ์ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดิวซ์คือที่ 600 องศาเซลเซียส และความทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแพลทินัมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังทำการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบทอง (Au) และแพลทินัม พบว่าความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาของทองจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของทอง และการเตรียมชั้นแพร่แก๊สของขั้วแอโนด โดยการทำให้เอิบชุ่มเป็นการยากต่อการทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดี และพบว่าทองนั้นสามารถช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี แต่จะต้องฉีดออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณเล็กน้อยเข้าไปที่ฝั่งแอโนด เนื่องจากทองสามารถทำปฏิกิริยา Water Gas Shift ได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

Yu และคณะ [30] พัฒนาขั้วแอโนดเชิงประกอบที่ทนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมไม่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมากนักเมื่อใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง แต่เมื่อใช้เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนประกอบพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมากกว่าจะให้สมรรถนะที่สูงกว่า และพบว่า การเตรียมชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบแพลทินัมรูทึ้นเนียมที่แยกเป็นสองชั้นจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการทนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าเนื่องจากชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบแพลทินัมรูทึ้นเนียมจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดี ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

Garcia และคณะ [31] พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบแพลเลเดียมแพลทินัมบนคาร์บอน (PdPt/C) และแพลเลเดียมแพลทินัมรูทึ้นเนียมบนคาร์บอน (PdPtRu/C) สำหรับขั้วแอโนดในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบดังกล่าวในปริมาณ 0.4 mg metal/cm² และใช้ไฮโดรเจนที่มีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 100 ppm เป็นเชื้อเพลิง โดยศักย์ไฟฟ้าลดลงน้อยกว่า 200 mV ที่ 1 A/cm² เมื่อเทียบกับการใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง

Wan และ Zhuang [32] ศึกษาการปรับปรุงขั้วแอโนดให้มีความทนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบแพลทินัมรูทีเนียม โดยชั้นนอกจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งประกอบด้วยชั้นของอนุภาคระดับนาโนของรูทีเนียมที่เตรียมโดยสเปตเตอริง (sputtering) ในปริมาณ 0.06 mg/cm^2 และชั้นของแพลทินัม-รูทีเนียม ($\text{Pt}_{50}\text{-Ru}_{50}$) ที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์จลุลายผ้า (screen-printing) ในปริมาณ 0.10 mg/cm^2 ส่วนชั้นในจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนซึ่งประกอบด้วยชั้นของแพลทินัมบริสุทธิ์ 0.07 mg/cm^2 ที่เตรียมโดยวิธีการ Direct-printing บนเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน พบว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 50 ppm และออกซิเจน 2 เปอร์เซ็นต์เป็นเชื้อเพลิง พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีเมื่อเทียบกับการใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง พบว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 50 ppm เป็นเชื้อเพลิงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับการใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ Wan และคณะ [33] ยังศึกษาการปรับปรุงขั้วแอโนดให้มีความทนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชั้น โดยเปรียบเทียบผลของสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยากับโลหะประกอบ ระหว่าง $\text{Pt}_{29}\text{-Ru}_{71}$ กับ $\text{Pt}_{50}\text{-Ru}_{50}$ พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองสามารถทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเดี่ยวแพลทินัม และพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบ $\text{Pt}_{29}\text{-Ru}_{71}$ ให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบ $\text{Pt}_{50}\text{-Ru}_{50}$

Qi และ Kaufman [34] ศึกษาผลของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ป้อนเข้ามาฝั่งแอโนดที่มีต่อขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม พบว่าคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นไม่ได้เป็นพิษต่อขั้วแอโนดเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อขั้วแคโทดด้วยถึงแม้ว่าขั้วทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันโดยเมมเบรนแต่จากการทดลองพบคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ขั้วแคโทด แสดงว่าคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถแพร่ผ่านเมมเบรนมายังขั้วแคโทดได้ และทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะลดลง ซึ่งปัญหานี้อาจแก้ได้โดยการพัฒนาในส่วนของเมมเบรน

Alcaide และคณะ [35] พบว่าการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) สามารถใช้เตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมให้มีความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ และพบว่าวิธีนี้ช่วยลดความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและให้ประสิทธิภาพการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาสูง (catalyst utilization) นอกจากนั้นยังสามารถควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี และเมื่อเพิ่ม

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการพอกพูนจะทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ต่อมา Alcaide และคณะ [8] ศึกษาการใช้แพลเลเดียมแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับข้าวแอนด์ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม โดยเปรียบเทียบระหว่างแพลทินัม พัลลาเดียม และแพลทินัมพัลลาเดียม พบว่าสามารถใช้แพลเลเดียมแทนแพลทินัมได้ในอัตราส่วนสูงถึงร้อยละ 35 ซึ่งให้สมรรถนะเท่าเดิมและเป็นการลดต้นทุน

Pereira และคณะ [36] พัฒนาข้าวแอนด์ที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบฐานทั้งสแตนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนให้มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม-ทั้งสแตนที่ผ่านการ Impregnation ในกรดฟอสโฟทังสติก (Phosphotungstic acid) จากการทดลองพบว่าทำให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีขึ้นสำหรับไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 100 ppm เป็นเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปสมรรถนะจะลดลงเนื่องจากทั้งสแตนแพร่เข้าไปในเมมเบรนทำให้เมมเบรนเสื่อมสภาพและมีความต้านทานมากขึ้น

Shi และคณะ [37] เปรียบเทียบความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์กับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีต่อข้าวแอนด์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน พบว่าที่ภาวะเดียวกันไฮโดรเจนซัลไฟด์มีอัตราความเป็นพิษมากกว่าคาร์บอนมอนอกไซด์เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นในการยึดเกาะ พบว่าความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงแทนซึ่งจะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น แต่ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีนี้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุและสารเคมี	บริษัท
ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน 20% Pt/C	Electrochem
ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนตัวรองรับคาร์บอน 20% PtRu/C	E-Tek
1, 2-ไดเมทอกซีอีเทน (1,2-Dimethoxyethane)	Fluka
1, 2-โพรเพนไดออล (1, 2-Propanediol)	Fluka
สารละลายเนฟิออน (Nafion 117, 5%wt)	Fluka
เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol)	Fluka
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, 30%)	Carlo Erba
กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, 98%)	Lab-scan
ไอโซโพรพานอล (Isopropanol)	Lab-scan
แอลกอฮอล์ล้างแผล	องค์การเภสัชกรรม
แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen 99.999%)	Praxair
แก๊สออกซิเจน (Oxygen 99.999%)	Praxair
แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen 99.99%)	Praxair
แก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 100 ppm	Labsolution
เนฟิออนเมมเบรน (Nafion 115)	Electrochem
น้ำปราศจากประจุ	-

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ตู้อบ
2. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
3. ไมโครปิเปต
4. ปิเปต
5. โถดูดความชื้น
6. อ่างให้ความร้อน (Water bath)
7. เครื่องอัดร้อน-เย็น (Compression Mould) รุ่น LP 20 ของบริษัท LABTECH
8. อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic water bath)
9. เครื่องแก้วอื่นๆในห้องปฏิบัติการ
10. เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต รุ่น DMP2831 ของบริษัท Fuji film
11. หลอดฉีดยา
12. มีดคัดเตอร์
13. ไดรเป้าผม

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท AUTOLAB
2. เครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น JSM 6400 ของบริษัท Jeol
3. เครื่อง Kruss Model K8

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน 0.025 กรัมในขวดแก้วที่มีปริมาตรประมาณ 10 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำ 1, 2 โพรเพนไดออกไซด์ปริมาตร 3.125 มิลลิลิตร
3. เติมน้ำปราศจากประจุปริมาตร 3.125 มิลลิลิตร
4. นำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

5. เติมสารละลายเนฟิออนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปริมาตร 0.283 มิลลิลิตร
6. เขย่าเล็กน้อยแล้วนำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกอีกครั้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4.2 การเตรียมตลับหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. นำตลับหมึกมาเหลาสลักออกเล็กน้อยเพื่อให้สามารถถอดหัวพิมพ์ออกมาแล้วสามารถเติมหมึกพิมพ์ได้หลายครั้ง
2. ใช้หลอดฉีดยาดูดหมึกพิมพ์ที่เตรียมเสร็จแล้วมาใส่ในตลับหมึก จากนั้นนำหัวพิมพ์มาใส่ครอบลงไป
3. ใช้หลอดฉีดยาอัดอากาศเข้าไปในตลับหมึกเพื่อดันให้ไหลผ่านหัวพิมพ์ออกมาด้านนอก

3.4.3 การเตรียมเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

1. เปิดคอมพิวเตอร์ จากนั้นก็เปิดเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท DMP-2831
2. นำตลับหมึกที่มีหมึกพิมพ์ประกบกับหัวพิมพ์แล้วมาติดตั้งลงในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแล้วปิดฝาเครื่องพิมพ์
3. เปิดโปรแกรม DMP

3.4.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงค์เจ็ทลงบนผ้าคาร์บอน

1. ตัดผ้าคาร์บอนขนาด 2.3×4.6 ตารางเซนติเมตร (เมื่อต้องการเตรียมขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร) หรือขนาด 5×10 ตารางเซนติเมตร (เมื่อต้องการเตรียมขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตร)
2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า
3. นำไปยึดติดกับกระดาษ A4 ด้วยกาวสองหน้า โดยให้อยู่ในกรอบที่ต้องการตามที่ได้ออกแบบไว้ใน Print pattern ในหัวข้อ 3.5.3
4. นำกระดาษ A4 ที่มีผ้าคาร์บอนติดอยู่ตามข้อ 3 ไปวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์
5. นำกระดาษ A4 ที่มีผ้าคาร์บอนติดอยู่ไปวางบน plate ของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท ยึดติดด้วยเทปกาวใสให้พอดีกรอบของ plate

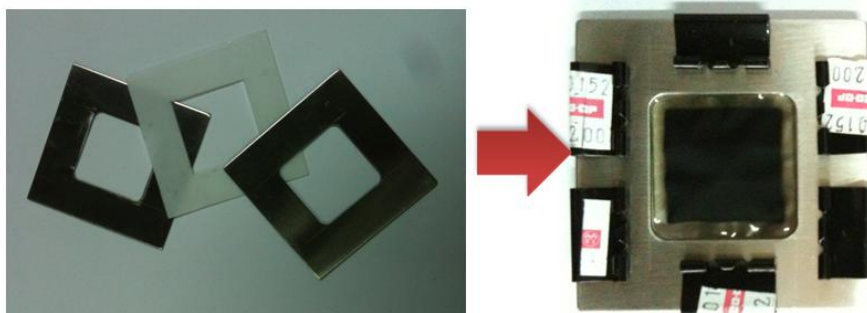
6. ทำการเตรียมเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตตั้งหัวข้อ 3.4.3 แล้วเลือกไปที่ Fiducial Camera จากนั้นเลือกจุดที่จะใช้เป็นจุดเริ่มต้นที่จะพิมพ์ลงไป
7. เลือก Print pattern ที่ต้องการ, ตั้งค่าความหนาของตัวรองรับ (กระดาษ A4 ที่มีผ้าคาร์บอนติดอยู่), อุณหภูมิของ plate, อุณหภูมิของหัวพิมพ์ จากนั้นสั่งพิมพ์
8. หลังจากนั้นเครื่องพิมพ์จะพิมพ์ลงไปโดยอัตโนมัติ เมื่อพิมพ์เสร็จในแต่ละชั้น ให้ใช้ไดร์เป่าความร้อนเป่าลงไปเพื่อให้หัวไฟฟ้าบนผ้าคาร์บอนแห้งเร็วขึ้น
9. เมื่อพิมพ์จนคิดว่าได้น้ำหนักที่ต้องการแล้วก็นำหัวไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
10. นำหัวไฟฟ้าที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ หากยังไม่ถึงตามที่ต้องการก็นำไปพิมพ์จนกว่าจะได้น้ำหนักที่ต้องการ
11. นำหัวไฟฟ้าที่ได้ไปแช่ในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อล้างเอทิลีนไกลคอลออก จากนั้นนำไปอบที่ 120 องศาเซลเซียสอีกครั้ง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
12. นำไปเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อนำไปเตรียมเป็นเมมเบรนประกอบหัวไฟฟ้าต่อไป



ภาพที่ 3.1 ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมบนผ้าคาร์บอน

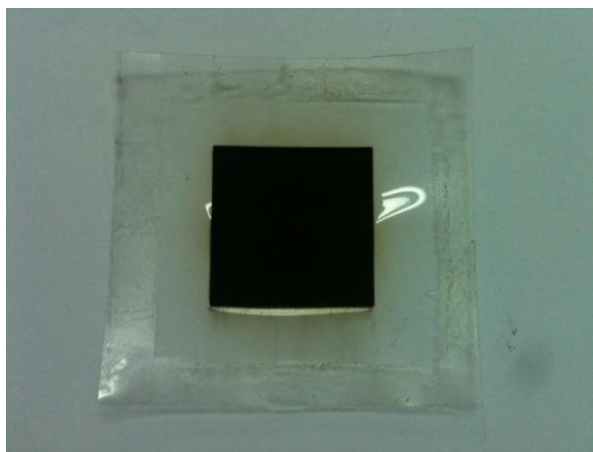
3.4.5 การเตรียมหัวไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนเนฟิออนเมมเบรน

1. นำเนฟิออนเมมเบรนที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาวางบนจานเพาะเชื้อและเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกค่า
2. นำเนฟิออนเมมเบรนไปประกอบด้วยแผ่นไมลาร์ฟิล์มแล้วหนีบด้วยแผ่นสแตนเลส 2 แผ่น ให้เมมเบรนตึงแล้วหนีบด้วยคลิปหนีบกระดาษดังรูป แล้วนำไปวางบน plate ของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตในตำแหน่งที่ต้องการพิมพ์



ภาพที่ 3.2 การพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนเมมเบรน

3. ทำการเตรียมเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตตั้งหัวข้อที่ 3 แล้วเลือกไปที่ Fiducial Camera จากนั้นเลือกจุดที่จะใช้เป็นจุดเริ่มต้นที่จะพิมพ์ลงไป
4. เลือก Print pattern ที่ต้องการ, ตั้งค่าความหนาของตัวรองรับ (ความหนาของเนฟิออนเมมเบรนโดยมีการเผื่อถึงการหดตัวของเนฟิออนเมมเบรนเมื่อผ่านการพิมพ์แล้ว), คุณสมบัติของ plate, คุณสมบัติของหัวพิมพ์ จากนั้นสั่งพิมพ์
5. หลังจากนั้นเครื่องพิมพ์จะพิมพ์ลงไปโดยอัตโนมัติ เมื่อพิมพ์เสร็จในแต่ละชั้น ให้ใช้ไดร์เป่าความร้อนเป่าลงไปเพื่อให้ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาบนเนฟิออนเมมเบรนแห้งเร็วขึ้นและเป็นการลดการหักงอตัวของเนฟิออนเมมเบรน
6. เมื่อพิมพ์จนคิดว่าได้น้ำหนักที่ต้องการแล้วก็นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
7. นำขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ หากยังไม่ถึงตามที่ต้องการก็นำไปพิมพ์จนกว่าจะได้น้ำหนักที่ต้องการ
8. เมื่อได้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีน้ำหนักตามต้องการแล้วก็จะทำการทดลองพิมพ์อิงก์เจ็ตแบบเดียวกันที่อีกด้านหนึ่งของเนฟิออนเมมเบรน จากนั้นจะได้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านของเนฟิออนเมมเบรน
9. นำขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปแช่ในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อล้างเอทิลีนไกลคอลออก จากนั้นนำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียสอีกครั้ง เป็นเวลา 30 นาที
10. นำไปเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อนำไปเตรียมเป็นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าต่อไป



ภาพที่ 3.3 ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมบนเมมเบรน

3.4.6 การปรับสภาพเมมเบรน

1. เมมเบรนขนาด 5×5 ตารางเซนติเมตร (เมื่อต้องการเตรียมขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร) หรือขนาด 7×7 ตารางเซนติเมตร (เมื่อต้องการเตรียมขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตร)
2. นำเมมเบรนไปแช่ในน้ำปราศจากประจุที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำเมมเบรนไปแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์
4. นำเมมเบรนไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดไอออนของโลหะ
5. นำเมมเบรนไปแช่ในน้ำปราศจากประจุที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อล้างคลอไรด์ไอออน
6. นำเมมเบรนแช่เก็บไว้ในน้ำปราศจากประจุ เพื่อรอการใช้งานต่อไป

3.4.7 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (Membrane Electrode Assembly) ที่ผ่านการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนผ้าคาร์บอน

1. นำไมลาร์ฟิล์มที่ทนความร้อนและมีความหนาประมาณ 0.125 มิลลิเมตร มาตัดเจาะช่องตรงกลางให้เป็นรูสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 2.3×2.3 ตารางเซนติเมตร (สำหรับขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร) และขนาด 5×5 ตารางเซนติเมตร (สำหรับขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตร)
2. นำไมลาร์ฟิล์มไปติดไว้บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับคั่วร้อน โดยยึดติดด้วยกาวสองหน้าที่มีมทั้งสี่ของแผ่นไมลาร์ฟิล์ม
3. ตัดขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้าคาร์บอนออกเป็น 2 ชั้นขนาดเท่ากันคือ 2.3×2.3 ตารางเซนติเมตร (สำหรับขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร) และขนาด 5×5 ตารางเซนติเมตร (สำหรับขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตร)
4. จากนั้นใช้ฟู่กันทาสารละลายเนฟิออนความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงบนขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาให้ชุ่ม [2]
5. นำเนฟิออนเมมเบรนที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาประกบกับขั้วไฟฟ้าทั้งสองในลักษณะแซนวิช โดยให้ขั้วไฟฟ้าอยู่ตรงกลางของเนฟิออนเมมเบรนและวางอยู่ในช่องของไมลาร์ฟิล์มพอดี
6. นำเหล็กกล้าไร้สนิมอีกแผ่นมาประกบกับแผ่นเดิมโดยให้ขั้วไฟฟ้าอยู่ด้านใน จากนั้นนำไปกดอัดด้วยความร้อน ด้วยเครื่องอัดร้อน-เย็น (Compression Mould) ที่ความดัน 65 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 วินาที
7. นำเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอการทดสอบอื่นๆต่อไป

3.4.8 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (Membrane Electrode Assembly) ที่ผ่านการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนเนฟิออนเมมเบรน

1. นำไมลาร์ฟิล์มที่ทนความร้อนและมีความหนาประมาณ 0.125 มิลลิเมตร มาตัดเจาะช่องตรงกลางให้เป็นรูสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 2.3×2.3 ตารางเซนติเมตร (สำหรับขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตรและขนาด 5×5 ตารางเซนติเมตร (สำหรับขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตร)

2. นำไมลาร์ฟิล์มไปติดไว้บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับกดร้อน โดยยึดติดด้วยกาวสองหน้าที่มีมทั้งสี่ของแผ่นไมลาร์ฟิล์ม
3. ตัดผ้าคาร์บอนเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีขนาด 2.3×2.3 ตารางเซนติเมตร (สำหรับขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตรและขนาด 5×5 ตารางเซนติเมตร (สำหรับขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตร
4. จากนั้นใช้ฟู่กันทาสารละลายเนฟิออนความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงบนขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาให้ชุ่ม
5. นำผ้าคาร์บอนที่ตัดไว้ไปประกบกับขั้วไฟฟ้าที่อยู่บนเนฟิออนเมมเบรน โดยให้ผ้าคาร์บอนวางพอดีกับขั้วไฟฟ้าบนเนฟิออนเมมเบรน และวางอยู่ในช่องของไมลาร์ฟิล์มพอดี
6. นำเหล็กกล้าไร้สนิมอีกแผ่นมาประกบกับแผ่นเดิมโดยให้ขั้วไฟฟ้าอยู่ด้านใน จากนั้นนำไปกดอัดด้วยความร้อน ด้วยเครื่องอัดร้อน-เย็น (Compression Mould) ที่ความดัน 65 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 วินาที
7. นำเมมเบรนประกบขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอการทดสอบอื่นๆต่อไป

3.4.9 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

3.4.9.1 การประกอบเป็นเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิง

1. นำเมมเบรนประกบขั้วไฟฟ้ามาวางบนแผ่นยางซิลิโคนเพื่อป้องกันการรั่วของแก๊สและประกบกับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้งสองด้าน
2. จากนั้นยึดแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าตามด้วยแผ่นปิดท้าย (End plate) เข้ากับเมมเบรนประกบขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านเข้าด้วยกันโดยใช้น็อต จากนั้นใช้ประแจปอนด์อัดทุกส่วนเข้าด้วยกันด้วยโมเมนต์การหมุน 40 ปอนด์แรง-นิ้ว
3. นำเซลล์เดี่ยวที่ได้ไปติดตั้งในสถานีทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงและทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

3.4.9.2 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

ขั้นตอนก่อนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้าของแก๊สทุกชนิดให้มีทิศทางการไหลของแก๊สเป็นไปตามที่ต้องการและไม่มีการไหลปนกัน
2. ตรวจสอบความสภาพและความเรียบร้อยของข้อต่อต่างๆ รวมถึงระดับน้ำภายในระบบให้มีความขึ้น ในสถานะทดสอบสมรรถนะให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทำการทดลอง
3. ตรวจสอบเครื่องควบคุมความดันหัวถังแก๊สทุกถังให้อยู่ในตำแหน่งปิด
4. ตรวจสอบวาล์วควบคุมความดันกลับให้อยู่ในตำแหน่งปิด
5. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองขั้วที่ต่อไปยังเครื่อง Electronic load ให้อยู่ในสภาพที่เรียบร้อย
6. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
7. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สและ Electronic load
8. เปิดสวิตช์หลักที่แผงควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า แล้วจึงสวิตช์เครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 60 องศาเซลเซียส และเปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวภายในหน่วยทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นรอจนกว่าอุณหภูมิจะถึงค่าที่ตั้งไว้
9. ตั้งค่าอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนเป็น 100 sccm
10. ทดลองเปิดวาล์วโดยการใส่แก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงก่อนเพื่อเป็นการไล่สิ่งตกค้างในเซลล์เชื้อเพลิงและทดสอบการรั่วของแก๊ส
11. ปิดแก๊สไนโตรเจนและปรับทิศทางการไหลของแก๊สเปลี่ยนไปเปิดวาล์วขาเข้าเป็นแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนแทน
12. เปิดแก๊สหัวถังของไฮโดรเจนและออกซิเจนเข้าสู่ระบบ
13. ทำการ Run in ให้เซลล์เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาโดยการตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0.2 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปรับเป็น 0.3 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
14. ทดสอบ Polarization Curve โดยการหมุนปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0.1 จนถึง 0.9 โวลต์ เพื่อบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ ทำการทดสอบซ้ำอีก 3-4 ครั้ง

3.4.10 การทดสอบอิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า (Impedance spectroscopy)

1. เปิดเครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่ออุ่นเครื่องก่อนการทดสอบเป็นเวลา 30 นาที กดปุ่ม cell enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. เปิด เครื่อง คอมพิวเตอร์ สำหรับ บันทึก ข้อมูล จาก เครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยใช้โปรแกรม Frequency response analyzer หรือ FRA
3. ควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและหน่วยให้ความร้อนทั้งด้านแอโนดและแคโทด ให้อุณหภูมิ 60, 65 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
4. ป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าทางด้านแอโนดและแคโทด ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่ภาวะมาตรฐาน
5. ตั้งค่าการทดสอบ โดยจะทำการทดสอบที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.7 โวลต์ และค่าความถี่ในช่วง 50 มิลลิเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ์
6. เริ่มการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า โดยกด cell enable ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat และกด start ที่โปรแกรมเพื่อเริ่มทำการทดสอบ
7. เมื่อวิเคราะห์เสร็จแล้วจึงทำการบันทึกค่า
8. ทำการวิเคราะห์ซ้ำประมาณ 3 รอบ
9. ทำการคำนวณผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความต้านทานต่างๆ ของระบบ
10. ทำการปิดระบบการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบสมรรถนะจากกราฟโพลาร์ไรเซชัน

3.4.11 การวิเคราะห์แบบไซคลิกโวลแทมเมทรีในเซลล์เชื้อเพลิง

1. ปิดอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและหน่วยให้ความร้อนทั้งสองข้าง
2. ปิดเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส และปิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน และเปิดวาล์วขาออกเพื่อไล่แก๊สที่ยังตกค้างอยู่ในระบบ
3. เปิดวาล์วขาออกและปรับทิศทางการไหลของแก๊สโดยให้แก๊สไฮโดรเจนเข้าทางขั้วแคโทดและแก๊สไนโตรเจนเข้าทางขั้วแอโนด
4. เปิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สไนโตรเจนโดยให้มีความดันหัวถังอยู่ที่ 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
5. เปิดเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สโดยให้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สไนโตรเจนมีอัตราการไหลอยู่ที่ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีที่ภาวะมาตรฐาน

6. เปิดโปรแกรม GPES และตั้งค่าสำหรับการทำไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยจะทำการวิเคราะห์ในช่วงค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 0.01 โวลต์ไปจนถึง 0.8 โวลต์ และทำการวิเคราะห์ 5 รอบต่อ 1 ครั้ง
7. เริ่มทำการทดสอบ และบันทึกผลการทดลองที่ได้
8. ทำการคำนวณเพื่อหาปริมาณพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

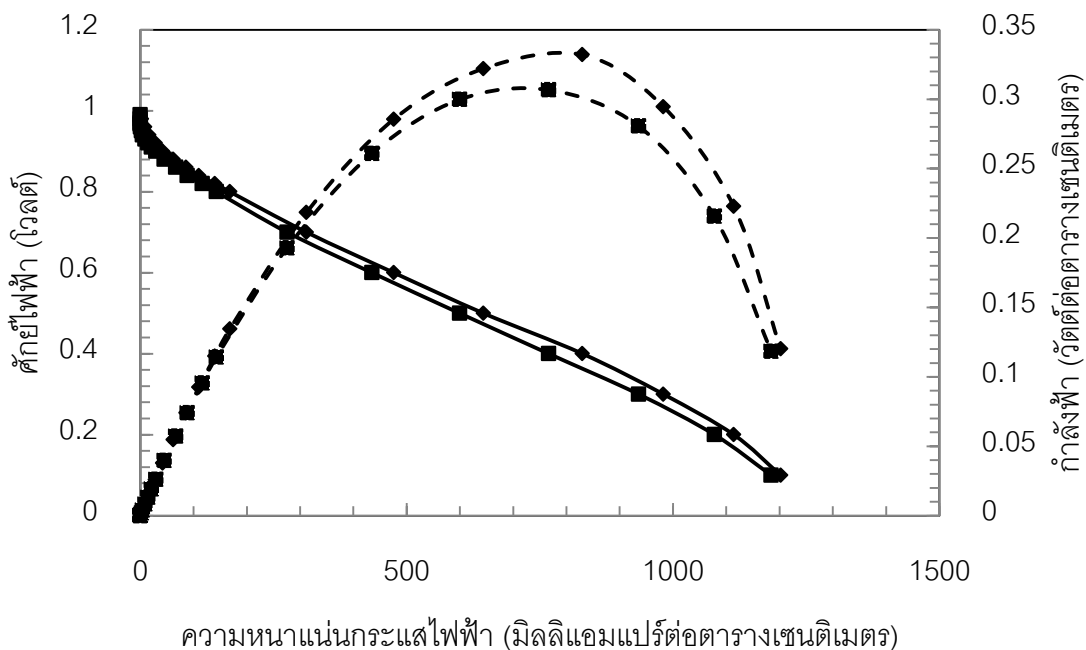
งานวิจัยนี้ทำการศึกษากการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มโดยเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 5 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ดบนขั้วอิเล็กโทรดกับการพิมพ์อิงก์เจ็ดลงบนเมมเบรนโดยตรง จากนั้นทำการเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบแบบต่างๆและทดสอบความทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-100 ppm นอกจากนั้นยังมีการขยายส่วนและทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากขนาด 5 ตารางเซนติเมตรเป็น 25 ตารางเซนติเมตร

4.1 ผลของการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนเมมเบรนและขั้วอิเล็กโทรด

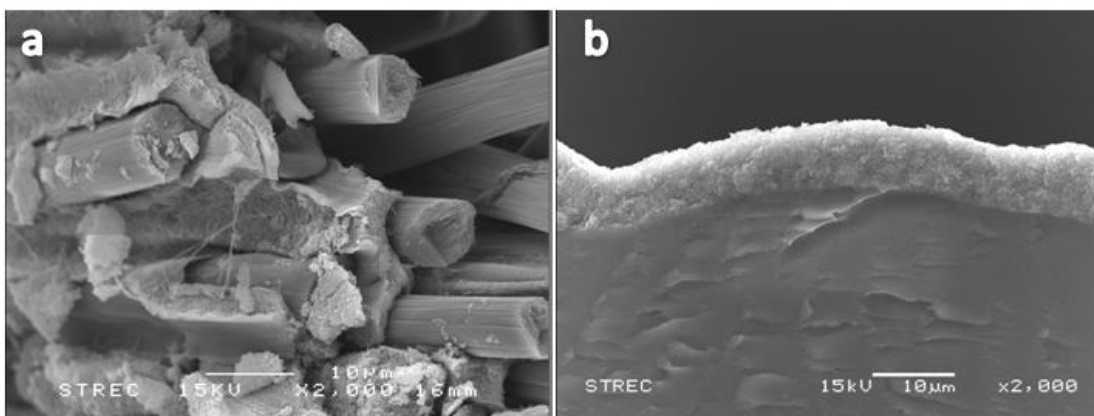
ในงานวิจัยนี้มีวิธีในการเตรียมชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเอ็มอีเอที่แตกต่างกัน 2 แบบคือ แบบแรกคือการพิมพ์อิงก์เจ็ดตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรด และแบบที่สองคือการพิมพ์อิงก์เจ็ดตัวเร่งปฏิกิริยาของเมมเบรน โดยทั้งสองแบบทำการเตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนทางการค้า โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และหลังจากนั้นนำไปกดอัดด้วยความร้อนที่ความดัน 65 กิโลพาสคัล 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปทดสอบสมรรถนะ โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์สำหรับขั้วแอโนดและแคโทด ตามลำดับ

ผลการทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีการที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.1 จากผลการทดลอง พบว่า เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ดลงบนผ้าคาร์บอนมีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดที่ 0.967 โวลต์ซึ่งต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ดลงบนเมมเบรนซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดที่ 0.982 โวลต์ นอกจากนั้นยังพบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ดลงบนเมมเบรนนั้นให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 476 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรที่ 0.6 โวลต์ซึ่งสูงกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ดลงบนผ้าคาร์บอนที่ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 434.8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายภาคตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพิมพ์อิงก์เจ็ดลงบนผ้าคาร์บอนและเมมเบรนดังภาพที่ 4.2 พบว่าชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพิมพ์

อิงก์เจ็ตลงบนเมมเบรนนั้นแบบสนิทติดกับเมมเบรนมากกว่าชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพิมพ์ลงบนผ้าคาร์บอน



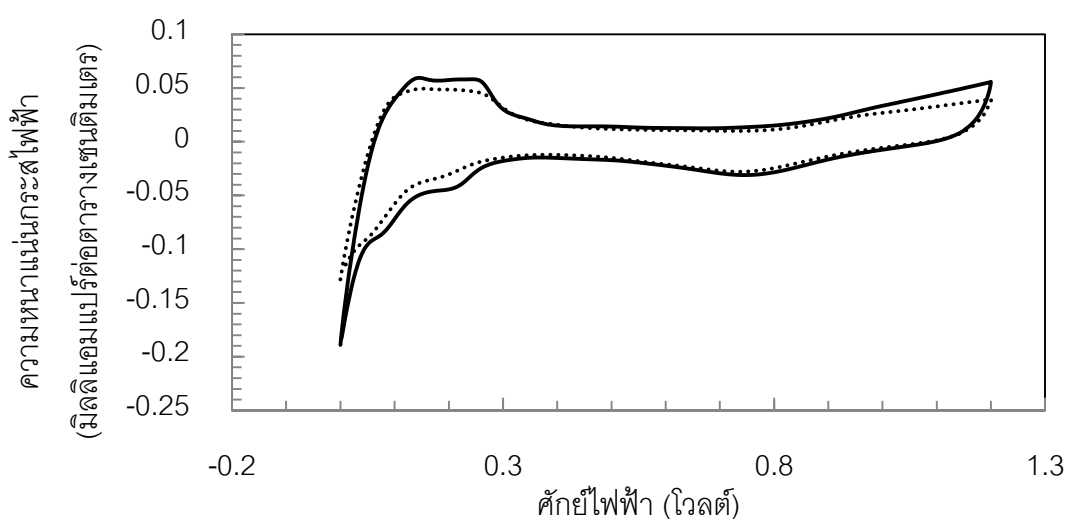
ภาพที่ 4.1 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนผ้าคาร์บอน (■) และเมมเบรนโดยตรง (◆)



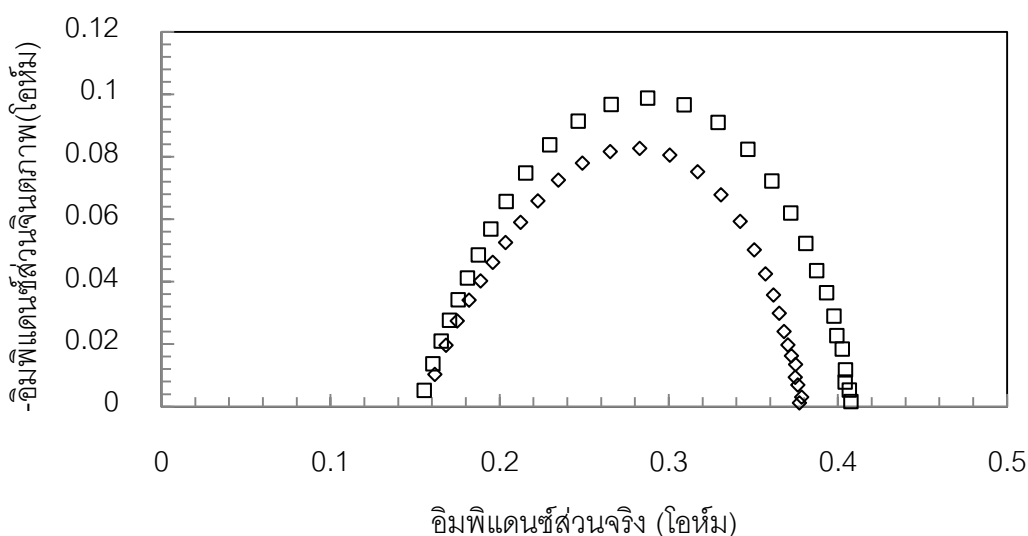
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายภาคตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบน (a) ผ้าคาร์บอนและ (b) เมมเบรน

นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาผลการหาพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนผ้าคาร์บอนและเมมเบรนด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทม

เมทรีดังภาพที่ 4.3 พบว่า เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ็อกเจ็ตลงบนผ้าคาร์บอนมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา 145.82 ตารางเมตรต่อกรัมซึ่งต่ำกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ็อกเจ็ตลงบนเมมเบรนซึ่งมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา 171.62 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับกราฟอิมพีแดนซ์หรือกราฟ Nyquist plot ของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวดังแสดงในภาพที่ 4.4 กล่าวคือเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการพิมพ็อกเจ็ตลงบนผ้าคาร์บอนและเมมเบรนมีค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุเป็น 0.2569 และ 0.2049 โอห์มตามลำดับ



ภาพที่ 4.3 ไซคลิกโวลแทมเมทรีของเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการพิมพ็อกเจ็ตลงบน (.....) ผ้าคาร์บอนและ (—) เมมเบรน

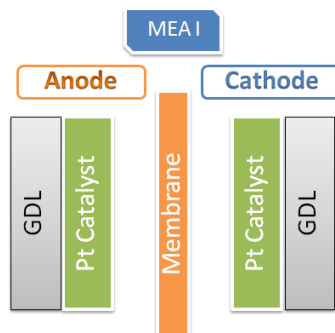


ภาพที่ 4.4 กราฟ Nyquist plot ของเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการพิมพ็อกเจ็ตลงบน (□) ผ้าคาร์บอนและ (◇) เมมเบรน ที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์

4.2 การเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีรูปแบบในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ ดังนี้

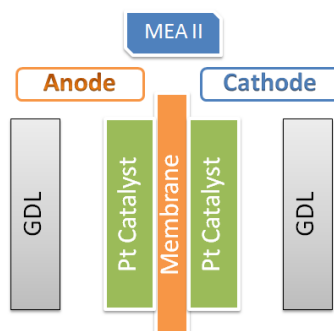
4.2.1 เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (MEA I)



ภาพที่ 4.5 โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (MEA I)

เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (MEA I) มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 4.5 เป็นการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ดตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน (Pt/C) ลงบนชั้นแพร่แก๊สที่เป็นผ้าคาร์บอน (GDL) โดยใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst loading) 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เหมือนกันทั้งทางด้านขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) หลังจากนั้นนำไปประกบกับเมมเบรนและทำการกดอัดด้วยความร้อนที่ความดัน 65 กิโลพาสคัล อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

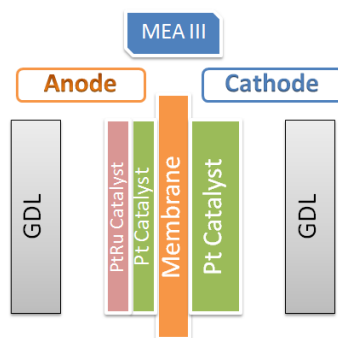
4.2.2 เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (MEA II)



ภาพที่ 4.6 โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (MEA II)

เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (MEA II) มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 4.6 เป็นการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน (Pt/C) ลงบนเมมเบรน (Membrane) โดยตรง โดยใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst loading) 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรเช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 เหมือนกันทั้งทางด้านขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) เช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (MEA I) หลังจากนั้นนำไปประกบกับชั้นแพร่แก๊สและทำการกดอัดด้วยความร้อนที่ความดัน 65 กิโลพาสคัล อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

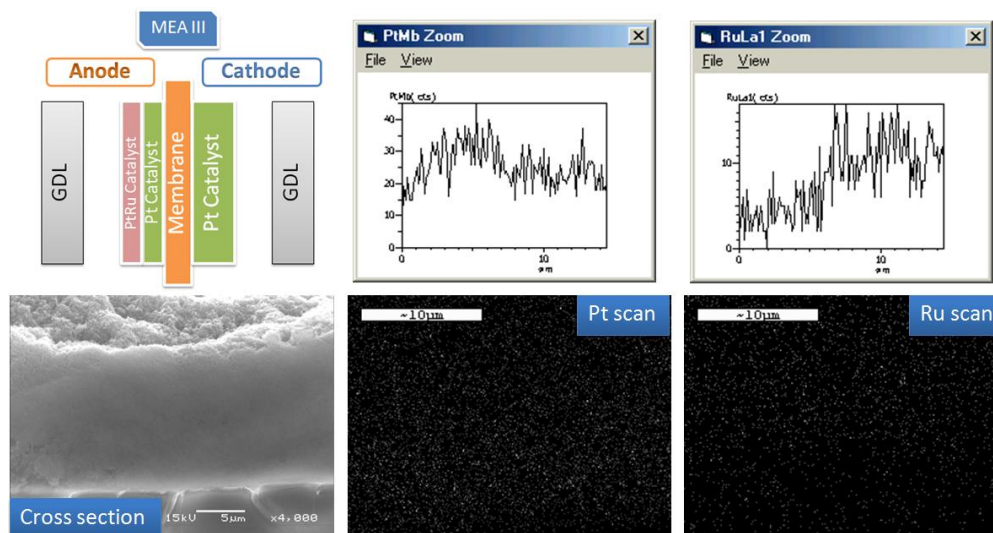
4.2.3 ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนแบบที่ 3 (MEA III)



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 (MEA III)

เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 (MEA III) มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 4.7 เป็นการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยา ลงบนเมมเบรน (Membrane) เช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (MEA II) แต่ในเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 (MEA III) ทางด้านของขั้วแอโนดประกอบไปด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชั้นที่อยู่ติดกัน คือชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน (Pt/C) ซึ่งถูกพิมพ์อิงก์เจ็ตลงไปบนเมมเบรน โดยมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst loading) 0.075 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมในอัตราส่วน 1:1 บนตัวรองรับคาร์บอน (PtRu/C) ซึ่งถูกพิมพ์อิงก์เจ็ตทับลงไปบนชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอีกครั้งหนึ่ง โดยมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียม 0.075 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนทางด้านของขั้วแคโทดเป็นการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนเมมเบรน โดยมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนั้นทั้งทางด้านขั้วแอโนดและแคโทดของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 (MEA III) ยังมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยารวมเป็น 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรเช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (MEA II) หลังจาก

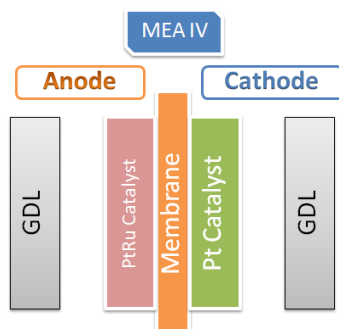
เตรียมชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ตแล้ว ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาบนเมมเบรนที่เตรียมได้จะถูกนำไปประกบกับเมมเบรนและทำการกดอัดด้วยความร้อนที่ความดัน 65 กิโลพาสคัล อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 และ 2



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงภาพ ตัดขวางและ Pt, Ru mapping

จากภาพที่ 4.8 เป็นโครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 จะเห็นได้ว่าเป็นการทดลองเพื่อให้ได้ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชั้นที่แยกออกจากกันชัดเจน คือ ชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมซึ่งอยู่ติดกับเมมเบรน และชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนุ่มที่นิยม จากโครงสร้างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงภาพ ตัดขวางและ Pt, Ru mapping พบว่าได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนั้นจะกระจายตัวโดยทั่วทั้งในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาชั้นในและชั้นนอก แต่มีความหนาแน่นในส่วนของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาชั้นในมากกว่า ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยานุ่มที่มีความหนาแน่นมากในส่วนของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาชั้นนอก แต่มีบางส่วนที่กระจายไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาชั้นใน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชั้นยังไม่แยกออกจากกันโดยสมบูรณ์

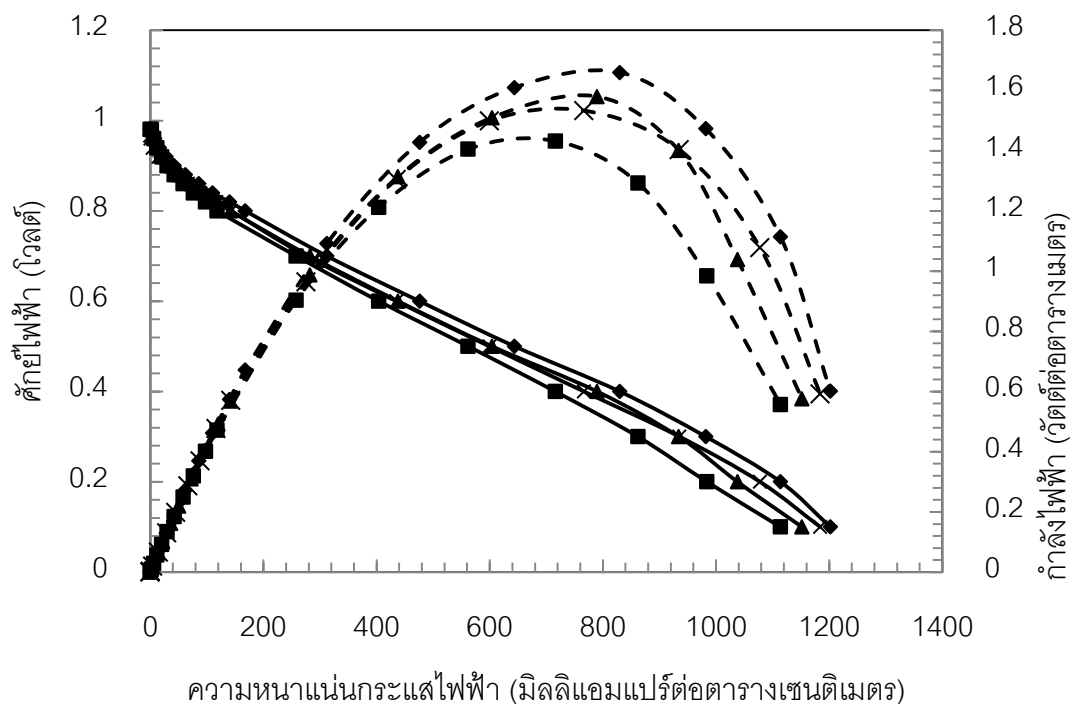
4.2.4 เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนประเภทเมมเบรนแบบที่ 4 (MEA IV)



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 (MEA IV)

ด้านแคโทดของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 (MEA IV) มีลักษณะเหมือนกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 และ 3 แต่ทางด้านขั้วแอโนดของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 ประกอบไปด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนรูทีเนียมในอัตราส่วน 1:1 บนตัวรองรับคาร์บอน (PtRu/C) ที่ถูกเตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนเมมเบรนโดยตรง โดยมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst loading) เป็น 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรเช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 และ 3 โดยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองจะถูกประกบเข้าด้วยกันและผ่านการอัดด้วยความร้อนที่ความดัน 65 กิโลพาสคัล อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

4.3 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ

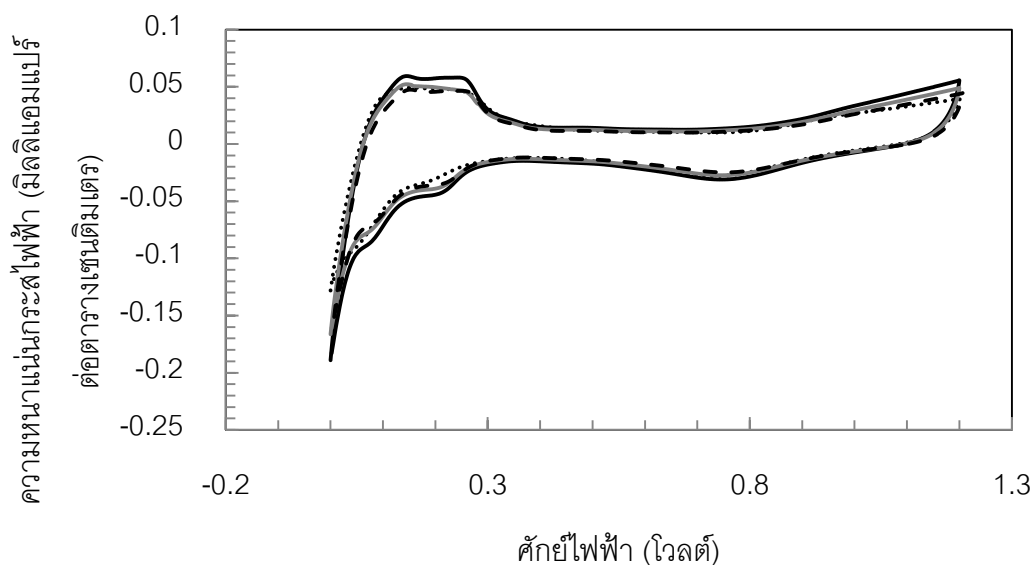


ภาพที่ 4.10 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ (x) 1, (◆) 2, (▲) 3 และ (■) 4 เมื่อทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ

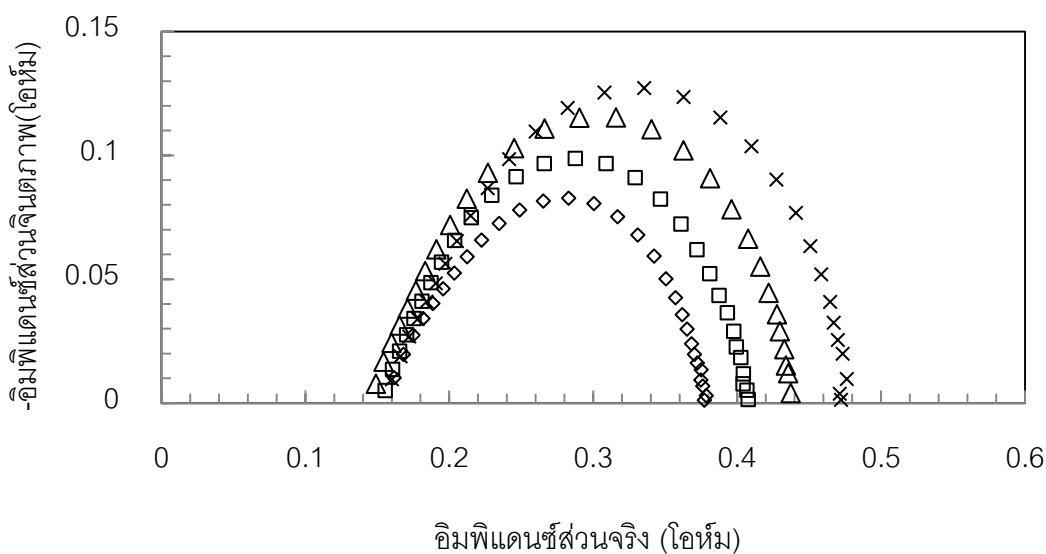
สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 แบบแสดงในภาพที่ 4.10 โดยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเป็น 0.967, 0.982, 0.981 และ 0.981 ตามลำดับและมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 434.8, 476, 438 และ 404 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการหาพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 แบบ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีดังภาพที่ 4.11 พบว่า เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1-4 มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา 145.82, 171.62, 151.03 และ 137.29 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ สอดคล้องกับกราฟอิมพีแดนซ์หรือกราฟ Nyquist plot ของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวดังแสดงในภาพที่ 4.12 กล่าวคือเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1-4 มีค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุเป็น 0.2569, 0.2049, 0.2949 และ 0.3173 โอห์มตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 ซึ่งมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีพื้นที่ในการ

เกิดปฏิกิริยาสูงที่สุดและมีค่าความต้านทานการถ่ายโอนประจุต่ำที่สุด เนื่องจากมีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนเพียงอย่างเดียวซึ่งช่วยในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันได้ดีกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 และ 4 ที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทึบเนียนอยู่ด้วย จึงทำให้ได้สมรรถนะที่สูงกว่า



ภาพที่ 4.11 ไชคคลิกโวลแทมเมทรีของเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบที่ (---) 1, (—) 2, (-·-) 3 และ (···) 4

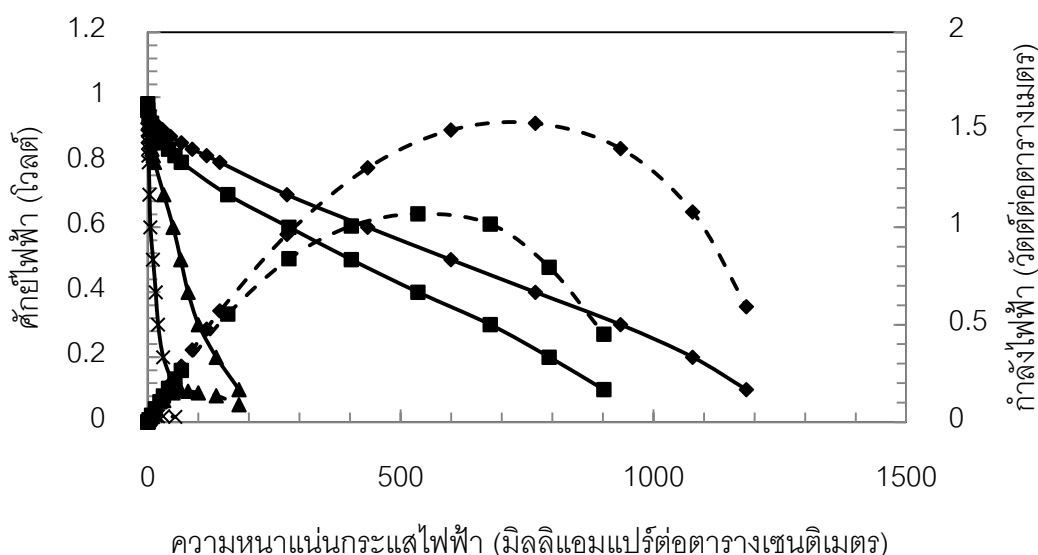


ภาพที่ 4.12 กราฟ Nyquist plot ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ (□) 1, (◇) 2, (△) 3 และ (×) 4 ที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์

4.4 ความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า

ในส่วนของการทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์นั้น งานวิจัยนี้ทำการทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 ที่ความเข้มข้นต่างๆกันคือ 20, 60 และ 100 ppm ในแก๊สไฮโดรเจน (H_2) โดยจะเริ่มทำการทดสอบโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแคโทด โดยใช้อัตราการไหล 100 sccm ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ โดยการตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0.2 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปรับเป็น 0.3 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการบันทึกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ค่าที่ได้คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0 ppm CO) หลังจากนั้นทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 20 ppm โดยใช้อัตราการไหล 100 sccm เป็นเวลา 30 นาที บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ แล้วกลับมาป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์อีกครั้งทางด้านแอโนดเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆอีกครั้ง (ค่าที่ได้คือความหนาแน่นกระแสหลังจาก recovery เป็นเวลา 30 นาที) จากนั้นทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 60 ppm โดยใช้อัตราการไหล 100 sccm เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนเดิมโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 100 ppm

4.1.1 ความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1



ภาพที่ 4.13 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (◆) 0, (■) 20, (▲) 60 และ (×) 100 ppm

โครงสร้างของขั้วแอโนดของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ประกอบด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรบนผ้าคาร์บอน ซึ่งผลการทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์แสดงดังภาพที่ 4.13 พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 434.8, 279.4, 50.2, 5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0, 20, 60 และ 100 ppm ตามลำดับ โดยเหลือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคิดเป็น 100, 64.25, 11.54 และ 1.15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0 ppm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 มีสมรรถนะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกป้อนเข้าไป เนื่องจากการที่โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทางด้านขั้วแอโนดมีเพียงชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมเพียงอย่างเดียวซึ่งถูกยึดเกาะโดยคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันของไฮโดรเจนลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์

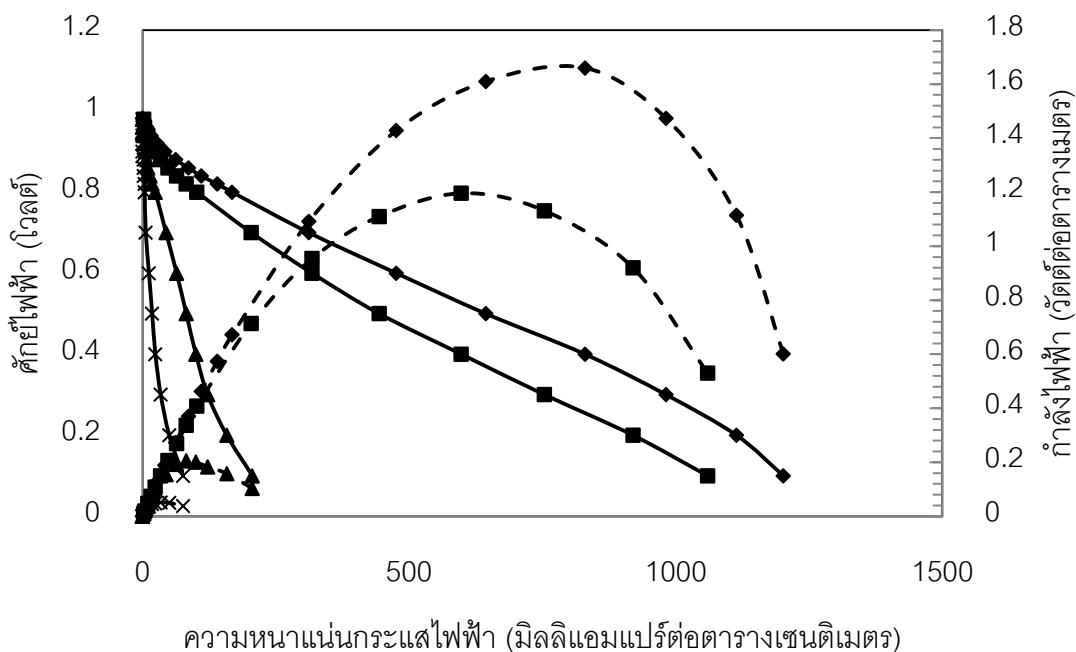
ตารางที่ 4.1 ร้อยละของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟูด้วยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาทีเมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0 ppm ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1

ความเข้มข้นของ CO ใน H ₂ ที่ถูกป้อนเป็นเวลา 30 นาที	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเมื่อป้อน CO ใน H ₂ (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากฟื้นฟูด้วย H ₂ บริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที (mA/cm ²)	ร้อยละความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟู
20 ppm	279.4	386.8	88.96
60 ppm	50.2	282	64.86
100 ppm	5	195.6	44.97

จากภาพที่ 4.13 และตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 นั้นสามารถฟื้นฟูด้วยแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์หลังจากป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ดีหลังจากป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำๆ แต่เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์สูง ความสามารถในการฟื้นฟูจะลดลงเนื่องจากมี

คาร์บอนมอนนอกไซด์ในปริมาณมากเข้าไปยึดเกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและยากต่อการออกซิไดซ์ออกไป

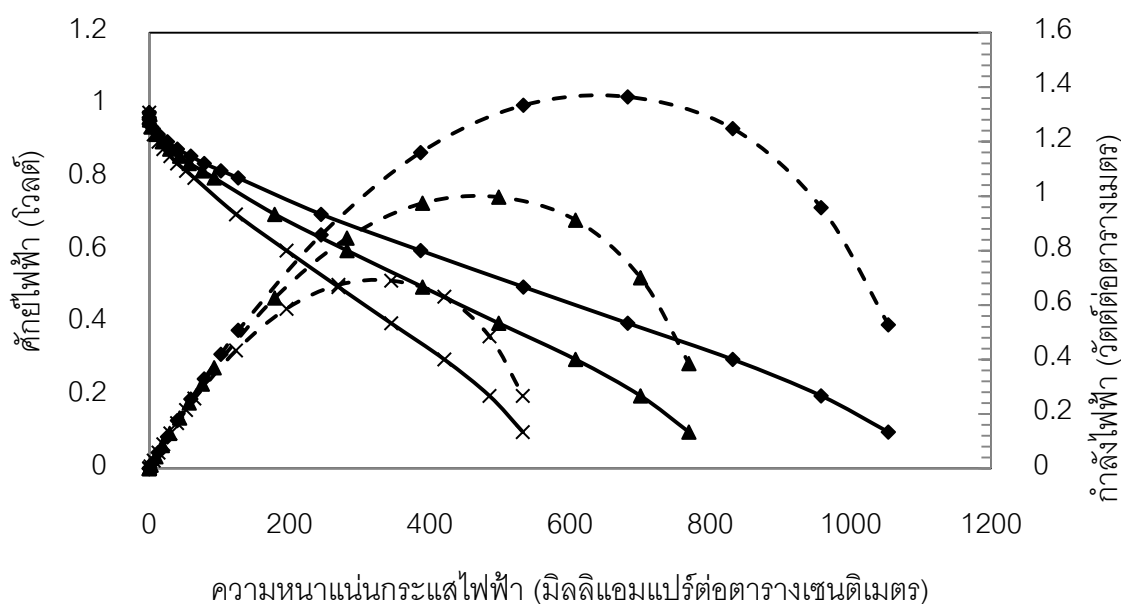
4.4.2 ความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2



ภาพที่ 4.14 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 ที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (◆) 0, (■) 20, (▲) 60 และ (×) 100 ppm

โครงสร้างของขั้วแอโนดของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 ประกอบด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรบนเมมเบรน ซึ่งผลการทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์แสดงดังภาพที่ 4.14 พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 476, 318, 64, 12 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรเมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0, 20, 60 และ 100 ppm ตามลำดับ โดยเหลือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคิดเป็น 100, 66.81, 13.44 และ 2.52 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0 ppm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีสมรรถนะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกป้อนเข้าไป เนื่องจากการที่โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทางด้านขั้วแอโนดมีเพียงชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมเพียงอย่างเดียวซึ่ง

ถูกยึดเกาะโดยคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันของไฮโดรเจนลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์



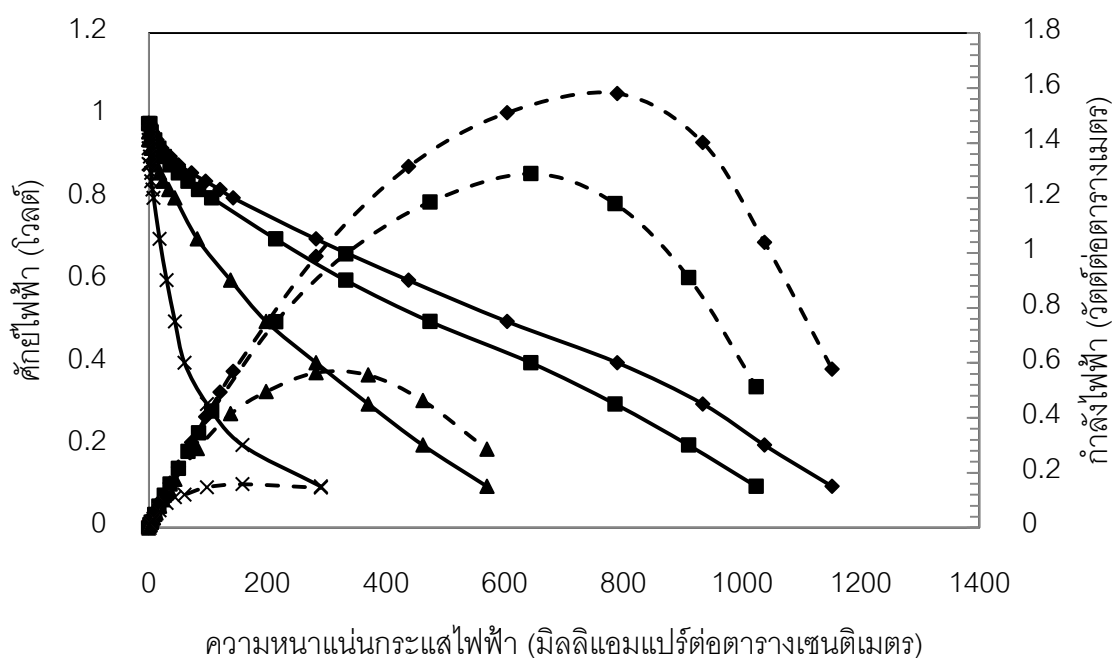
ภาพที่ 4.15 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที หลังจากป้อนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นเป็น (◆) 20, (▲) 60 และ (×) 100 ppm

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟูด้วยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที เมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0 ppm ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2

ความเข้มข้นของ CO ใน H ₂ ที่ถูกป้อนเป็นเวลา 30 นาที	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเมื่อป้อน CO ใน H ₂ (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากฟื้นฟูด้วย H ₂ บริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที (mA/cm ²)	ร้อยละความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟู
20 ppm	318	446	93.71
60 ppm	64	352	73.95
100 ppm	12	234	49.16

จากภาพที่ 4.15 และตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 นั้นสามารถฟื้นฟูด้วยแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์หลังจากป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ดีหลังจากป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำๆ แต่เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์สูง ความสามารถในการฟื้นฟูจะลดลงเนื่องจากมีคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณมากเข้าไปยึดเกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและยากต่อการออกซิไดซ์ออกไป

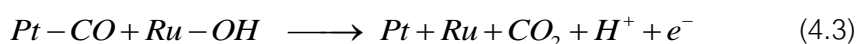
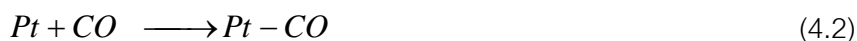
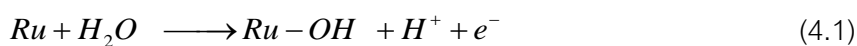
4.5.3 ความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3



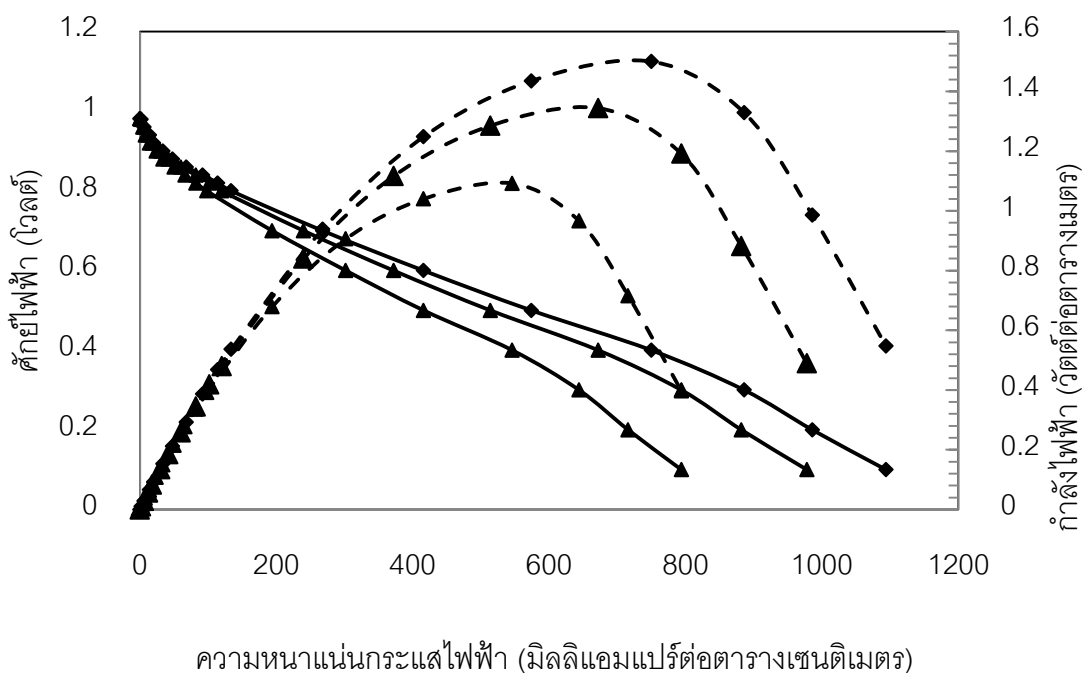
ภาพที่ 4.16 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 ที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (◆) 0, (■) 20, (▲) 60 และ (×) 100 ppm

โครงสร้างของขั้วแอโนดของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 จะประกอบด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน 0.075 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรซึ่งอยู่ติดกับเมมเบรน และชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนตัวรองรับคาร์บอน 0.075 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรอีกหนึ่งชั้น ซึ่งผลการทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.16 เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 438, 332, 138 และ 30 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรเมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นของ

คาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0, 20, 60 และ 100 ppm ตามลำดับ โดยเหลือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคิดเป็น 100, 75.80, 31.50 และ 6.85 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 มีสมรรถนะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกป้อนเข้าไปเช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 แต่เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 ที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากัน เนื่องจากการที่โครงสร้างของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 ทางด้านขั้วแอโนดมีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและชั้นของแพลทินัมรูทีเนียมซึ่งจะช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกาะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน ดังสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ซึ่งทำให้เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ดีกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 แต่จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 ยังมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่ายังทนคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ไม่มากเท่าที่ควร ซึ่งอาจเนื่องมาจากการที่เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 ยังมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยารูทีเนียมไม่มากพอที่จะช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกไป



นอกจากนี้จากภาพที่ 4.16 สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้ามีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้น 60 และ 100 ppm มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีแนวโน้มแตกต่างกันในช่วงที่ศักย์ไฟฟ้าสูงและต่ำ เนื่องจากการที่คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกาะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมสามารถออกซิไดส์ได้ดีที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ



ภาพที่ 4.17 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที หลังจากป้อนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไฮโดรเจนที่ความเข้มข้น (◆) 20, (■) 60 และ (▲) 100 ppm

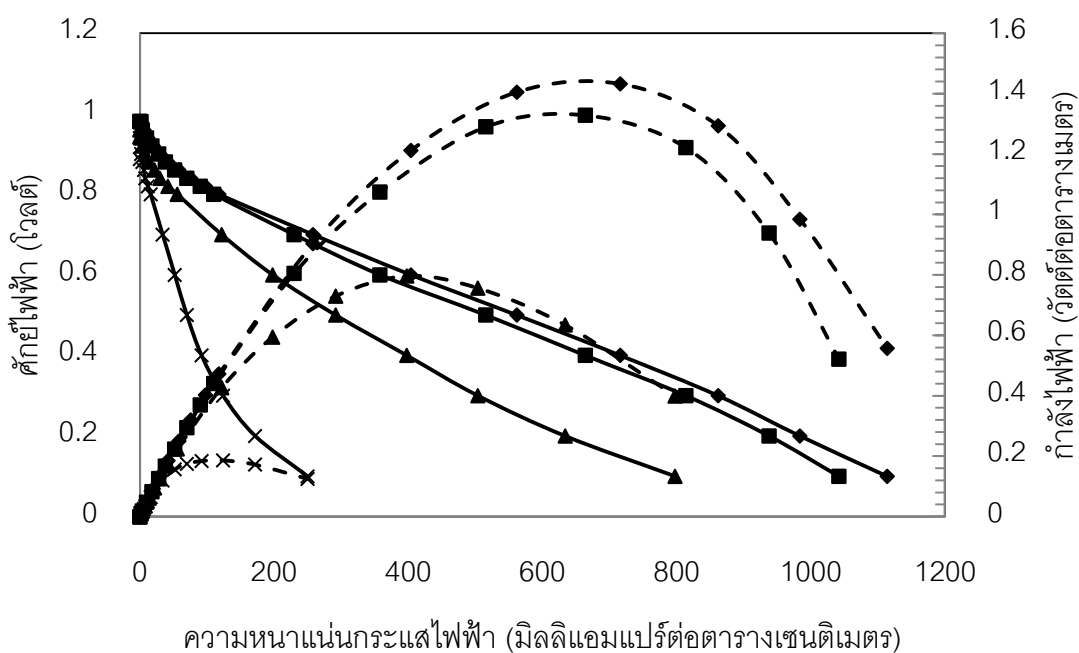
ตารางที่ 4.3 ร้อยละของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟูด้วยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที เมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0 ppm ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3

ความเข้มข้นของ CO ใน H_2 ที่ถูกป้อนเป็นเวลา 30 นาที	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเมื่อป้อน CO ใน H_2 (mA/cm^2)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากฟื้นฟูด้วย H_2 บริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที (mA/cm^2)	ร้อยละความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟู
20 ppm	332	416	94.98
60 ppm	138	372	84.93
100 ppm	30	302	68.95

จากภาพที่ 17 และตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 นั้นสามารถฟื้นฟูด้วยแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์หลังจากป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ที่

ความเข้มข้นต่างๆ ได้ดีหลังจากป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำๆ แต่เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์สูง ความสามารถในการฟื้นฟูจะลดลงเนื่องจากมีคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณมากเข้าไปยึดเกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและยากต่อการออกซิไดซ์ออกไปเช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 แต่จะเห็นได้ว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 สามารถฟื้นฟูให้ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 เนื่องจากการที่เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทึบเนียนซึ่งช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกไปดังสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 เช่นกัน

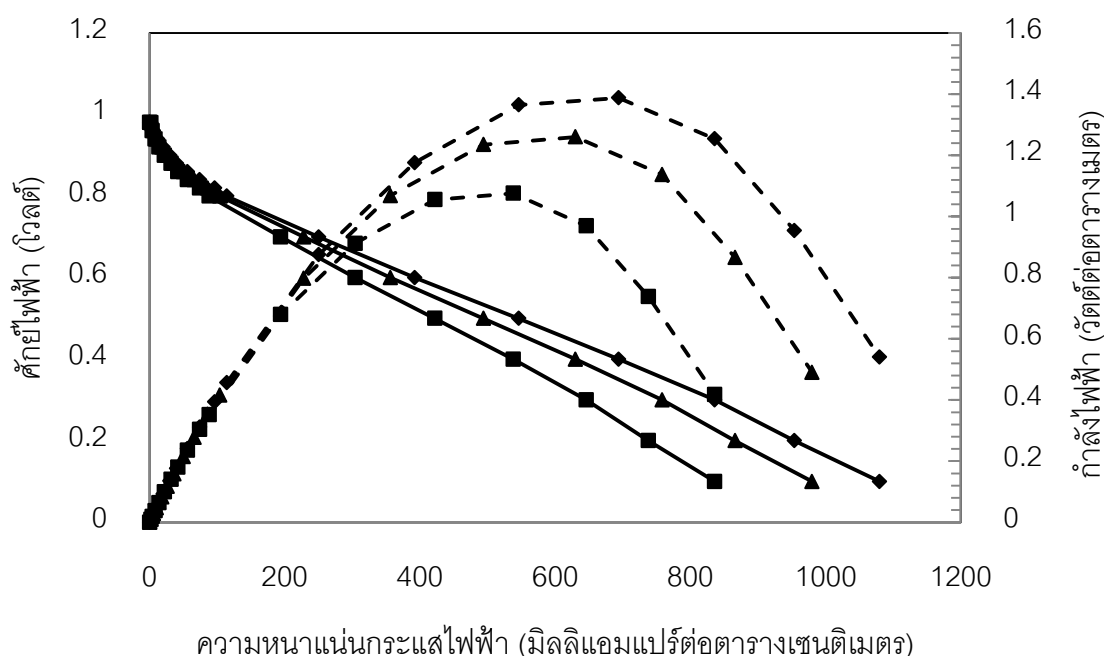
4.4.4 ความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4



ภาพที่ 4.18 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 ที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (◆) 0, (■) 20, (▲) 60 และ (×) 100 ppm

โครงสร้างของขั้วแอโนดของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 จะประกอบด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทึบเนียนบนตัวรองรับคาร์บอน 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรบนเมมเบรน ซึ่งผลการทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์แสดงภาพที่ 4.18 เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 404, 358, 198 และ 52 มิลลิ

แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0, 20, 60 และ 100 ppm ตามลำดับ โดยเหลือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคิดเป็น 100, 88.61, 49.01 และ 12.87 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 ลดลงเมื่อผ่านการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้นเช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 และ 3 แต่จะลดลงในอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากการที่เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 ประกอบด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมซึ่งช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากแพลทินัมได้ดีกว่าเนื่องจากมีปริมาณรูทีเนียมมากกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 และ 3



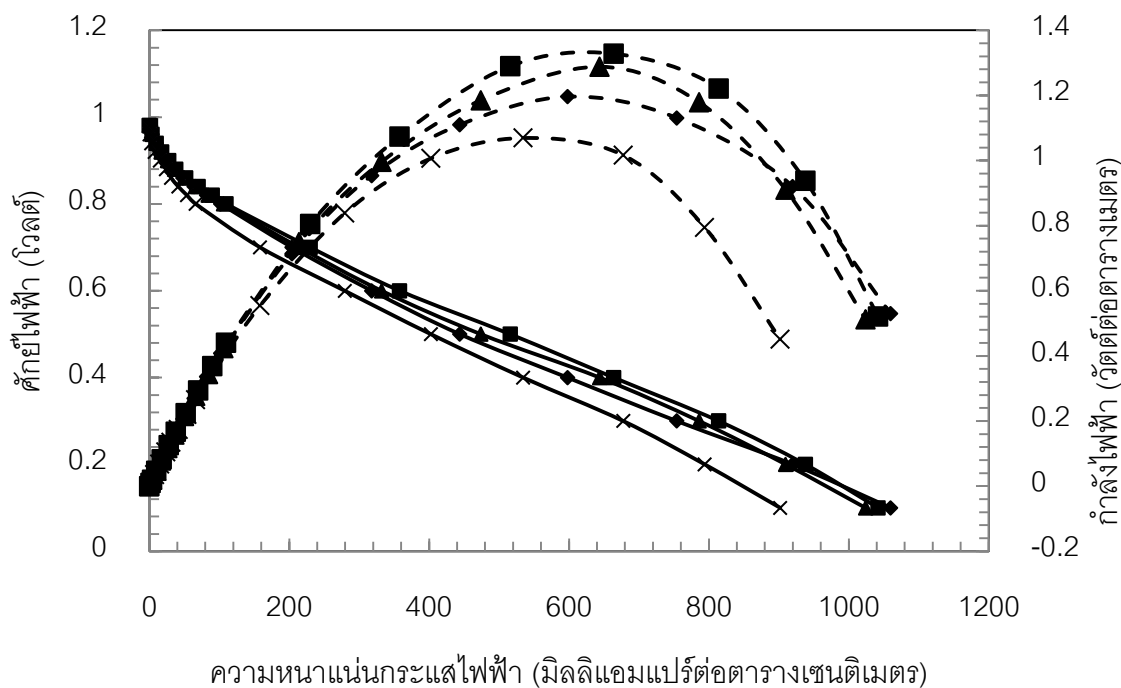
ภาพที่ 4.19 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที หลังจากที่ถูกป้อนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้น (◆) 20, (▲) 60 และ (■) 100 ppm

ตารางที่ 4.4 ร้อยละของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟูด้วยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาทีเมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 0 ppm ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4

ความเข้มข้นของ CO ใน H ₂ ที่ถูกป้อนเป็นเวลา 30 นาที	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเมื่อป้อน CO ใน H ₂ (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากฟื้นฟูด้วย H ₂ บริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที (mA/cm ²)	ร้อยละความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลังจากการฟื้นฟู
20 ppm	358	392	97.03
60 ppm	198	356	88.12
100 ppm	52	304	75.25

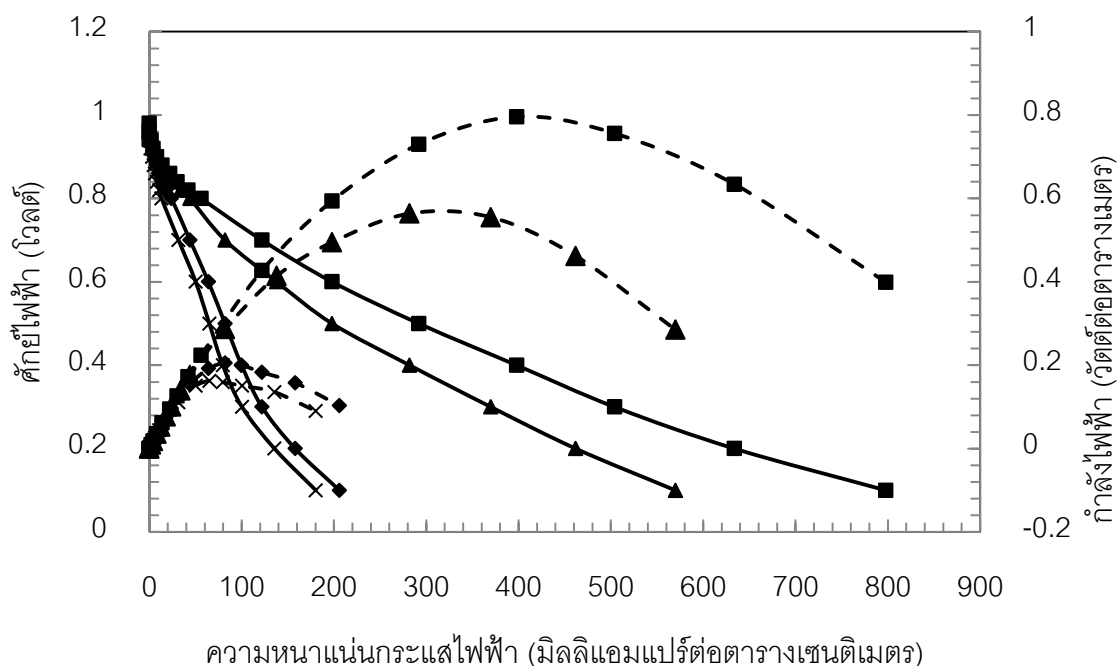
จากภาพที่ 4.19 และตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 นั้นสามารถฟื้นฟูด้วยแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์หลังจากป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ดีหลังจากป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำๆ แต่เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์สูง ความสามารถในการฟื้นฟูจะลดลงเนื่องจากมีคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณมากเข้าไปยึดเกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและยากต่อการออกซิไดซ์ออกไปเช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 และ 3 แต่จะเห็นได้ว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 สามารถฟื้นฟูให้ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 และ 3 เนื่องจากการที่เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทึ้นเยยมถึง 0.15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรซึ่งมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยารูทึ้นเยยมมากกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 ถึง 2 เท่า จึงช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกไปได้ดีกว่า

4.4.4 ความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ความเข้มข้น 20, 60 และ 100 ppm

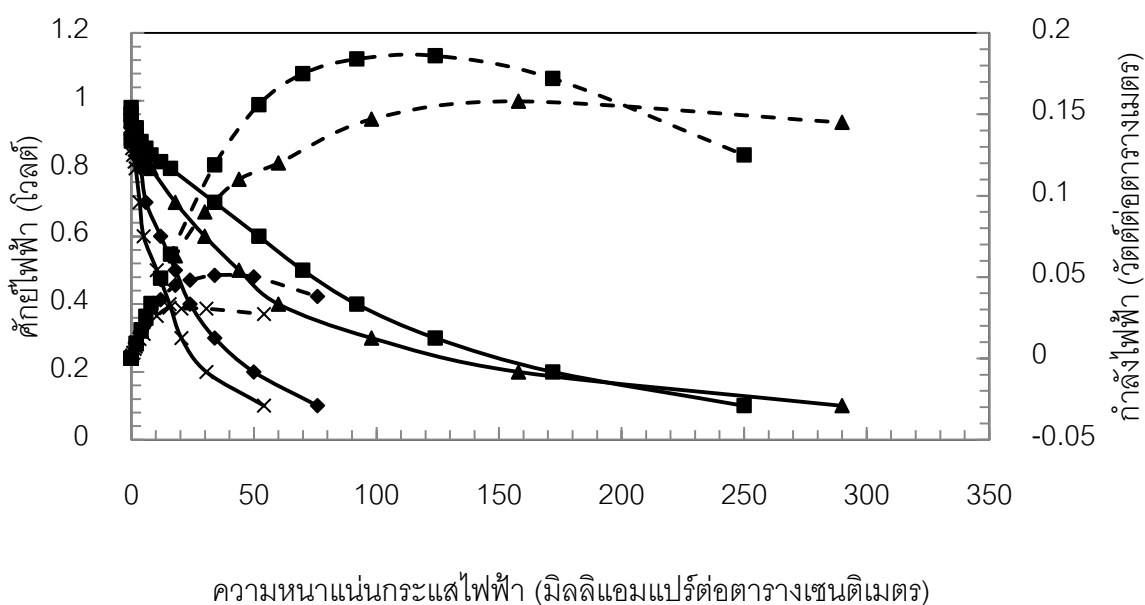


ภาพที่ 4.20 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ (x) 1, (♦) 2, (▲) 3, และ (■) 4 เมื่อทำการทดสอบโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 20 ppm ทางด้านขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแคโทด

จากภาพที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 20 ppm ทางด้านขั้วแอโนดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 แบบนั้นให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกัน โดยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 ให้สมรรถนะสูงที่สุด โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 358 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามมาด้วยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 และ 2 ที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 332 และ 318 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนุ่มที่นิยมซึ่งจะช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกไปได้ดีกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 และ 3 ส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 ถึงแม้จะมีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนุ่มที่นิยมเช่นเดียวกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 แต่ก็มีปริมาณนุ่มที่เนี่ยมน้อยกว่าถึง 2 เท่าจึงทำให้มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4



ภาพที่ 4.21 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ (x) 1, (◆) 2, (▲) 3, และ (■) 4 เมื่อทำการทดสอบโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 60 ppm ทางด้านขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแคโทด



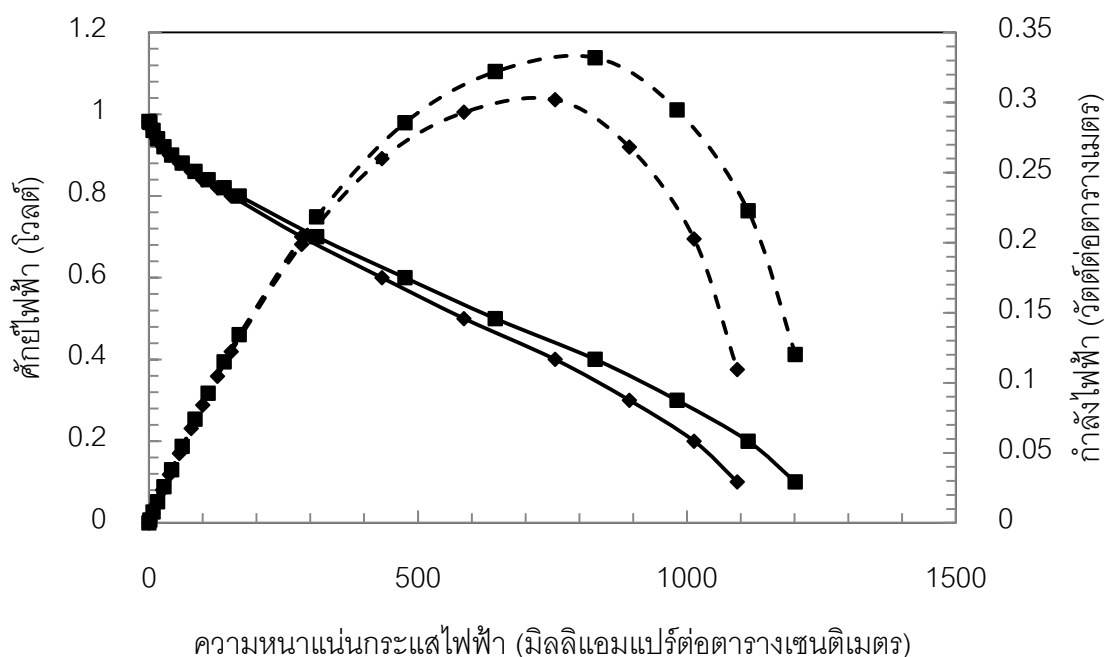
ภาพที่ 4.22 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (---) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ (x) 1, (◆) 2, (▲) 3, และ (■) 4 เมื่อทำการทดสอบโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ 100 ppm ทางด้านขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ทางด้านขั้วแคโทด

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนที่ป้อนเข้าทางด้านหัวแอโนด เป็น 100 ppm ได้ผลการทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ดังแสดงในภาพที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 และ 2 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ลดลงอย่าง ยิ่งยวดเนื่องจากชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนเพียงอย่างเดียวบนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 และ 2 ถูกเกาะไปด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้พื้นที่ในการ เกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชันลดลง ส่งผลให้ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงอย่างมาก ส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 3 ที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา แพลทินัมรูทึ้นิยมซึ่งช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ออกไป จึงทำให้มีสมรรถนะที่ดีกว่า เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 แต่ยังมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยารูทึ้นิยมไม่เพียงพอที่จะทน คาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงได้

ส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม รูทึ้นิยมบนตัวรองรับคาร์บอนบนเมมเบรนนั้น มีสมรรถนะสูงที่สุดเมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่มี คาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากการมีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทึ้นิยมบนตัวรองรับคาร์บอน จะช่วยในการออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกาะอยู่ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม จึงทำให้ เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเมมเบรนป ระกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 และ 3

4.5 การขยายส่วนเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา

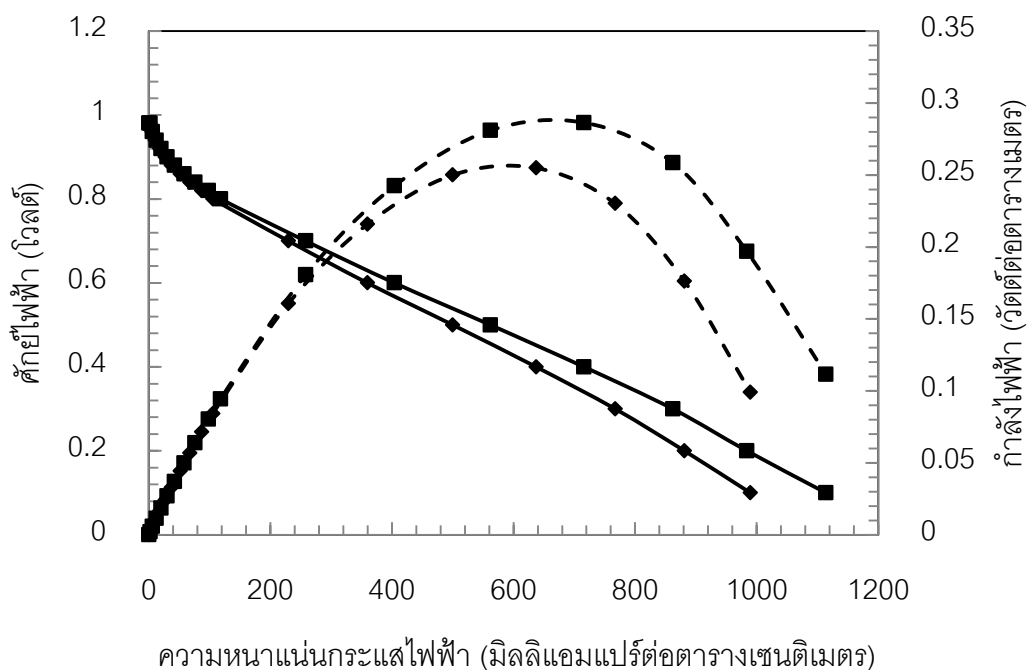
งานวิจัยนี้มีการขยายส่วนเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 5 ตารางเซนติเมตรเป็น 25 ตารางเซนติเมตรโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ต โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือการเตรียมเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด 25 ตารางเซนติเมตรโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนลงบนเมมเบรน และการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนลงบนเมมเบรนเช่นกัน



ภาพที่ 4.23 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (— —) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนขนาด (■) 5 และ (◆) 25 ตารางเซนติเมตร

ผลการทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนขนาด 5 และ 25 ตารางเซนติเมตรแสดงในภาพที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกัน โดยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าขนาด 5 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 476 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 433.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าขนาด 5 ตารางเซนติเมตรประมาณ 42.8 มิลลิแอมแปร์ต่อ

ตารางเซนติเมตร หรือประมาณร้อยละ 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการขยายส่วนเมมเบรนประกอบ ขั้วไฟฟ้าโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ทมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่ยอมรับได้



ภาพที่ 4.24 สมรรถนะ (—) และกำลังไฟฟ้า (— —) ของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ทตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบน ตัวรองรับคาร์บอนขนาด (■) 5 และ (◆) 25 ตารางเซนติเมตร

ผลการทดสอบสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าขนาด 5 และ 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ทตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมบนเมมเบรนนั้นไม่แตกต่างจากการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมากนัก กล่าวคือมีเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าขนาด 5 และ 25 ตารางเซนติเมตรมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกัน โดยเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าขนาด 5 มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 404 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เป็น 359.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าขนาด 5 ตารางเซนติเมตรประมาณ 44.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หรือประมาณร้อยละ 11

การขยายส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าจาก 5 ตารางเซนติเมตรเป็น 25 ตารางเซนติเมตรโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตถือว่าทำได้ดีในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามการพิมพ์อิงก์เจ็ตยังถือเป็นวิธีการที่ต้องใช้เวลาในการเตรียมเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนข้างมากซึ่งยังมีความจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตเพื่อลดระยะเวลาในการเตรียมโดยไม่ทำให้สมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าลดลงต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีในการเตรียมเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการพิมพ์อิงค์เจ็ต ซึ่งเป็นวิธีในการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความสม่ำเสมอ และมีความสามารถในการกำหนดขนาดและรูปร่างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี และเป็นการช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ชนิดจลนสามารถนำไปใช้ในการขยายขนาดการผลิตเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ดี โดยได้ทำการทดสอบการขยายส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าจาก 5 ตารางเซนติเมตรเป็น 25 ตารางเซนติเมตร พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ใกล้เคียงกัน

งานวิจัยนี้มีการเปรียบเทียบวิธีในการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าระหว่างการพิมพ์อิงค์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนผ้าคาร์บอนกับการพิมพ์อิงค์เจ็ตลงบนเมมเบรนโดยตรง พบว่าการพิมพ์อิงค์เจ็ตลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาของเมมเบรนโดยตรงให้ประสิทธิภาพที่สูง โดยมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ 476 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งสูงกว่าการพิมพ์อิงค์เจ็ตลงบนผ้าคาร์บอนที่ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 434.8 มิลลิแอมแปร์อยู่ประมาณ 41.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเนื่องจากการมีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนเมมเบรนจะช่วยให้ความต้านทานการถ่ายโอนประจุมีค่าลดลง

จากนั้นจึงทำการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีโครงสร้างของขั้วแอโนดที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ และทำการทดสอบความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เจือปนมากับแก๊สไฮโดรเจนที่ความเข้มข้น 0, 20, 60 และ 100ppm พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 แบบต่างมีค่าลดลงเมื่อมีการปนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อมีการปนแก๊สไฮโดรเจนที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ในทุกความเข้มข้น เนื่องจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทีเนียมจะทำหน้าที่ในการจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์และเปรียบเสมือนเป็นแหล่งของแก๊สออกซิเจนที่ทำหน้าที่ออกซิไดส์คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกาะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อคาร์บอนมอนอกไซด์หลุดออกไปจากตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมก็จะ

เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชัน ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ดีกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าแบบอื่น นอกจากนี้ยังสามารถฟื้นฟูโดยการป้อนแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ได้รวดเร็วกว่าอีกด้วย

ในสัณฐานสุดท้ายของงานวิจัยนี้เป็นการขยายส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าจาก 5 ตารางเซนติเมตรเป็น 25 ตารางเซนติเมตรพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่ขยายส่วนเป็น 25 ตารางเซนติเมตรโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ทมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ทั้งแบบที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ทตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนิวทรีเนียมบนตัวรองรับคาร์บอน โดยมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ความแตกต่างกันเพียงร้อยละ 9 และ 11 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการขยายส่วนเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ทสามารถทำได้ดีในระดับที่ยอมรับได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเตรียมเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพิมพ์อิงค์เจ็ทมีประสิทธิภาพในการควบคุมการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความสม่ำเสมอ และมีความสามารถในการกำหนดขนาด และรูปร่างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีแต่เนื่องจากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทสามารถพิมพ์อิงค์เจ็ทลงไปได้ปริมาณน้อยในแต่ละชั้น ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการเตรียมเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาให้ได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการ (Catalyst loading) ซึ่งยังต้องพัฒนาวิธีการในการลดระยะเวลาในการเตรียมเมมเบรนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการพิมพ์อิงค์เจ็ทต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] เซลล์เชื้อเพลิง. [Online]. Available from :
<http://th.wikipedia.org/wiki/เซลล์เชื้อเพลิง> [2012, June 11]
- [2] Appleby, A.J., and Foulkes, F.R. Fuel cell handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [3] ณัฐศรา กาญจนรชตะ. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม/รูทีเนียมรองรับบนคาร์บอนด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554
- [4] ศราวลี ธนศิลป์. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแพลเลเดียม/คาร์บอนเคลือบบนเมมเบรนสำหรับการรีดิวซ์ออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552
- [5] Barbir, F. PEM Fuel Cells: Theory and Practice. New York: Elsevier Academic Press, 2005.
- [6] Haile, S.M. Fuel cell materials and components. Acta Materialia 51 (2003): 5981–6000.
- [7] Lee, J.S., et al. Polymer electrolyte membrane for fuel cells. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 12 (2006): 175-183.
- [8] Mikkola, M. Modification to A PEM Fuel cell Stack. Special assignment, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology, 2000.
- [9] Ryan P., Hayre O., Cha S.W., Colella W. and Prinz F.B. Fuel cell fundamentals. New York: John Willey & Sons LTD., 2003.
- [10] Litster, S. and Mclean, G. PEM fuel cell electrodes. Journal of Power Sources 130 (2004): 61–76.
- [11] Metha, V., and Cooper, J.S. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. Journal of Power Sources 114 (2003): 32-53.
- [12] Barbir, F., Braun, J., and Neutzler, J. Properties of Molded Graphite Bi-Polar Plates for PEM Fuel Cells. International Journal on New Materials for Electrochemical Systems 2 (1999): 197–200.

- [13] 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.
- [14] จิรวัด รัตนถาวร. การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนุ่มที่นิยม/คาร์บอนโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตบนชั้นแพร่แก๊สสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552
- [15] Inkjet Printing. [Online]. Available from :
http://en.wikipedia.org/wiki/Inkjet_printing [2012, Sep 12]
- [16] การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [online]. Available from:
<http://stuorgs.oakland.edu/IAHE/whatPEMFCmadeof> [2010, December 27].
- [17] วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. คະตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส – หลักทฤษฎีและการประยุกต์. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- [18] Geus J.W., Production and thermal pretreatment of supported catalysts, Amsterdam: Elsevier, 1983.
- [19] สารละลายของแข็งแบบเซลล์แทรก (Interstitial solid solution). (ออนไลน์) แหล่งที่มา:
http://www.elecnec.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/chaptor_4/interstition.html [2009, April 9].
- [20] Crystal structure-Wikipedia, the free encyclopedia [online]. Available from:
http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal_lattice [2009, April 9].
- [21] Wood D.L., Yi J.S., Nguyen T.V. Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells, Electrochimica Acta 43 (1998): 3795-3809.
- [22] ECO CHEMIE. Electrochemical Impedance Spectroscopy [online]. Available from:
<http://www.ecochemie.nl>. [2007, March 17].
- [23] Zhang, J. et. Al. High temperature PEM fuel cells. Journal of Power Sources 160 (2006): 872–891.
- [24] Larminie, J., and Dick, A. Fuel cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
- [25] Carr, R.W. Modeling of chemical reactions. Italy: Elsevier, 2007.
- [26] Foulkes F.R. Fuel cell handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 2000.

- [27] ศศิกานต์ เอ็นดู. ผลของตัวแปรต่อการเตรียมเอมอีเอในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [28] Zang J. PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers. London: Springer-Verlag, 2008.
- [29] Shi W, Hou M, Shao Z, Hu J, Hou Z, Ming P, Yi B. A novel proton exchange membrane fuel cell anode for enhancing CO tolerance. Journal of Power Sources 174, 164–169 (2007)
- [30] 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)
- [31] Garcia A, Paganin V, Ticianelli E. CO tolerance of PdPt/C and PdPtRu/C anodes for PEMFC. Electrochimica Acta 53, 4309–4315 (2008)
- [32] Wan C-H, Zhuang Q-H. Novel layer wise anode structure with improved CO-tolerance capability for PEM fuel cell. Electrochimica Acta 52, 4111–4123 (2007)
- [33] Wan C-H, Zhuang Q-H. Enhancing the CO tolerance of PEMFC MEAs by combining sputter-deposited and direct-printed composite anode catalyst layers. International Journal of Hydrogen Energy 32, 4402–4411 (2007)
- [34] Qi Z, He C, Kaufman A. Effect of CO in the anode fuel on the performance of PEM fuel cell cathode. Journal of Power Sources 111, 239–247 (2002)
- [35] Alcaide F, Miguel O, Grande H-J. New approach to prepare Pt-based hydrogen diffusion anodes tolerant to CO for polymer electrolyte membrane fuel cells. Catalysis Today 116, 408–414 (2006)
- [36] Alcaide F, Alvarez G, Cabot P-L, Miguel O, Querejeta A. Performance of carbon-supported PtPd as catalyst for hydrogen oxidation in the anodes of proton exchange membrane fuel cells. International journal of hydrogen energy 1-8 (2010)
- [37] Pereira L-G, Santos F-R, Pereira M-E, Paganin V, Ticianelli E. CO tolerance effects of tungsten-based PEMFC anodes. Electrochimica Acta 51, 4061–4066 (2006)
- [38] Shi W, Yi B, Hou M, Shao Z. The effect of H₂S and CO mixtures on PEMFC performance. International Journal of Hydrogen Energy 32, 4412 – 4417 (2007)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)

ไซคลิกโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการดูดซับ/คายซับของไฮโดรเจน โดยจะให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วงที่ต้องการศึกษาและอัตราการสแกนที่คงที่เข้าไปในวงจร และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยเมื่อเริ่มให้ศักย์ไฟฟ้าจะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าจากค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดไปจนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดนั้นแสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อลดศักย์ไฟฟ้าลงไปถึงค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดจะแสดงการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน

องค์ประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี มีดังนี้

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

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

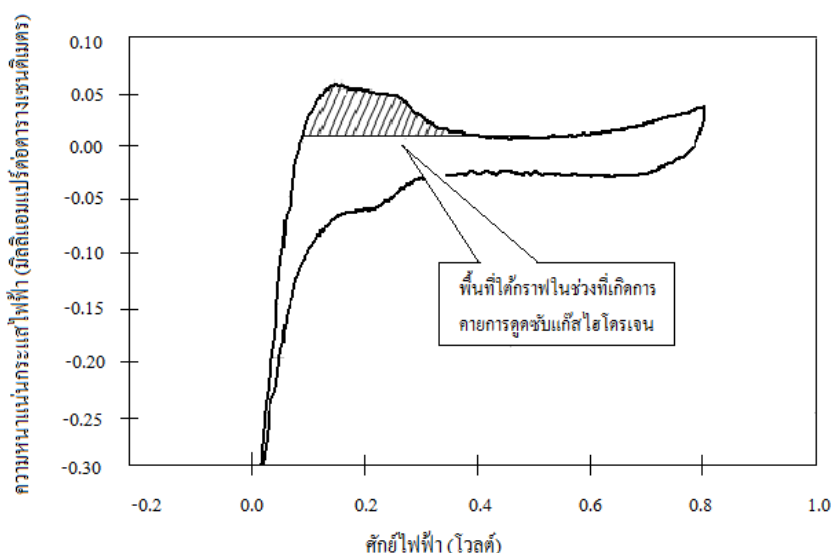
- **ขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode)** ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า โดยช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือกระแสไฟฟ้าจากขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ ขั้วไฟฟ้าวร่วมนี้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

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

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

(ค) แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแบบวนรอบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับเซลล์ที่ศึกษาโดยบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามศักย์ไฟฟ้า

การคำนวณหาพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจะนำกราฟไซคลิกโวลแทมเมทรีที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาโดยเริ่มจากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟไซคลิกโวลแทมเมทรีในช่วงที่เกิดการคายซับแก๊สไฮโดรเจน ดังแสดงในภาพที่ ข.1ซึ่งหาได้จากโปรแกรม GPES โดยเลือก Analysis จากนั้นเลือก Integrate between marker จากนั้นเลือกจุด 2 จุด โปรแกรมจะทำการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟเพื่อหาค่าประจุไฟฟ้า (Charge) ในหน่วยคูลอมบ์ (C)และนำค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาค่า ESA ตามสมการ ก.1[4]



ภาพที่ ก.1พื้นที่ใต้กราฟในช่วงที่เกิดการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนจากกราฟไซคลิกโวลแทมเมทรี [4]

$$ESA = \frac{A}{A_s \times C_{Pt} \times C_L} \quad (ก.1)$$

โดย ESA คือพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

(ตารางเมตรของแพลทินัมต่อกรัมของแพลทินัม)

A คือพื้นที่ใต้กราฟไซคลิกโวลแทมเมทรี (คูลอมบ์)

A_s คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ (ตารางเมตร)

C_{Pt} คือความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าของแพลทินัมซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.10 คูลอมบ์ต่อตารางเมตรของแพลทินัม

C_L คือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งในที่นี้คือแพลทินัม (กรัมของแพลทินัมต่อตารางเมตร)

ตัวอย่างการคำนวณพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยา

การคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรีในช่วงที่เกิดการคายซับแก๊สไฮโดรเจนของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรองรับบนคาร์บอนลงบนเมมเบรนโดยตรง ได้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากับ 0.2703 คูลอมป์โดยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 5 ตารางเซนติเมตรซึ่งสามารถคำนวณพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

จากสมการ ก.1

$$ESA = \frac{A}{A_s \times C_{Pt} \times C_L}$$

$$A = 0.2703 \text{ คูลอมป์}$$

$$A_s = 5 \text{ ตารางเซนติเมตร} = 0.0005 \text{ ตารางเมตร}$$

$$C_{Pt} = 2.10 \text{ คูลอมป์ต่อตารางเมตรของแพลทินัม}$$

$$C_L = 0.15 \text{ มิลลิกรัมของโลหะแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

$$= 1.5 \text{ กรัมของโลหะแพลทินัมต่อตารางเมตร}$$

ดังนั้นสามารถแทนค่าและคำนวณพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$ESA = \frac{0.2703}{0.0005 \times 2.10 \times 3}$$

$$ESA = 171.62 \text{ ตารางเมตรแพลทินัมต่อกรัมแพลทินัม}$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscopy, SEM /Energy dispersive X-ray diffraction, EDX) [90-92]

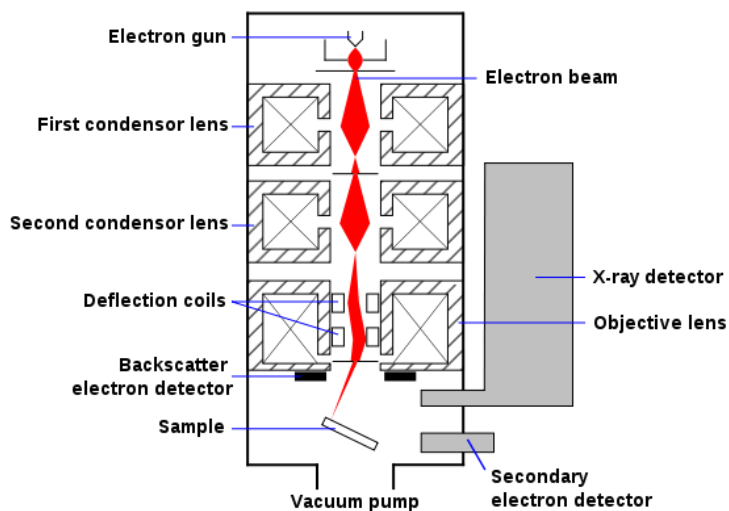
ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน (Morphology) และพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังสามารถศึกษาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาได้อีกด้วย โดยเทคนิคนี้จะใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการตรวจสอบพื้นผิวของสารตัวอย่างและสร้างเป็นภาพสามมิติของสารตัวอย่างออกมา ซึ่งส่วนประกอบและหลักการทำงานโดยสังเขปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในภาพที่ค.1 โดยอิเล็กตรอนที่เกิดจากปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0 – 30 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (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), โอลิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป



ภาพที่ ข.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [3]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนราธิป กัลยากาญจน์ เกิดเมื่อวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552