

ชั้นย่อยสำหรับอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์

นางสาวศศิธร เลิศวิริยะไพศาล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SUBLAYER FOR CATALYST ELECTRODEPOSITION ELECTRODES IN PEM FUEL CELL

Miss Sasithorn Lertviriyapaisan

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ชั้นย่อยสำหรับอิเล็กทรอนิกส์โทรดพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า
ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

โดย

นางสาวศศิธร เลิศวิริยะไพศาล

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. นิสิต ตันทวีเชษฐ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร. นิสิต ตันทวีเชษฐ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เก๋จวลี พุกษาทร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สุมิตรา จรสโรจน์กุล)

ศศิธร เลิศวิริยะไพศาล : ชั้นย่อยสำหรับอิเล็กโทรดพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าใน เซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์. (SUBLAYER FOR CATALYST ELECTRODEPOSITION ELECTRODES IN PEM FUEL CELL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ดร. นิสิต ตัณหาวิเชษฐ, 115 หน้า.

ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) มีความสำคัญต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่บนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพื่อประกอบเป็นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอ (Membrane electrode assembly, MEA) มีอยู่หลายเทคนิค เช่น การทา การสเปรย์ เป็นต้น นอกจากนั้นการเตรียมด้วยเทคนิคการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) ยังเป็นอีกทางเลือกที่สามารถใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของการเตรียมชั้นย่อย (Sublayer) เพื่อใช้ในการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยเทคนิคการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมชั้นย่อยได้แก่ ปริมาณผงคาร์บอน ปริมาณสารละลายเทฟลอน หรือ PTFE ปริมาณเนฟิออน (Nafion) และปริมาณกลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งจะส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ (Direct current electrodeposition, DC) โดยให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเท่ากับ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนชั้นย่อยที่ทำการศึกษา จากผลการทดลองจะพบว่าชั้นย่อยควรประกอบไปด้วยชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer) และชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer) โดยชั้นย่อยทั้งสองนี้จะส่งผลต่อกระบวนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ และการสัมผัสของ 3 เฟส (Three-phase zone) ของแก๊สเชื้อเพลิง อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (Nafion membrane) และตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนเป็นตัวช่วยการจัดการน้ำในเอ็มอีเอ โดยพบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีที่สุดได้จากการเตรียมชั้นย่อยที่ ปริมาณของชั้นที่ไม่ชอบน้ำเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอนโดยมีสัดส่วนเป็น 30:70 และปริมาณชั้นที่ชอบน้ำเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างเนฟิออนกับกลีเซอรอลในสัดส่วน 50:50 ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์เท่ากับ 308 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งเท่ากับ 184.8 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2551.....

4972497023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : PEM FUEL CELL / MEA / CATALYST LAYER / SUBLAYER /
ELECTRODEPOSITION

SASITHORN LERVIRIYAPAIAN : SUBLAYER FOR CATALYST

ELECTRODEPOSITION ELECTRODES IN PEM FUEL CELL. ADVISOR : NISIT
TANTAVICHET, Ph.D., 115 pp.

The catalyst layers are important to the performance of the proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) since they are locations where electrochemical reactions occur. There are various techniques used for preparation of the catalyst layers on the carbon electrodes for fabricating the membrane electrode assemblies (MEAs) such as painting and spraying. Besides those techniques, electrodeposition was also found to be another alternative for preparation of the catalyst layers. In this work, we study the effect of sublayers which have been fabricated prior to the electrodeposition of the Pt-catalyst. The influence of the sublayer preparation including carbon black content, PTFE content, Nafion content and glycerol content on the PEMFC performance has been investigated. The DC electrodeposition at the current density of 10 mA/cm^2 and the charge density of 2 C/cm^2 has been used to apply the Pt-catalyst layers on the prepared sublayers. The preliminary results show that the sublayers should consist of 2 layers – the hydrophobic layer and hydrophilic layer. The combination of these two sublayers is expected to help electrodeposition process, the water management in MEA, and three-phase zone enhancement of the MEA. It was found that the PEMFC best performance can be achieved with the 1.9 mg/cm^2 of the hydrophobic layer which consists of PTFE:carbon at 30:70 and the 0.8 mg/cm^2 of hydrophilic layer which consists of Nafion:glycerol at 50:50 where the current density of 308 mA/cm^2 is produced at 0.6 V.

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

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

Academic Year :2008.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากหลายๆฝ่าย ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ดร. นิสิต ตันตวิเชษฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และการช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีรวมถึงช่วยตรวจทานแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤษภาทร และดร. สุมิตรา จรสโรจน์กุล ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำต่างๆ เพิ่มเติม รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ทางด้านเงินทุนในการทำวิจัย จากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และทุนอุดหนุนจากสำนักงานพลังงานทดแทน (สอพ.)

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้โอกาสและการสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดีและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฅ

บทที่

1	บทนำ.....	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1	เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell).....	4
2.1.1	หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง.....	5
2.1.2	ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง.....	6
2.2	เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์.....	12
2.2.1	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์.....	12
2.2.2	ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์.....	14
2.2.3	ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์.....	14
2.2.4	องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์.....	14
2.2.4.1	ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มเอซีเอ (Membrane Electrode Assembly, MEA).....	15
2.2.4.2	แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate)....	21
2.2.4.3	แผ่นกันรั่ว (Seal).....	22

บทที่		หน้า
2.3	ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วอิเล็กโทรด.....	22
2.3.1	ตัวรองรับคาร์บอน.....	22
2.3.2	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
2.3.3	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ.....	24
2.3.4	คุณสมบัติที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	24
2.3.5	ปริมาณสารละลายเนฟิออน.....	25
2.3.6	การสัมผัสกันของตัวเร่งปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์ในชั้นปฏิกิริยา...	25
2.3.7	การอัดด้วยความร้อนในการประกอบขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (Hot pressing/assembly of MEA).....	26
2.4	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด.....	26
2.4.1	การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition).....	26
2.4.2	การเตรียมพื้นผิวขั้วไฟฟ้าก่อนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	29
2.4.3	ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	30
2.4.3.1	รูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการพอกพูน.....	30
2.4.3.2	การเคลื่อนที่ของสารละลาย.....	31
2.4.3.3	คุณสมบัติในสารละลาย.....	31
2.4.3.4	การเกิดแก๊สระหว่างการพอกพูน.....	31
2.5	การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (Performance).....	31
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.1.1	แก๊ส.....	37
3.1.2	สารเคมีและครุภัณฑ์.....	37
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.3	ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว.....	38
3.3.1	เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเซลล์เดี่ยว (PEM single cell).....	40
3.3.2	ระบบการไหลของแก๊ส (Gas flow system).....	41
3.3.3	หน่วยควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller).....	41
3.3.4	หน่วยให้ความชื้นกับแก๊ส (Humidifier).....	42

บทที่	หน้า
3.3.5	หน่วยควบคุมความดันแก๊ส (Back pressure)..... 42
3.3.6	เครื่อง Electronic load..... 42
3.4	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 42
3.5	ตัวแปรที่ศึกษา..... 43
3.6	วิธีดำเนินการวิจัย..... 43
3.6.1	การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอน (Uncatalyst Carbon Electrode).... 43
3.6.1.1	ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Layer)..... 43
3.6.1.2	ชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Layer)..... 45
3.6.2	การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า..... 45
3.6.3	การปรับปรุงคุณภาพของเมมเบรน..... 47
3.6.4	การประกอบขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรน (Membrane Electrode Assembly, MEA)..... 48
3.7	การวิเคราะห์สมบัติของขั้วไฟฟ้า..... 49
3.7.1	การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 49
3.7.2	การศึกษาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า..... 49
3.7.3	การศึกษาขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า..... 49
3.8	การวัดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์สำหรับเซลล์เดี่ยว..... 50
3.8.1	การประกอบเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์..... 50
3.8.2	ขั้นตอนก่อนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง..... 51
3.8.3	ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง..... 52
3.8.4	ขั้นตอนภายหลังการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง..... 53
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 54
4.1	การเตรียมขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรน (MEA) โดยศึกษาองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง..... 54
4.1.1	ชนิดของผ้าคาร์บอนที่ใช้เป็นชั้นแพร่ผ่านของแก๊ส..... 54
4.1.2	ชนิดของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน..... 60
4.1.3	ปริมาณเนฟลอนที่ทำก่อนการประกอบเอ็มอีเอ..... 61

บทที่	หน้า
4.2 การศึกษาองค์ประกอบของชั้นย่อย (Sublayer).....	63
4.2.1 ชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer).....	63
4.2.1.1 องค์ประกอบของส่วนผสมในชั้นที่ชอบน้ำ.....	63
4.2.1.2 ปริมาณชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer loading)...	69
4.2.1.3 สัดส่วนขององค์ประกอบในชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer ratio).....	74
4.2.2 ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer).....	79
4.2.2.1 ชนิดของผงคาร์บอน.....	79
4.2.2.2 สัดส่วนของชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer ratio).....	82
4.3 ปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	86
4.4 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม.....	88
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	91
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง.....	99
ภาคผนวก ข การคำนวณในการเตรียมชั้นย่อย.....	101
ข.1 การคำนวณหาปริมาณสารในอัตราส่วนของ PTFE กับผงคาร์บอนใน ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Ratio of hydrophobic layer).....	101
ข.2 การคำนวณในการเตรียมปริมาณชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer loading).....	102
ข.3 การคำนวณหาอัตราส่วนของเนฟลอนกับกลีเซอรอลในชั้นที่ชอบน้ำ (Ratio of hydrophilic layer).....	104
ภาคผนวก ค การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าจากความแตกต่าง ของน้ำหนักก่อนและหลังการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	106
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ X-rays diffraction.....	109

บทที่	หน้า
ภาคผนวก จ ผลการคำนวณหาพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry (CV).....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางเปรียบเทียบสมบัติและลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ..	10
2.2	ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ.....	11
4.1	สมบัติทางกายภาพของผ้คาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc. และ E-TEK โดยใช้เครื่อง Capillary Flow Porometer ในการวัดขนาดรูพรุน และใช้ไมโครมิเตอร์ในการวัดความหนาของผ้คาร์บอน.....	55
4.2	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้คาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc.และ E-TEK.....	57
4.3	ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้คาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc.และ E-TEK.....	59
4.4	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้เมมเบรน 115 และเมมเบรน 212.....	61
4.5	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ปริมาณเนฟิออนที่ทา ก่อนการอัดเป็นเอ็มอีเอเท่ากับ 5 และ 92 ไมโครลิตร.....	62
4.6	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของชั้นที่ขอบน้ำคือเนฟิออนกับกลีเซอรอล; PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน ในการเตรียมชั้นย่อย.....	65
4.7	ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของชั้นที่ขอบน้ำคือเนฟิออนกับ กลีเซอรอล; PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน.....	69
4.8	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ขอบน้ำ	70
4.9	ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ขอบน้ำ.....	73

ตารางที่		หน้า
4.10	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟลอนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง.....	75
4.11	ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟลอนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง.....	79
4.12	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเปรียบเทียบชนิดของผงคาร์บอนในชั้นที่ไม่ชอบน้ำระหว่าง Vulcan และ Acetylenen black.....	81
4.13	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน.....	83
4.14	ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน.....	86
4.15	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเปรียบเทียบวิธีการเตรียมชั้นย่อย.....	87
4.16	ขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัมจากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค TEM และ XRD.....	89
4.17	เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V กับงานวิจัยอื่นๆ..	90
ก.1	ข้อมูลในการเตรียมขั้วไฟฟ้าเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว.....	99
ข.1	ปริมาณส่วนผสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอนที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆ ในการเตรียมชั้นที่ไม่ชอบน้ำ โดยมีปริมาณเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร คิดเผื่อ 4 ชั้นงาน).....	103
ข.2	ปริมาณของส่วนผสมที่ใช้ระหว่างเนฟลอนกับกลีเซอรอลในการเตรียมขั้วไฟฟ้าให้มีปริมาณชั้นที่ชอบน้ำที่แตกต่างกัน โดยให้มีสัดส่วนระหว่างเนฟลอนต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 50:50 (ขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร).....	103

ตารางที่		หน้า
ข.3	ปริมาณส่วนผสมระหว่างเนฟิออนกับกลีเซอรอลที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆในการเตรียมชั้นที่ขอบน้ำ โดยมีปริมาณเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร).....	105
ค.1	ข้อมูลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	107
ง.1	ข้อมูลการคำนวณขนาดอนุภาคแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วย X-rays diffraction.....	110
จ.1	ข้อมูลการคำนวณพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ด้วย Cyclic voltammetry.....	113

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	หลักการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ.....	11
2.2	หลักการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์.....	13
2.3	องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์ชนิดเซลล์เดี่ยว (Single cell).....	15
2.4	โครงสร้างของขั้วไฟไนต์ฟลูออโรโรเอทีดีเอ็น หรือ เนฟิออนเมมเบรน.....	16
2.5	โครงสร้างของเอ็มอีเอ: (ก) อุดมคติ; (ข) Three phase region.....	19
2.6	การต่อเซลล์ไฟฟ้าสำหรับการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	27
2.7	ภาพจำลองลักษณะชั้นต่างๆ ของขั้วไฟฟ้า.....	30
2.8	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์.....	33
3.1	แผนภาพจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์แบบเซลล์เดี่ยว.....	39
3.2	ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์แบบเซลล์เดี่ยว.....	39
3.3	เซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์แบบเซลล์เดี่ยว (PEM single cell) ของบริษัท Electrochem, Inc.....	40
3.4	(ก) แผ่นสะสมกระแสและการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิง; (ข) ช่องทางการไหลของแก๊ส แบบ Serpentine.....	40
3.5	เครื่อง Electronic load รุ่น PLZ-30F ของบริษัท KIKUSUI.....	42
3.6	การต่อเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า โดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	47
3.7	ภาพจำลองลักษณะชั้นในการเตรียมเอ็มอีเอ.....	48
3.8	ภาพจำลองของแต่ละชั้นในการประกอบเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์แบบเซลล์เดี่ยว..	50
4.1	กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนด้วยตัวเองปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc.และ E-TEK.....	57
4.2	ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท: (ก) Electrochem, Inc.; (ข) E-TEK.....	58
4.3	ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท: (ก) Electrochem, Inc.; (ข) E-TEK.....	59

ภาพที่		หน้า
4.4	กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้เมมเบรน 115 และเมมเบรน 212 ในการประกอบเอ็มอีเอ.....	60
4.5	กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ปริมาณเนฟิออนที่มาก่อนการอัดเป็นเอ็มอีเอเท่ากับ 5 และ 92 ไมโครลิตร.....	62
4.6	กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ส่วนผสมของชั้นที่ชอบน้ำคือเนฟิออนกับกลีเซอรอล; PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน ในการเตรียมชั้นย่อย.....	65
4.7	ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของ ชั้นที่ชอบน้ำคือ: (ก) เนฟิออนกับกลีเซอรอล; (ข) PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; (ค) เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน.....	66
4.8	ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมโดยใช้ส่วนผสมของชั้นที่ชอบน้ำ: (ก) เนฟิออนกับกลีเซอรอล; (ข) PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; (ค) เนฟิออนกับ กลีเซอรอล และผงคาร์บอน.....	68
4.9	กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ชอบน้ำ.....	70
4.10	ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ชอบน้ำ: (ก) 0; (ข) 0.4; (ค) 0.8; (ง) 1.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร.....	72
4.11	ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมโดยใช้ส่วนผสมของ เนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ชอบน้ำ: (ก) 0; (ข) 0.4; (ค) 0.8; (ง) 1.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร.....	73

ภาพที่	หน้า	
4.12	กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง.....	74
4.13	ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง: (ก) 100:0; (ข) 75:25; (ค) 50:50; (ง) 25:75; (จ) 0:100; (ฉ) 0:0.....	77
4.14	ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมโดยใช้ส่วนผสมของ เนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง: (ก) 0:0; (ข) 100:0; (ค) 75:25; (ง) 50:50; (จ) 25:75; (ฉ) 0:100.....	78
4.15	กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยเปรียบเทียบชนิดของผงคาร์บอนในชั้นที่ไม่ชอบน้ำระหว่าง Vulcan และ Acetylene black.....	80
4.16	ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของ PTFE กับผงคาร์บอนซึ่งทำการเปรียบเทียบชนิดของผงคาร์บอนระหว่าง: (ก) Vulcan; (ข) Acetylene black.....	81
4.17	กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน.....	82
4.18	ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน: (ก) 10:90; (ข) 30:70; (ค) 50:50; (ง) 70:30; (จ) 90:10.....	84
4.19	ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมโดยหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน: (ก) 10:90; (ข) 30:70; (ค) 50:50; (ง) 70:30; (จ) 90:10.....	85

ภาพที่	หน้า
4.20	กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่น ประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยเปรียบเทียบวิธีการเตรียมชั้น ย่อย..... 87
4.21	ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเปรียบเทียบวิธีการเตรียมชั้น ย่อยระหว่าง: (ก) การทา; (ข) การสเปรย์..... 88
4.22	ภาพถ่าย TEM แสดงขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัม: (ก) ที่เตรียมโดยการ พอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 10 mA/cm ² , 2 C/cm ² ; (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยาทาง การค้า Pt/C 10%wt..... 89
จ.1	การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนภายในเซลล์เชื้อเพลิง..... 112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน ความเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นยุคแห่งเทคโนโลยี เครื่องมือ และอุปกรณ์ ซึ่งทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยในช่วงศตวรรษที่ผ่านมาแหล่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่มักได้มาจากปิโตรเลียม เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มพลังงานสิ้นเปลือง เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป และมีอยู่ในปริมาณจำกัด จึงอาจก่อให้เกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานได้ อีกทั้งกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมจะผลิตแก๊ส และกากของเสียที่เป็นพิษ (เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น) ซึ่งเป็นอันตรายทั้งต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดปัญหาสภาวะแวดล้อมทางอากาศที่เสื่อมโทรมลง ปัจจุบันปัญหาเหล่านี้ได้ทวีความรุนแรงมากขึ้น การแสวงหาพลังงานทดแทนแหล่งใหม่ๆ จึงมีความสำคัญอย่างสูง ความก้าวหน้าของวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน ทำให้เกิดเทคโนโลยีที่สามารถดึงเอาแหล่งพลังงานใหม่หลายแหล่งมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ จากพลังงานแสงอาทิตย์ จากแรงลม และจากความร้อนใต้พิภพ รวมทั้ง การใช้มูลสัตว์ผลิตแก๊สสำหรับการเผาไหม้ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม พลังงานทดแทนดังกล่าวที่สามารถผลิตได้เอง มีปริมาณน้อยมาก และยังมีค่าใช้จ่ายสูง เมื่อเทียบกับพลังงานที่ผลิตได้จากน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาค้นคว้า และพัฒนานาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อทดแทนแหล่งพลังงานเดิมจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (Abaoud et al., 2005) ซึ่งควรเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Renewable energy) โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือดีกว่าแหล่งพลังงานเดิม ซึ่งทางเลือกหนึ่งก็คือ การใช้เซลล์เชื้อเพลิง โดยเทคโนโลยีนี้อาจจะเข้ามามีบทบาทอย่างมากในอนาคต ต่อการพัฒนาพลังงานรูปแบบใหม่ขึ้นใช้เอง

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าโดยไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจน ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงไม่ก่อมลภาวะทางอากาศ ไม่มีเสียงดังรบกวน ทั้งยังมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงกว่า เครื่องยนต์เผาไหม้ 1-3 เท่า (Wei et al., 2006) ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง และชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้

เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการศึกษา และพัฒนาเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความได้เปรียบด้านภาวะการทำงานที่อุณหภูมิและความดันต่ำ มีส่วนประกอบที่ไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็ก เหมาะสำหรับเป็นแหล่งพลังงานที่ต้องการการเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ ยานอวกาศ เป็นต้น แต่ปัญหา คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเป็นโลหะมีสกุล เช่น แพลทินัม ซึ่งมีราคาสูง ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงตามไปด้วย ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง เพื่อให้มีต้นทุนในการผลิตลดลงโดยที่ยังคงประสิทธิภาพที่ดี และสามารถใช้งานได้จริงในชีวิตประจำวัน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาพัฒนาเทคนิคการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า โดยใช้วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) โดยในงานวิจัยนี้จะเน้นในส่วนของการเตรียมชั้นย่อยก่อนการพอกพูนของโลหะแพลทินัมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากงานทดลองในอดีต (นพวรรณ สายบัวทอง, 2550) พบว่าชั้นย่อยก่อนการพอกพูนด้วยไฟฟ้ามีผลต่อสมบัติของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมชั้นย่อยที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า
2. ศึกษาผลของภาวะการเตรียมชั้นย่อย ต่อสมบัติทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า และประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หาองค์ประกอบที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นย่อยเพื่อใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า ในการเตรียมเป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมซึ่งเตรียมโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มสำหรับใช้งานในอนาคต

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมสารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องแก้วต่างๆ ที่ต้องใช้ในการทดลอง
3. ศึกษาวิธีการทดลอง และการใช้เครื่องมือต่างๆ
4. ศึกษาวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีโลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า
5. เตรียมหน่วยเยื่อแผ่น และอิเล็กโทรด แล้วนำไปทดสอบสมรรถนะการทำงานในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์แบบชนิดเซลล์เดี่ยว
6. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเตรียมขั้วไฟฟ้า ดังนี้
 - ส่วนผสมต่างๆ ที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นย่อยซึ่งได้แก่
 - ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer) ซึ่งประกอบด้วย
 - ผงคาร์บอน (Carbon black)
 - ปริมาณโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE)
 - ชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer) ซึ่งประกอบด้วย
 - ปริมาณเนฟลอน (Nafion)
 - ปริมาณกลีเซอรอล (Glycerol)
 - เทคนิคในการเตรียมชั้นย่อย ได้แก่
 - เทคนิคการทา (Printing)
 - เทคนิคการสเปรย์ (Spraying)
7. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้
 - ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า
 - โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา
 - ขนาดอนุภาคการรวมตัว และการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา
 - พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า
8. วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง
9. เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิง คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมี (Chemical energy) ของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาไหม้ ผลพลอยได้ คือ ความร้อนและน้ำเท่านั้น จึงทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Wei et al., 2006) หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ แต่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดแต่ละด้าน เมื่อต่อขั้วอิเล็กโทรดจะก่อให้เกิดการไหลเวียนของอิเล็กตรอน โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิง (Fuel) หลักที่ใช้คือแก๊สไฮโดรเจน โดยมีแก๊สออกซิเจนเป็นสารออกซิแดนต์ (Oxidant) ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนนั้นเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด และปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดผ่านวงจรไปที่ขั้วแคโทดเพื่อทำปฏิกิริยาได้เป็นกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น (Barbir, 2005)

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง

- เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยทั่วไป
- เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำเนื่องจากในกระบวนการที่เกิดขึ้นมีเพียง กระแสไฟฟ้าน้ำ และความร้อนเท่านั้น ต่างจากการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งจะมีมลพิษต่างๆ เกิดขึ้น เช่น ก๊าซ SO_x, NO_x, CO_x และ HC เป็นต้น
- เซลล์เชื้อเพลิงง่ายต่อการดูแลรักษา และไม่เกิดเสียงดังขณะทำงาน
- สามารถเพิ่มพลังงานทางไฟฟ้าได้โดยการต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบอนุกรม ซึ่งการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำเป็นโมดูล (Module) เล็กๆ แล้วนำมาต่ออนุกรมกัน
- มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูง และใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยเมื่อเทียบกับขนาดกำลังไฟฟ้าที่ได้
- สามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาถูกลงกับเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงได้

- สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง สามารถนำความร้อนที่ได้มาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ และทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย
- มีการใช้งานเป็นระบบการกักเก็บพลังงานในยานอวกาศ โดยใช้ระบบแก๊สไฮโดรเจน – ออกซิเจน
- ใช้เวลาในการเริ่มต้นเดินเครื่อง (Start up) สั้น สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิต่ำ

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิง

- มีค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง
- ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง มีราคาแพง

2.1.1 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง

ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ ขั้วลบหรือแอโนด (anode) ขั้วบวกหรือแคโทด (cathode) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) และเชื้อเพลิงซึ่งเป็นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยขั้วไฟฟ้า (electrode) ทั้ง 2 ขั้วจะประกบติดกับสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเชื้อเพลิงจะไหลผ่านแผ่นโลหะพรุน (Porous metal plate) ที่วางประกบอิเล็กโทรไลต์อยู่คนละด้าน โดยแต่ละด้านของ Plate จะต่อกับสายไฟออกมาเพื่อให้เป็นทางเดินของอิเล็กตรอน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดจะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วย

- ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดจะเปลี่ยนแก๊สไฮโดรเจนกลายเป็นโปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอนอิสระที่จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด
- ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดจะรวมแก๊สออกซิเจนและโปรตอนให้กลายเป็นน้ำซึ่งก่อให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรง และให้ความร้อนและน้ำเป็นผลผลิตของระบบ โดยไม่มีการปลดปล่อยสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงบางชนิด ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด และเคลื่อนที่ผ่านทางอิเล็กโทรไลต์ซึ่งใช้ออกซิเจนไอออนเป็นตัวเคลื่อนที่ (Charge carrier) ในอิเล็กโทรไลต์ บางชนิดอาจใช้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เป็นตัวเคลื่อนที่ก็ได้ (Litster and Mclean, 2004) เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นแบบกระแสตรง ดังนั้นในการนำพลังงานจากไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป จึงจำเป็นต้องมีเครื่องอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเชื้อเพลิงเป็นกระแสสลับก่อนที่จะถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถตรวจสอบได้จากอุปกรณ์หรือโหลดที่เชื่อมต่อระหว่างขั้วแอโนด และแคโทด ส่วนน้ำ

และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกขับออกจากอิเล็กโทรไลต์ต่อไป สำหรับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดพื้นที่ของ Plate หรือขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละเซลล์จะถูกจำกัดด้วยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งมีค่าประมาณ 1.23 โวลต์ ต่อหนึ่งเซลล์เท่านั้น

2.1.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิด โดยทุกชนิดจะให้ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) ที่สามารถนำไปใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้เหมือนกัน โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงสามารถแบ่งโดยใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นเกณฑ์ ซึ่งสามารถแบ่งเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 5 ประเภท คือ (Barbir, 2005)

1. **เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell, AFC)** เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 70 องค์การนาซา (NASA) เคยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและน้ำให้กับยานอวกาศในโครงการอพอลโล และโครงการเจมินี เชื้อเพลิงที่ใช้กับเซลล์ชนิดนี้คือไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยไฮโดรเจนเข้าทางแอโนด ส่วนออกซิเจนเข้าทางแคโทด โดยมีสารอิเล็กโทรไลต์ในรูปแบบของแอลคาไลน์ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide (KOH)) สภาวะอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 50 - 200 องศาเซลเซียส

ข้อดี - มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงและสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีราคาถูก

ข้อเสีย - เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำเป็นต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก ซึ่งมีราคาแพงทำให้ต้นทุนการผลิตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีราคาสูง ปกติการใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำกัดอยู่เฉพาะงานในด้านอวกาศเท่านั้น อีกทั้งอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเป็นของเหลว ที่อาจมีการรั่วซึมและเกิดปัญหาการกัดกร่อนได้

2. **เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton Exchange Membrane, PEMFC)** หรือมีอีกชื่อหนึ่งคือ "Solid Polymer Fuel Cell" เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ในรูปแบบเยื่อแผ่นของพอลิเมอร์ (Polymer) บางทำงานในสภาวะอุณหภูมิต่ำประมาณ 30-80 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณร้อยละ 40-50 สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ช่วง 50-250 กิโลวัตต์

ข้อดี - เนื่องจากเซลล์ชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิต่ำและใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง จึงไม่มีปัญหา การรั่วซึมและมีปัญหาการกัดกร่อนน้อยเหมาะสำหรับการใช้งานในอาคารบ้านเรือนรถ

ยนต์ ตลอดจนอุปกรณ์พกพา โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีความหนาแน่นกำลังสูง (High power density) ทำให้สามารถที่จะเปลี่ยนแปลง Out put ได้ทันทีตามความต้องการการใช้กำลังไฟฟ้า และเนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้อยู่ในสภาพของแข็งทำให้ไม่มีปัญหาการรั่วซึมและการกัดกร่อน

ข้อเสีย - ต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น และโลหะแพลทินัมที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยามีราคาแพงอีกทั้งแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนก็มีราคาสูงอีกด้วย

3. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) ใช้กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ โดยปัจจุบันมีการผลิตเซลล์แบบนี้ออกมาเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์แล้ว เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริกทำงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ 220 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้กรดฟอสฟอริกจะนำประจุไฟฟ้าได้น้อย เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีสารประกอบของคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ถึงร้อยละ 1.5 ซึ่งก็หมายถึงสามารถใช้เชื้อเพลิงเบนซินเต็มลงไปได้ เพียงแต่ต้องเป็นชนิดที่ปราศจากกำมะถันโดยสิ้นเชิงเท่านั้น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณร้อยละ 40 แต่สามารถใช้ประโยชน์จากไอน้ำร้อนที่เกิดขึ้นโดยนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าร่วม (Cogeneration) ต่อได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มักจะถูกใช้ในยานพาหนะที่มีขนาดใหญ่ เช่น รถบัสหรือรถจักร เป็นต้น

ข้อดี - เป็นเซลล์ที่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิดแม้แต่น้ำมันเชื้อเพลิง แต่ต้องกำจัดกำมะถันในน้ำมันออกให้เหลืออยู่น้อยที่สุดก่อน

ข้อเสีย - ยังต้องใช้โลหะแพลทินัมที่มีราคาสูงเป็นสารเร่งปฏิกิริยา เซลล์มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก ทำให้มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์ชนิดอื่น เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์คือกรดฟอสฟอริกในสถานะของเหลว ดังนั้นชิ้นส่วนภายในจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดี

4. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอนเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้สารประกอบของเกลือคาร์บอนเนต เช่น สารลิเทียมคาร์บอนเนต (Lithium carbonate) โซเดียมคาร์บอนเนต (Sodium carbonate) หรือโปตัสเซียมคาร์บอนเนต (Potassium Carbonates) ที่หลอมเหลวเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการทำงานของเซลล์ประมาณ 650 องศาเซลเซียส เซลล์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณร้อยละ 60 สามารถที่จะใช้ทดแทนการเผาผลาญเชื้อเพลิงเช่น ถ่านหิน และหากใช้ร่วมกับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าความร้อนรวมแล้วจะมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 85

ข้อดี - เนื่องจากเซลล์ทำงานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้เชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าได้หลายชนิด เช่น แก๊สไฮโดรเจน แก๊สธรรมชาติ แก๊สโพรเพน น้ำมันดีเซล เป็นต้น และยังไม่มีความจำเป็นต้องใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้วไฟฟ้าของเซลล์นี้จะใช้นิกเกิล (Nickel) ทำให้มีราคาถูกกว่าเซลล์ชนิดอื่นที่ต้องใช้ แพลทินัม (Platinum)

ข้อเสีย - ที่สภาวะอุณหภูมิสูงจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะกับการใช้งานในเครื่องใช้ขนาดเล็กที่ต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าเมกะวัตต์ และยังสูญเสียคาร์บอนไปตลอดเวลาที่ทำปฏิกิริยา

5. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง ทำจากสารประกอบเซรามิก เช่น แคลเซียม (Calcium) หรือ เซอร์โคเนียม (Zirconium) เป็นต้น มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณร้อยละ 60 และหากนำมาใช้กับระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าความร้อนร่วมแล้ว จะให้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 85 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิ 500 -1000 องศาเซลเซียส

ข้อดี - เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่สภาวะอุณหภูมิสูงมาก สามารถใช้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทั่วไปได้ โดยไม่ต้องแยกไฮโดรเจนออกมาเสียก่อน และยังไม่จำเป็นต้องใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ต้องใช้ระบบรีฟอร์มเมอร์ ในการเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงจึงอาจช่วยลดต้นทุนในการสร้างระบบรีฟอร์มเมอร์ นอกจากนี้ยังทนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปนเปื้อนมากับเชื้อเพลิงได้ดี

ข้อเสีย - เซลล์ที่ทำงานในสภาวะอุณหภูมิสูงต้องเสียเวลาในการอุ่นเครื่องนาน และจำเป็นต้องสร้างผนังหนาเพื่อป้องกันความร้อนที่แผ่ออกมา และต้องมีขนาดใหญ่ในการเปลี่ยนพลังงาน เนื่องจากความร้อนสูง ความร้อนสูญเสียมีมาก จึงอาจจะต้องเอาความร้อนนี้ไปเปลี่ยนเป็นพลังงานกล และเปลี่ยนกลับมาเป็นไฟฟ้าอีกชั้นหนึ่ง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้น

นอกจากเซลล์เชื้อเพลิงที่กล่าวมาแล้วยังมีเซลล์อีกชนิดที่เรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct methanol Fuel Cell, DMFC) โดยพัฒนามาจากเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกัน ซึ่งใช้เมมเบรนชนิดพอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ แต่ต่างกันที่ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดคือ ใช้เมทานอลแทนแก๊สไฮโดรเจน โดยที่เมทานอลจะถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านสารเข้าระบบรีฟอร์มเมอร์เนื่องจากเชื้อเพลิงอยู่ในสภาวะของเหลวซึ่งง่ายต่อการเก็บ ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณร้อยละ 40 ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิต่ำระหว่าง 20 – 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิต่ำจึงเหมาะสมที่จะพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น

คอมพิวเตอรืแล็บทีอบ โทรศัพทืมือถือ นอกจากนื้ยังเหมาะที่จึจะนำมาใช้กับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วย พลังงานไฟฟาแบบเติมเมทานอลด้วย

ข้อดี - เนื่องจกเซลลืเชื้อเพลิงชนิดนื้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิค่อนข้างต่ำและมีข้อได้เปรียบเนื่อง จกการเก็บเชื้อเพลิงที่อยูในสภาวะของเหลวได้สะดวก จึงเหมาะสมที่จึจะพัฒนาให้เป็นแหล่งพลัง งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา และรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟาแบบเติมเมทา นอลโดยตรง

ข้อเสีย - โลหะแพลทินั่มที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยามีราคาแพง สมรรถนะต่ำเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟ ฟาของเมทานอล (MeOH) ที่แอโนดซ้ำ

และอีกชนิดหนึ่งคือ เซลลืเชื้อเพลิงแบบสังกะสี-อากาศ (Zinc-Air) เซลลืเชื้อเพลิงสังกะสี- อากาศใช้โลหะสังกะสีเป็นขั้วแอโนด เชื้อเพลิงที่ใช้คือ แก๊สไฮโดรเจนหรือสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนก็ได้ ขั้วแคโทดเป็นอากาศ และใช้แผ่นกรองสำหรับแยกแก๊สออกซิเจนออกมาจาก อากาศเพื่อป้อนเข้าระบบ เซลลืชนิดนื้ใช้สารโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิ การทำงานของระบบอยูในช่วงประมาณ 70 องศาเซลเซียส

ข้อดี - โลหะสังกะสีที่ใช้ทำขั้วแอโนดมีราคาต่ำ เซลลืทำงานได้โดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยา และ สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบตั้งแต่แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์จนถึงน้ำมันเชื้อเพลิง

ข้อเสีย - หลังจากทำปฏิกิริยาเคมีแล้วโลหะสังกะสีจะเปลี่ยนเป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จึงต้องคอย เปลี่ยนแผ่นสังกะสีใหม่เป็นระยะ

นอกจากนื้เซลลืเชื้อเพลิงยังสามารถแบ่งตามภาวะของอุณหภูมิในการทำงานได้ ดังนี้ (Larmine and Simader, 2000)

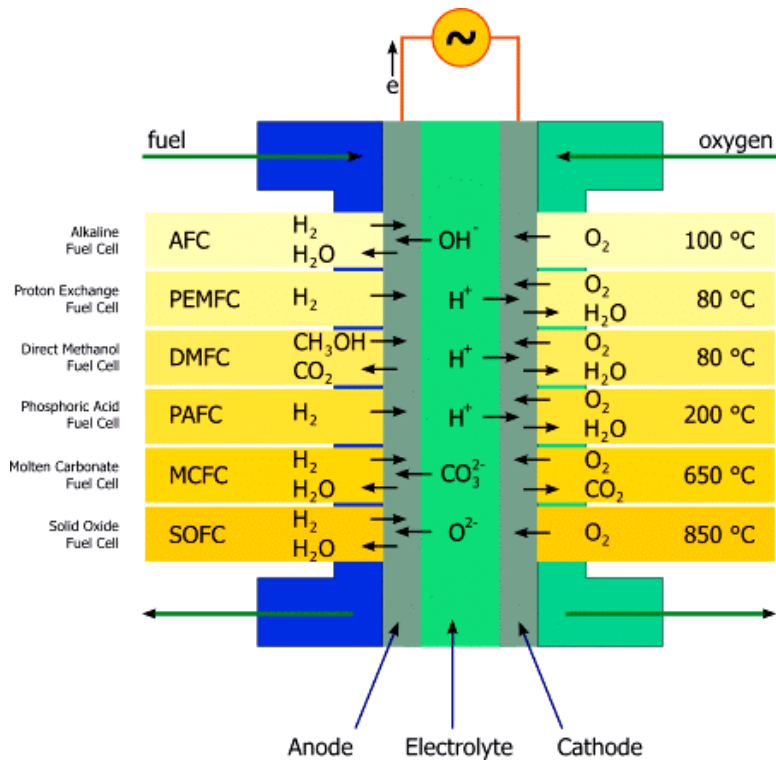
- เซลลืเชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิต่ำ (ทำงานที่อุณหภูมิ 80-200 องศาเซลเซียส) ได้แก่ เซลลืเชื้อเพลิงแอลคาไลน์และเซลลืเชื้อเพลิงฟูลีเอิม เหมาะสำหรับการใช้งานที่มีการ เคลื่อนที่ เช่น คอมพิวเตอรืพกพา รถยนต์และยานอวกาศ เป็นต้น
- เซลลืเชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิปานกลาง (ทำงานที่อุณหภูมิ 150-220 องศาเซลเซียส) ได้แก่ เซลลืเชื้อเพลิงกรดฟอสฟอริก เหมาะสำหรับการใช้งานในโรงไฟฟาขนาดเล็ก
- เซลลืเชื้อเพลิงแบบอุณหภูมิสูง (ทำงานที่อุณหภูมิ 600-1000 องศาเซลเซียส) ได้แก่ เชื้อเพลิงคาร์บอนเตลอมและเซลลืเชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง ซึ่งเหมาะสำหรับการ ผลิตกระแสไฟฟาและให้ความร้อนในปริมาณมาก

ซึ่งสามารถสรุปชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมดดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 จะแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของไอออนในแต่ละเซลล์เชื้อเพลิง โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ ทั้งที่ขั้วแอโนดและแคโทดจะสรุปดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติและลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ (Larmin and Simader, 2000)

ชนิดของ เซลล์เชื้อ เพลิง	อิเล็กโทรไลต์	ไอออน ที่เคลื่อน ที่	อุณหภูมิ ในการใช้งาน (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการใช้งาน
AFC	โปตัสเซียม ไฮดรอกไซด์	OH^-	50-200	ใช้ในยานอวกาศ เช่น ยาน อพอลโล กระสวยอวกาศ
PEMFC	แผ่นเมมเบรน พอลิเมอร์	H^+	30-100	ใช้ในยานพาหนะ อุปกรณ์ที่มี การเคลื่อนที่และระบบ CHP* ขนาดเล็ก
DMFC	แผ่นเมมเบรน พอลิเมอร์	H^+	20-90	ใช้ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มี การเคลื่อนที่ซึ่งสามารถใช้งาน ได้เป็นเวลานาน
PAFC	กรดฟอสฟอริก	H^+	~220	ใช้ในระบบ CHP* ขนาด 200 kW
MCFC	คาร์บอนเนต หลอมเหลว	CO_3^{2-}	~650	เหมาะสำหรับระบบ CHP* ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่
SOFC	เซรามิกซ์	O^{2-}	500-1000	เหมาะสำหรับระบบ CHP* ทุก ขนาด (2 kW – multi kW)

*CHP = Combined heat and power



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ (www.usfcc.com)

ตารางที่ 2.2 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ (Larmine and Simader, 2000)

ประเภทเซลล์เชื้อเพลิง	ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด	ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด
AFC	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
DMFC	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 2e^-$	$3/2O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	$1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

เนื่องจากการวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์ ดังนั้นจะกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะในส่วน of เซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์เท่านั้น

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

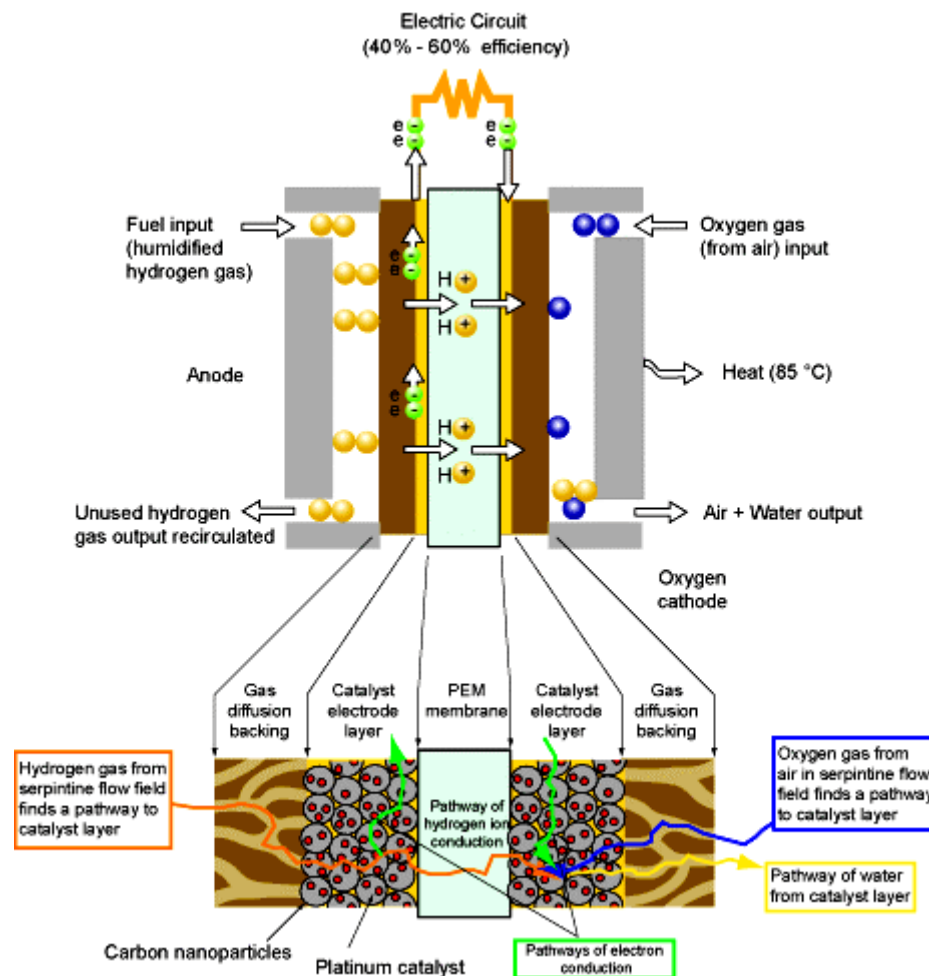
เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มเรียกอีกอย่างว่า เซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ของแข็ง (Solid Polymer Fuel Cell, SPFC) เนื่องจากมีการใช้พอลิเมอร์เมมเบรนเป็นอิเล็กโทรไลต์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีภาวะในการทำงานที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 60-100 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 1-2 บรรยากาศ อีกทั้งยังให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง (Power density) สามารถผลิตให้มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบาได้เริ่มการทำงานได้ในเวลาอันรวดเร็วจึงเหมาะสมสำหรับเป็นแหล่งให้พลังงานกับอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ ไทโรคัพที่มีมือถือ และคอมพิวเตอร์พกพา เป็นต้น (Barbir, 2005)

เมมเบรนที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยเมมเบรนจะถูกวางอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบพรุนที่มีแพลทินัม (Pt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองขั้ว ซึ่งมีข้อได้เปรียบเหนือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น คือ ไม่มีการรั่วของ อิเล็กโทรไลต์และมีปัญหาการกัดกร่อนน้อย เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์อยู่ในรูปของแข็ง ปัจจุบัน พอลิเมอร์เมมเบรนที่นิยมใช้ คือ ซัลโฟเนตพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Sulphonated polytetrafluoroethylene) มีชื่อทางการค้าว่า เนฟิออน (Nafion) ซึ่งมีคุณสมบัติในการยอมให้โปรตอนผ่านได้ แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน น้ำที่เกิดจากกระบวนการเคมีไฟฟ้าจะถูกกำจัดออกจากเซลล์มากับแก๊สทางด้านแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงออกโดยระบบหล่อเย็น ประสิทธิภาพของเมมเบรนจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายโปรตอน ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เข้าต้องทำให้มีความชื้น เพราะกระบวนการนำไอออนของเมมเบรนจะเกิดได้ยากหากเมมเบรนไม่มีความชื้น นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ไม่สามารถทนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

2.2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

เซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด วางประกบกัน โดยตรงกลางจะมีแผ่นพอลิเมอร์ของแข็ง ซึ่งเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนโปรตอน ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ซึ่งจะต้องมีความพรุนสูง และมีตัวเร่งปฏิกิริยาเกาะอยู่ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับขั้วไฟฟ้า จะต้องสามารถทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยารีดักชันได้ดี เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะมีตระกูล หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแสดงดังรูปที่ 2.2 เชื้อเพลิงซึ่งถูกนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยแก๊สไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแอโนด ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นโดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา

จากนั้นโปรตอน อิเล็กตรอนและความร้อนจะถูกผลิตออกมดั่งสมการที่ (2.1) โปรตอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการนำโปรตอนสูง (High proton conductivity) แต่ไม่สามารถนำอิเล็กตรอน (Electron barrier) ได้ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกเพื่อใช้เป็นกระแสไฟฟ้า โดยที่โปรตอนและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด เพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้ามายังขั้วดังกล่าว ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้นำเป็นผลิตภัณฑ์ดั่งสมการที่ (2.2) และได้ปฏิกิริยารวมแสดงดั่งสมการที่ (2.3)



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (<http://physics.nist.gov>)

จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งปฏิกิริยา (Reaction sites) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้าของตัวเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ โดยขั้วแอโนดและขั้วแคโทดที่ใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องมีคุณสมบัติในการยอมให้แก๊สซึมผ่าน (Permeable property) และนำกระแสไฟฟ้าได้ดี

2.2.2 ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

- ขนาดเล็กกะทัดรัด
- ให้พลังงานสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก
- เริ่มการทำงานได้อย่างรวดเร็ว
- อายุการทำงานยาวนาน
- ประสิทธิภาพสูง (50%) เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ (15%)
- เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดพลังงานชนิดอื่น

2.2.3 ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

- ต้นทุนการผลิตมีราคาสูง โดยเฉพาะโลหะแพลทินัมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง
- ต้องการแก๊สเชื้อเพลิงที่บริสุทธิ์ (H_2)
- ต้องการระบบจัดการน้ำที่ดี

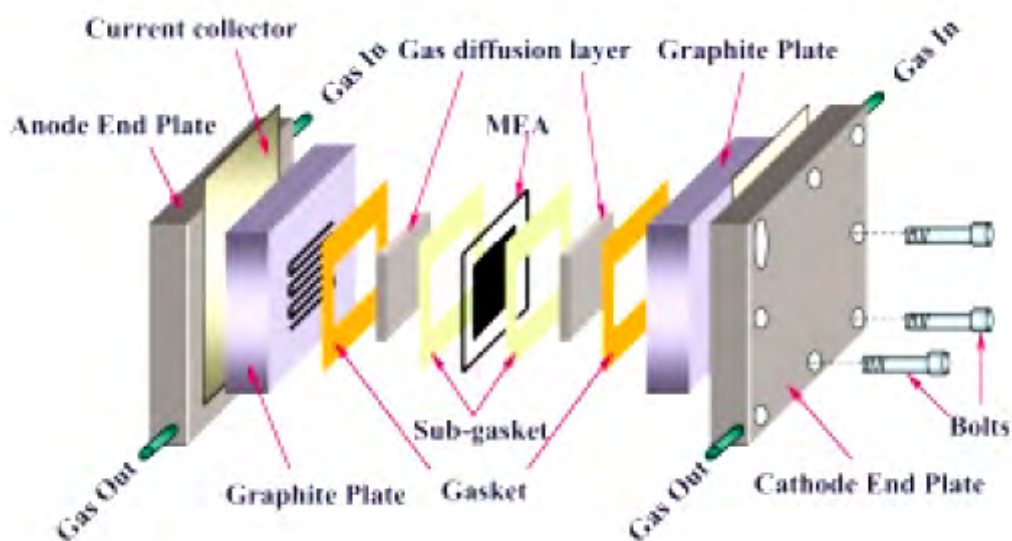
2.2.4 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

องค์ประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วย (Litster and Mclean, 2004)

- I. ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอ (Membrane Electro Assembly, MEA)
- II. แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate) ซึ่งจะมีช่องทางไหลของแก๊ส ทำหน้าที่กระจายแก๊สเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนท์ภายในเซลล์และเป็นตัวกั้นระหว่างเซลล์ภายในแถวเซลล์ เป็นตัวพากระแสไฟฟ้าออกจากแต่ละเซลล์ และเป็นช่องทางน้ำที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ให้ออกจากเซลล์ วัสดุที่นิยมใช้ คือ

แกรไฟต์ เนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง แต่มีข้อเสียคือราคาแพงและเปราะ

- III. แผ่นกันรั่ว (Seal) เนื่องจากข้อไฟฟ้ามีความพรุนเพื่อให้เกิดไหลผ่านได้เข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของแก๊สไปด้านนอกเซลล์ จึงจำเป็นต้องมีการใช้แผ่นกันรั่ว เพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส และควรมีความยืดหยุ่นพอสมควร เช่น สารจำพวกยาง (Rubber)



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ชนิดเซลล์เดี่ยว (Single cell)

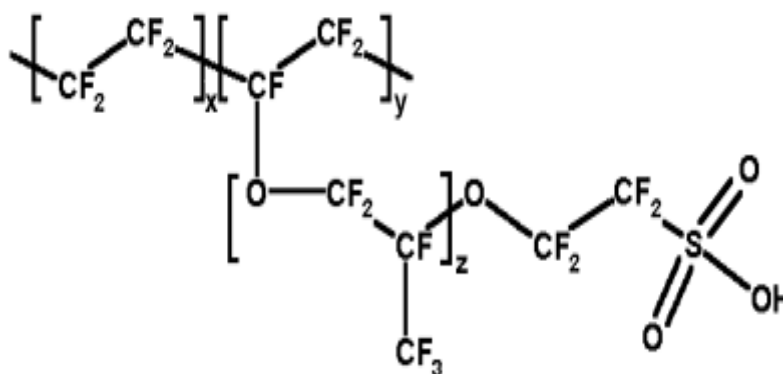
(www.scientific-computing.com)

2.2.4.1 ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอ (Membrane Electrode Assembly, MEA)

เอ็มอีเอถือเป็นหัวใจสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ เนื่องจากเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยา และการถ่ายโอนประจุของเซลล์เชื้อเพลิง เอ็มอีเอประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ เมมเบรนซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเกาะอยู่บนชั้นการแพร่ของแก๊ส การประกอบเอ็มอีเอทำโดยการนำขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) มาประกบเข้ากับเมมเบรน (ศศิกันต์ เอ็นดู, 2549) โดยองค์ประกอบหลักของขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน มีรายละเอียดดังนี้

1. เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane)

เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์จะใช้อิเล็กโทรไลต์ (Larmine and Simader, 2000) คือ เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเมมเบรนทำหน้าที่ช่วยถ่ายโอนโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยโครงสร้างหลักของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นพอลิเมอร์ของซัลโฟเนตเตตราฟลูออโรเอทิลีน (sulfonated tetrafluoroethylene) หรือชื่อทางการค้า คือ เนฟิออน (Nafion membrane) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของซัลโฟเนตเตตราฟลูออโรเอทิลีน หรือ เนฟิออนเมมเบรน

(<http://en.wikipedia.org>)

โดยโครงสร้างซัลโฟเนตเตตราฟลูออโรเอทิลีนประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

- (1) สารจำพวกพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene) หรือ PTFE เป็นแกนหลักของโครงสร้างโดยเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งความแข็งแรงของพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอน จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงทนทาน ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี
- (2) สายโซ่ $-O-CF_2-CF-O-CF_2-CF_2-$ ทำหน้าที่เชื่อมระหว่างแกนหลักกับส่วนซัลโฟเนตไอออน
- (3) กรดซัลโฟนิกที่สร้างพันธะที่ปลายของพอลิเมอร์กลายเป็นหมู่ SO_3^- ในส่วนปลายช่วงนี้เป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของน้ำไว้ โดยที่บริเวณนี้แรงยึดเหนี่ยวพันธะระหว่างหมู่ SO_3^- กับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ค่อนข้างอ่อนทำให้ไฮโดรเจนไอออนในเมมเบรนสามารถเคลื่อนที่ได้

ลักษณะทั่วไปของเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงต้องมีสภาพนำโปรตอนสูง มีสมบัติขวางกั้น (Barrier property) อิเล็กตรอนที่ดี มีความแข็งแรงทางกลที่ดี มีความทนทานต่อความร้อนและสารเคมี เมมเบรนจะต้องมีอันตรกิริยากับน้ำ และให้เกิดสภาพนำที่ดีในสภาวะไฮเดรชัน (Hydration) และต้องยอมให้มีการส่งผ่านน้ำที่เพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดโพลาริเซชัน ซึ่งเหล่านี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

การส่งผ่านของโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม จะเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยโมเลกุลของน้ำที่ขับเคลื่อนไปในระหว่างสายโซ่ในเมมเบรน ดังนั้นในเมมเบรนต้องมีน้ำเพื่อที่จะให้เกิดการพาประจุผ่านเมมเบรนไปได้ ข้อจำกัดนี้ทำให้เมมเบรนชนิดนี้ไม่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำได้ เนื่องจากน้ำจะระเหยออกไปทำให้สภาพนำของโปรตอนลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีน้ำมากเกินไปจะทำให้น้ำท่วมเซลล์ซึ่งเหล่านี้จะเป็นปัญหาต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ (สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ, 2543)

2. ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

อิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ประกอบด้วย 3 ภูมิภาค (Three-phase boundary) คือแก๊ส อิเล็กโทรไลต์ และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยขั้วอิเล็กโทรดประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ชั้นแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer) และชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) ชั้นแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer, GDL) (Barbir, 2005)

เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ซึ่งชั้นแพร่ของแก๊สจะต้องมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่ำหรือความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าสูง และมีความเป็นรูพรุนสูงเพื่อเป็นทางผ่านเข้าออกของแก๊สเชื้อเพลิงและน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา โดยทั่วไปมักทำมาจากเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) นำมาทำเป็นกระดาษคาร์บอน (Carbon paper) หรือนำมาทอเป็นผ้าเรียกว่า ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) โดยชั้นแพร่ของแก๊สมีหน้าที่ดังนี้

- เป็นเส้นทางผ่านของแก๊สเชื้อเพลิงจากช่องการไหลของแก๊ส (Flow field channel) ไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ติดกัน

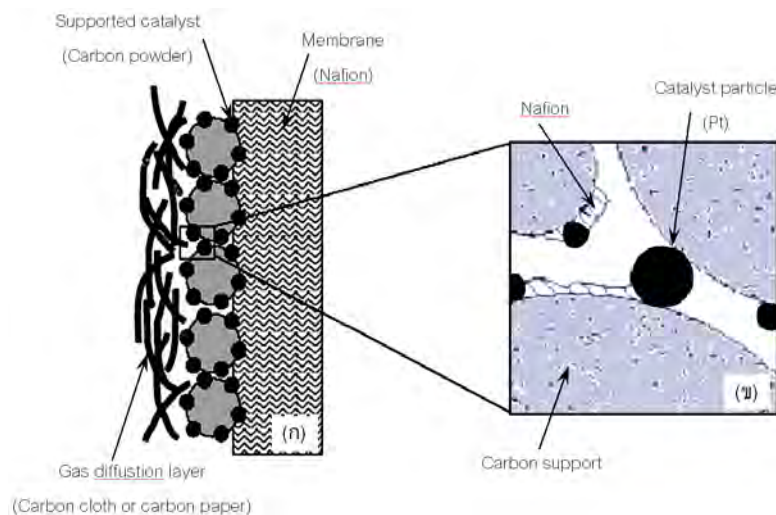
- เป็นเส้นทางผ่านสำหรับน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ออกไปยังช่องทาง การไหลของแก๊ส
- เป็นตัวนำไฟฟ้าเพื่อนำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า เพื่อจะได้ครบวงจรได้กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง
- ส่งผ่านความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ไปยังช่องทางทางการไหลของ แก๊ส เพื่อกำจัดออกจากเซลล์
- เป็นตัวรองรับเชิงกล (Mechanical support) เพื่อป้องกันการซ้อนทับกันระหว่างขั้วอิ เล็กโทรดประกอบเมมเบรนกับช่องทางไหลของแก๊ส

(2) ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer)

เป็นชั้นที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สเชื้อเพลิง ที่มีการใช้แก๊ส ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ในอุณหภูมิปกติจะไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากโมเลกุลมีความ เสถียรมาก จำเป็นจะต้องมีตัวกระตุ้นเพื่อให้เกิดการแตกตัว เช่น การเพิ่มอุณหภูมิหรือเติมสารที่ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดพลังงานกระตุ้น (Activation energy, E_a) ซึ่งจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ เร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นโลหะมีสกุล (Noble metal) เช่น แพลทินัม (Pt) พาลาเดียม (Pd) หรือ นิกเกิล (Ni) เป็นต้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็มมากที่สุด คือ แพลทินัม

จากรูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงในอุดมคติ ซึ่งประกอบด้วยชั้นเมมเบรน แลกเปลี่ยนโปรตอน ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและชั้นการแพร่ของแก๊สเชื้อเพลิง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิ งคาร์บอนบางส่วนจะสัมผัสโดยตรง กับเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน และเกิดการสัมผัสโดยตรงกับ แก๊สเชื้อเพลิง เรียกบริเวณนี้ว่า “Three-phase region” ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะทำให้ประสิทธิ ภาพของเอ็มอีเอสูงขึ้น เนื่องจากถ้าการสัมผัสกันทั้งสามส่วนหรือส่วนใดส่วนหนึ่งไม่ดีก็จะทำให้ การเกิดปฏิกิริยาที่ควรจะได้ดีลดลง ประสิทธิภาพที่ได้ก็จะลดลงด้วย เพราะการที่ชั้นแพร่ผ่าน ของแก๊สสัมผัสกับชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ก็แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวที่ดี อีกทั้ง ยังมีการยึดเกาะกับตัวรองรับที่มีความเป็นรูพรุนสูง เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะ ทำให้แก๊สที่แพร่ผ่านเข้ามาทางชั้นแพร่ผ่านของแก๊สเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรงได้ อย่างดี ส่วนการที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับชั้นเมมเบรนได้ดี ก็เพราะเมื่อเวลาที่แก๊สเข้าทำ ปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วก็จะเกิดการแตกตัวเป็นโปรตอนกับอิเล็กตรอนที่ชั้นของตัวเร่ง ปฏิกิริยา โปรตอนก็จะแพร่ผ่านเมมเบรนไปยังอีกฝั่งของขั้วไฟฟ้าซึ่งเมื่อเมมเบรนสัมผัสกับชั้นตัว เร่งปฏิกิริยาดีการแพร่ผ่านของโปรตอนก็จะเป็นไปได้ดี อีกทั้งเมื่อการสัมผัสกันทั้งสามส่วนดีก็จะ

ทำให้ความต้านทานภายในเซลล์มีค่าที่น้อย ดังนั้นการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง การปรับปรุงให้การสัมผัสกันทั้งสามส่วนดีขึ้นก็จะเป็นการช่วยเพิ่มให้ประสิทธิภาพที่ได้สูงขึ้นด้วย โดยในส่วนของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วน คือ ตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา (Larmine and Simader, 2000)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเอ็มอีเอ: (ก) อุดมคติ; (ข) Three phase region

(Larmine and Simader, 2000)

- ตัวรองรับ (Support)

เป็นส่วนที่มีไว้เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะมากระจายตัวอยู่บนตัวมัน ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวทั้งหมดให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยส่วนใหญ่ตัวรองรับมักเป็นสารจำพวกที่มีรูพรุนอยู่เป็นจำนวนมาก โดยหน้าที่ของตัวรองรับมีดังนี้

- ทำให้เกิดการกระจายตัวของโลหะ
- เพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวที่มีโครงสร้างไม่แข็งแรง
- เพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาในตำแหน่งที่ว่องไว (Active sites) ในการเกิดปฏิกิริยา
- เพิ่มความสามารถในการต้านทานการรวมตัวกันของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากความร้อน

สำหรับตัวรองรับที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม คือ ผงคาร์บอน (Carbon powder) เพราะมีความสามารถในการนำไฟฟ้า มีความพรุนสูงและมีพื้นที่ผิวมาก ช่วยในการเคลื่อนที่ของ

เชื้อเพลิงและโปรตอนได้ง่าย ช่วยดูดซับน้ำภายในระบบเพื่อป้องกันการเกิดชั้นฟิล์มของน้ำที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้ความต้านทานในระบบมีมากขึ้น แต่การเพิ่มตัวรองรับเข้าไปในขั้วไฟฟ้าอาจมีส่วนทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและทำให้ความหนาของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การแพร่ของเชื้อเพลิงไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยายากขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ดังนั้นปริมาณของตัวรองรับที่ใช้ควรมีความเหมาะสมกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการใช้งาน (สุกัญญา ทองคำ, 2547)

- ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่เติมลงไปในปฏิกิริยาที่น้อยมากเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น แล้วทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) เร็วขึ้น โดยที่สารนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังปฏิกิริยาเสร็จสิ้น กล่าวคือ ตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทหน้าที่ในการเร่ง ปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาทำให้พลังงานกระตุ้น (Activation energy, E_a) ที่ต้องการสำหรับการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลง

ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิปกติจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้ามาก เพราะโมเลกุลของไฮโดรเจนและออกซิเจนมีความเสถียรมาก จึงต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นโลหะในตระกูลสูง (Noble metal) เช่น แพลทินัม (Pt) พาลลาเดียม (Pd) เป็นต้น โดยแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์มากที่สุด เนื่องจากแพลทินัม สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีภายใต้สภาวะทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง และทำให้สมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้าเสถียร และมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนได้ดีกว่าโลหะอื่นๆ ในตระกูลเดียวกัน

ขั้วไฟฟ้าที่ดีต้องมีความต้านทานต่ำ (Low resistance) หรือมีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าสูง (High conductivity) ต้องมีส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic pathways) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic pathways) เพื่อช่วยในเรื่องการจัดการน้ำ สำหรับอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องนำอิเล็คตรอน เพื่อเชื่อมโยงกับวงจรไฟฟ้าภายนอก และต้องมีอนุภาคขนาดเล็กเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วไฟฟ้า และช่วยให้การเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเป็นไปด้วยดี

ปกติการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงในเซลล์เคมีไฟฟ้าจะผ่าน 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้ (Appleby and Foulkes, 1989)

- (i) โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่จากชั้นการแพร่ของแก๊ส ไปยังบริเวณผิวหน้าระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและอิเล็กโทรไลต์
- (ii) เกิดการดูดซับของแก๊สบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- (iii) โมเลกุลของแก๊สเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยทางฝั่งแคโทดจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งให้ผลผลิตเป็นไอออนบวกหรือโปรตอนโดยจะเคลื่อนที่ผ่าน อิเล็กโทรไลต์ไปอีกด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้า ซึ่งการเคลื่อนที่ของโปรตอนจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและความหนาของอิเล็กโทรไลต์ และไอออนลบหรืออิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ผ่านวงจรรอบนอกไปอีกด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้า ในส่วนของขั้วไฟฟ้าด้านแคโทดก็จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยแก๊สออกซิเจนที่เข้ามาเกิดปฏิกิริยาโดยรับโปรตอนและอิเล็กตรอนได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นน้ำ

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนที่มีความสำคัญโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเทคนิคในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ และมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีเอเอ็ม (Metha and Cooper, 2003)

2.2.4.2 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current Collector Plate)

แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเป็นส่วนที่คั่นอยู่ระหว่างเซลล์แต่ละเซลล์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบขั้วเดียว (Unipolar plate) โดยแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแต่ละแผ่นทำหน้าที่เป็นขั้วบวกหรือขั้วลบอย่างใดอย่างหนึ่งและอีกประเภทหนึ่งคือ แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และขั้วลบในเวลาเดียวกัน ซึ่งใช้กันมากในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถว (Stack cell) ซึ่งแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเป็นส่วนที่คั่นอยู่ระหว่างเซลล์แต่ละเซลล์ และทำหน้าที่นำกระแส ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่งหรือออกสู่ภายนอก แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้ามีช่อง ทิศทางการไหลของแก๊ส (Gas flow field plate) ซึ่งจะอยู่บริเวณผิวหน้าของแผ่นเพื่อเป็นช่องทางให้แก๊สเคลื่อนที่ผ่านต่อไปยังขั้วอิเล็กโทรด อีกทั้งยังช่วยในการป้องกันการรั่วของแก๊ส ช่วยระบายความร้อน และช่วยการจัดการน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา ช่องทางการไหลของแก๊สจะอยู่บริเวณผิวหน้าของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า โดยรูปแบบของช่องทาง

การไหลจะคำนึงถึงทิศทางและอัตราการไหลที่เหมาะสมกับเซลล์เชื้อเพลิง รูปแบบที่นิยมใช้ เช่น เซอร์เพนไทน์ (Serpentine) แบบขนาน (Parallel) แบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous) และแบบเส้นเวียนก้นหอย (Spiral) เป็นต้น

วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็นแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น แกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน (Non-porous graphite) โลหะ (Metal) และวัสดุคอมโพสิต (Composite material) โดยวัสดุแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน โดยการเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นสะสมกระแสควรคำนึงถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนที่ดีเป็นสำคัญ นอกจากนี้จะพิจารณาถึงความแข็งแรงทนทานต่อแรงกดอัด และปฏิกิริยาเคมี สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและราคาไม่แพง ซึ่งโดยทั่วไปแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าแบบแกรไฟต์ ที่ไม่มีรูพรุนเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากมีการนำไฟฟ้าได้ดี เสถียรภาพทางเคมี และความหนาแน่นต่ำ แต่จะมีข้อเสียคือ การขึ้นรูปยากและราคาแพง (Metha and Cooper, 2003)

2.2.4.3 แผ่นกันรั่ว (Seal)

แผ่นกันรั่วหรือปะเก็นทำขึ้นจากยางซิลิโคนมีหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานแผ่นช่องทางการไหลด้านแอโนดให้ยึดติดกับขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ทำนองเดียวกันยางซิลิโคนก็จะเป็นตัวช่วยประสานแผ่นช่องทางการไหลด้านแคโทดยึดติดกับขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน

ในเซลล์เชื้อเพลิงแถวประกอบด้วยเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวหลายเซลล์ต่อกัน โดยแผ่นทำความเย็นอยู่ระหว่าง เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเป็นช่วงๆ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนอยู่ตรงกลาง โดยมีแผ่นกันรั่วเป็นตัวช่วยประสานประกอบทั้งสองด้านและมีแผ่นช่องทางการไหล ประกอบอีกหนึ่งที่ปลายสุดของเซลล์เชื้อเพลิงแถว จะถูกประกบด้วยแผ่นเก็บกระแสไฟฟ้า (Current collector plate) เป็นแผ่นสุดท้าย

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วอิเล็กโทรด

2.3.1 ตัวรองรับคาร์บอน

เนื่องจากปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ (Heterogeneous catalyst) เป็นการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นที่สัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น ดังนั้นในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์เกาะบนขั้วอิเล็กโทรดนั้น อะตอมหรือไอออนของสารตั้งต้นที่ไม่สัมผัสกับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรงจะไม่มีโอกาสเข้ามาร่วมทำปฏิกิริยา จึงเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่

ไม่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่มีราคาแพง ดังนั้นเพื่อให้มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมีประสิทธิภาพ และคุ้มค่ามากที่สุดจะต้องเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นผิวมากที่สุด และให้สารตั้งต้นมีโอกาสเข้าถึงพื้นที่ที่ใช้เร่งปฏิกิริยา (active surface area) สูงสุด โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดเล็กจะทำให้พื้นที่ผิวสูงขึ้น ถ้าเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่ แต่ก็ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้มีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงอนุภาคเล็กๆ เหล่านี้จะเกิดการหลอมรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้ง่าย อีกทางเลือกที่นิยมทำคือ นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กนั้นไปเคลือบบนวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงคือ ตัวรองรับอีกทีหนึ่งซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากขึ้น มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอีก ทั้งยังลดการเกิดการหลอมรวมตัวกันของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านั้นได้

ในการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ จะต้องพิจารณาถึงตัวรองรับที่ใช้ให้เหมาะสม จึงทำให้ประสิทธิภาพที่ได้ดีที่สุด ตัวรองรับที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีหลายชนิด เช่น ผงคาร์บอน อะลูมินา ซิลิกา เป็นต้น สำหรับในเซลล์เชื้อเพลิงตัวรองรับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในขณะนี้ คือผงคาร์บอน เพราะคาร์บอนมีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าสูง และมีความพรุนสูงซึ่งช่วยในการเคลื่อนที่ของแก๊สเชื้อเพลิง และยังช่วยดูดซับน้ำภายในระบบเพื่อป้องกันการเกิดชั้นฟิล์มของน้ำที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำให้ความต้านทานในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มชั้นตัวรองรับเข้าไปช่วยอิเล็กโทรดมีส่วนทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและทำให้ความหนาของชั้นอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น มีผลให้การแพร่ของเชื้อเพลิงไปยังบริเวณเกิดปฏิกิริยายากยิ่งขึ้น อัตราเกิดปฏิกิริยาช้าลง ดังนั้นการเลือกชนิดและปริมาณของตัวรองรับควรเลือกให้เหมาะสมกับขั้วอิเล็กโทรดที่ต้องการ

2.3.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่นิยมใช้กันคือ แพลทินัม เนื่องจากมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแก๊สออกซิเจน และไฮโดรเจนสูงกว่าโลหะตระกูลสูงชนิดอื่น ๆ เช่น ทอง โรเดียมหรือพาลาเดียม เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อน และทำให้สมรรถนะการทำงานของขั้วอิเล็กโทรดเสถียร นอกจากการใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังมีการใช้โลหะผสมของแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย เพราะโลหะผสมของแพลทินัมบางตัวสามารถทนต่อความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีกว่าแพลทินัมบริสุทธิ์ การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใดนั้นจะต้องคำนึงถึงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (Exchange current density, j_0) ของโลหะที่ใช้ นอกจากนั้นยังต้องพิจารณาถึงการเกาะติดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ นอกจากชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นสำคัญ คือ สมบัติต่าง ๆ ของ

ตัวเร่งปฏิกิริยาอันได้แก่ พื้นที่ผิวในการเกิด ปฏิกิริยา (Active surface area) ขนาดและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด และสมรรถนะการทำงานของขั้วอิเล็กโทรด

2.3.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขนาด พื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยา หากใช้สารละลายที่มีปริมาณของโลหะมากจะทำให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามถ้าหากใช้สารละลายที่มีปริมาณของโลหะน้อยจะทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็ก

2.3.4 คุณสมบัติที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

คุณสมบัติที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้าเพราะว่าในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้านั้น จะมีอนุภาคแพลทินัมบางส่วนที่อยู่ในรูปของแพลทินัมไอออนซึ่งไม่ได้ช่วยในการเร่งปฏิกิริยาของเซลล์ การเผาหรือการรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงจะเป็นตัวช่วยเปลี่ยนรูปของแพลทินัมไอออนให้อยู่ในรูปโลหะแพลทินัม ดังนั้นคุณสมบัติที่ใช้จึงเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความพรุนและขนาดของรูพรุนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วอิเล็กโทรด คือ ถ้าใช้คุณสมบัติสูงเกินไปก็จะมีส่วนทำให้อนุภาคเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว อนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่ และมีความพรุนต่ำ และอาจมีส่วนทำให้สารประกอบบางตัวสลายตัวได้จึงควรใช้คุณสมบัติในการเตรียมต่ำ ขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็ก ความพรุนจะสูง แต่อาจต้องใช้เวลาในการทำงานนานเกินไป การหาคุณสมบัติที่เหมาะสมในการรีดิวซ์นั้นสามารถใช้เครื่อง TPR (Temperature-Programmed Reduction)

นอกจากคุณสมบัติแล้ว ระยะเวลาในการรีดิวซ์และการเผา (Calcinations) ก็มีผลเช่นเดียวกับคุณสมบัติ คือมีผลต่อขนาดรูพรุนและความหนาแน่นที่ทราบกันดีว่าความพรุนมีผลต่อการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในขั้วอิเล็กโทรด ดังนั้นควรพยายามทำให้ขั้วอิเล็กโทรดมีความพรุนที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด (อาทิตย์ กฤษยาสกุล, 2548)

2.3.5 ปริมาณสารละลายเนฟิออน

สารละลายเนฟิออนเป็นส่วนผสมอีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม เนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic activity) โดยเนฟิออนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้การสัมผัสของ 3 เฟสของแก๊สเชื้อเพลิง อิเล็กโตรไลต์ (เนฟิออน) และตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยรักษาความชื้นและป้องกันการสูญเสียน้ำของเมมเบรน ปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญต่อสมรรถนะที่ดีของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากเนฟิออนช่วยในการเคลื่อนที่ของโปรตอน สามารถช่วยลดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ohmic) และค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการถ่ายโอนมวล (Mass transport overpotential) ในอิเล็กโตรดได้ ถ้าปริมาณของเนฟิออนน้อยมากๆ จะส่งผลให้การสัมผัสของอิเล็กโตรไลต์กับตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ดีและส่งผลให้สมรรถนะของขั้วอิเล็กโตรดต่ำ แต่ถ้าปริมาณของเนฟิออนมากเกินไปก็เป็นสาเหตุให้สมรรถนะของขั้วอิเล็กโตรดลดลง เนื่องจากจะเป็นตัวขัดขวางตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา ขัดขวางรูพรุนของขั้วอิเล็กโตรด ลดความสามารถในการซึมผ่านได้ของแก๊ส (Gas permeability) ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินของการถ่ายโอนมวลสูงขึ้น

2.3.6 การสัมผัสกันของตัวเร่งปฏิกิริยากับอิเล็กโตรไลต์ในชั้นปฏิกิริยา

โครงสร้างและองค์ประกอบของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อความต้านทาน การเคลื่อนที่ของแก๊สเชื้อเพลิงและพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึง (Moreira et al., 2004)

- อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องมีขนาดเล็กประมาณ 2 – 4 นาโนเมตร
- คาร์บอนที่ใช้เป็นตัวรองรับจะต้องมีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง
- ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องเข้าไปเกาะบนตัวรองรับได้ง่าย
- ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องสัมผัสกับอนุภาคตัวรองรับใกล้เคียง เพื่อช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าในชั้นปฏิกิริยา
- มีการเชื่อมต่อกันระหว่างชั้นปฏิกิริยากับชั้นอิเล็กโตรไลต์
- มีช่องว่างการไหลของแก๊สไปยังบริเวณตัวเร่งปฏิกิริยาและบริเวณอิเล็กโตรไลต์
- มีเทฟลอนเป็นองค์ประกอบหากชั้นปฏิกิริยาไม่บาง เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของแก๊สและนำน้ำออกจากระบบ

2.3.7 การอัดด้วยความร้อนในการประกอบขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (Hot pressing/assembly of MEA)

โดยทั่วไปขั้วอิเล็กโทรดหรือชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะสร้างขึ้นโดยเทคนิคการอัดพิมพ์ (Decal method) หรือการเคลือบ (Coating) โดยตรงบนเมมเบรนหรือชั้นแก๊สแพร์ โดยอุณหภูมิที่ใช้อัดด้วยความร้อนควรมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้วของเนฟลอนเมมเบรนคือประมาณ 150°C (อุณหภูมิที่เมมเบรนเนฟลอนเริ่มเสื่อมสภาพ) เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะแก้ว เมมเบรนจะมีการแลกเปลี่ยนโปรตอนและการสัมผัสของไอออนกับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างดี และที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียสจะทำให้เมมเบรนสูญเสียสมบัติในการรักษา น้ำ (Water retention) ทำให้มีความเป็นกรดมากขึ้น ส่งผลให้ไอออนมีสมบัติแย่งและทำให้ขั้วอิเล็กโทรดแยกออกจากเมมเบรน ดังนั้นการอัดด้วยความร้อนโดยทั่วไปจะใช้เวลาในช่วง $5000 - 15000$ กิโลปาสคาล อุณหภูมิ $120 - 160$ องศาเซลเซียส และเวลา ประมาณ $1 - 5$ นาที ในการอัดขั้วอิเล็กโทรดบนเมมเบรนต้องแน่ใจว่าขั้วอิเล็กโทรดยึดติดกับเมมเบรนอย่างแข็งแรง และเพื่อป้องกันไม่ให้เมมเบรนแห้งเกินไปขณะอัดด้วยความร้อน จึงมีกระบวนการที่เรียกว่า การอัดด้วยไอน้ำ (Steam pressing) โดยการนำเมมเบรนจุ่มในน้ำและทำการป้องกันไม่ให้น้ำไหลออก จากนั้นนำไปอัดด้วยความร้อนที่ความดันไอน้ำ

2.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรด

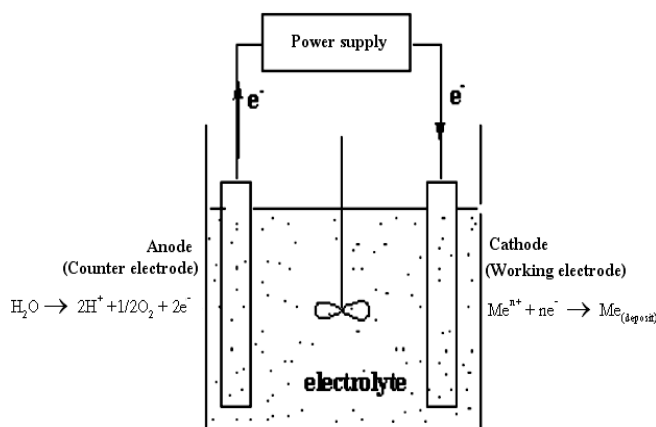
การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้วไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการสเปรย์ (Spray) วิธีการพิมพ์หรือการระบาย (Painting or Brushing) วิธีการพอกพูนโลหะโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless deposition) และวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีการเตรียมและองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป โดยลักษณะการเตรียมและองค์ประกอบของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมจะมีผลต่อคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ได้ เช่น ความหนา ความพรุน การนำไฟฟ้าและความต้านทาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า โดยในที่นี้จะขอกกล่าวถึงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.4.1 การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition)

วิธีการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าอาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า คือการทำให้โลหะไปเกาะบนผิวหน้าชั้นงานที่ต้องการ ในที่นี้คือขั้วอิเล็กโทรด(กระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอน) ชั้นตอน

การพอกพูนเริ่มจากจุ่มขั้วอิเล็กโทรด ลงในสารละลายที่มีไอออนของโลหะที่ต้องการให้เกิดการพอกพูน จากนั้นป้อนกระแสไฟฟ้าให้ชิ้นงานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็นชั้นโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพอกพูนบนผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรด โดยโลหะที่ต้องการพอกพูนควรจับบนขั้วอิเล็กโทรดได้แน่น เรียบ สม่ำเสมอ ขั้นตอนการเตรียมแสดงดังรูปที่ 2.6 จากนั้นจึงนำไปล้างให้ปราศจากไอออนต่างๆ แล้วทำให้แห้ง และชั่งน้ำหนัก

ซึ่งข้อดีของการเตรียมด้วยวิธีการนี้คือทำได้ง่าย อนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่ขึ้นกับรูปร่างของพื้นผิวที่ใช้เป็นตัวรองรับและมีความแข็งแรงในการยึดติด อีกทั้งสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของโลหะที่จะถูกพอกพูนลงไปได้ง่ายโดยการปรับเวลา ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการพอกพูน



รูปที่ 2.6 การต่อเซลล์ไฟฟ้าสำหรับการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

(Rao and Trivedi, 2005)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มนั้น นิยมใช้สารละลายของโลหะแพลทินัมเพื่อให้เกิดการพอกพูนของโลหะแพลทินัมบนกระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอน การต่อเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า สารอิเล็กโทรไลต์คือสารละลายของโลหะที่ต้องการให้พอกพูน ขั้วแอโนดนิยมใช้ตาข่ายแพลทินัม (Pt gauze) และขั้วแคโทดคือชิ้นงาน (เช่น กระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอน) ซึ่งเป็นส่วนที่จะมีการพอกพูนของโลหะเกิดขึ้นบนผิวหน้า โดยมีการต่อเซลล์เข้ากับเครื่องให้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ให้กระแสในกระบวนการพอกพูน

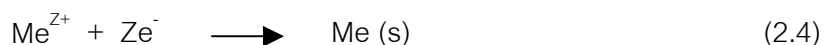
ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูน ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการพอกพูน โดยทั่วไปพลังงานศักย์ที่ให้แก่เซลล์ไม่ควรมาก จนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามากเกินไป จึงเหมือนเป็นการเร่งการพอกพูนของสารทำให้การพอกพูนของสารไม่เรียบ เนื่องจากการพอกพูนในรูปแบบการควบคุมโดยการถ่ายเทมวลสารของโลหะไอออนมายังผิวอิเล็กโทรด

ที่เกิดการพอกพูน การที่ไอออนในสารละลายมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลาด้วยแรงกวนสารละลาย หรือการหมุนของขั้วอิเล็กโทรด มีส่วนช่วยให้การพอกพูนของสารเป็นไปได้ดี สม่าเสมอ เนื่องจากการเคลื่อนไหวของสารละลายมีส่วนช่วยในการนำพาของโลหะที่ต้องการพอกพูนไปยังขั้วอิเล็กโทรด สาเหตุหนึ่งของการทำให้การพอกพูนของสารไม่เรียบ หลุดง่าย เพราะเกิดแก๊สขึ้นระหว่างการพอกพูน การเกิดรีดักชันให้แก๊สไฮโดรเจนในระหว่างการพอกพูน แม้ฟองแก๊สทำให้เกิดการพาไอออนดีขึ้นแต่ขณะเดียวกันก็สกัดกั้นการพอกพูนของสารบนขั้วอิเล็กโทรด

- ทฤษฎีพื้นฐานของการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Samuel, 1949; Bard and Faulker, 1980; Sawyer et al., 1995)

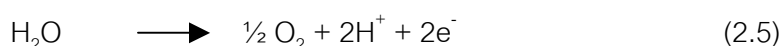
หลักการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการเคมีไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลติก คือ กระบวนการที่เปลี่ยนแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่แต่ละด้านของอิเล็กโทรด

ระหว่างการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปผ่านขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของไอออนที่แต่ละขั้ว โดยไอออนที่ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดส์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นโลหะเกาะที่ขั้วแคโทดดังสมการที่ (2.4)



โดยที่ Me คือ โลหะ และ Z คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ร่วมในการเกิดปฏิกิริยา

เรียกขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันหรือขั้วลบว่า “ขั้วแคโทด (cathode)” โมเลกุลหรือไอออนของสารรีดิวซ์ในสารละลายจะเกิดออกซิไดส์ ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนออกสู่ระบบที่ขั้วแอโนดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดระหว่างการพอกพูนโลหะ ด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งโดยปกติจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเกิดเป็นแก๊สออกซิเจนที่ขั้วอิเล็กโทรดอีกด้านแสดงดังสมการที่ (2.5)



เรียกขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือขั้วบวกว่า “ขั้วแอโนด (anode)” ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ จากขั้วแอโนดผ่านสายไฟของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกสู่ขั้วแคโทด

2.4.2 การเตรียมพื้นผิวขั้วไฟฟ้าก่อนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

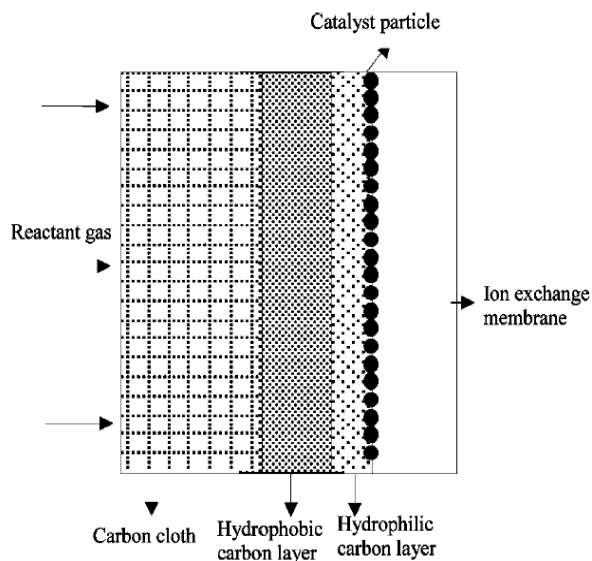
พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการพอกพูนนั้นควรมีความหนาและเรียบสม่ำเสมอ เนื่องจากมีความสำคัญต่อการกระจายตัวของอนุภาคโลหะที่จะยึดเกาะบนผิวหน้า สำหรับพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการพอกพูนด้วยไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มนั้นประกอบด้วยชั้นที่มีสมบัติชอบน้ำ และชั้นที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Kim and Popov, 2004) ดังต่อไปนี้

- ชั้นที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Layer)

เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำประกอบด้วยผงคาร์บอน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา และช่วยในการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาและส่วนของพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงช่วยป้องกันไม่ให้น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงท่วมเซลล์ ปริมาณของผงคาร์บอนที่ใช้ไม่ควรมากเกินไปเพราะ จะทำให้ขั้วไฟฟ้ามีความหนามากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าสูงขึ้นได้

- ชั้นที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic layer)

เป็นส่วนที่ชอบน้ำประกอบด้วยสารละลายเนฟิออน มีหน้าที่ช่วยให้โปรตอน เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเข้าทำปฏิกิริยารีดักชันที่ฝั่งแอโนด โดยในการเตรียมพื้นผิวจะมีการทาสารละลายเนฟิออนไว้บนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าคาร์บอนก่อนที่จะทำการพอกพูน เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผงคาร์บอน อนุภาคโลหะและเนฟิออน (Three phase region) เมื่อเริ่มการพอกพูนไอออนโลหะของสารละลายจะแพร่ผ่านชั้นเนฟิออนเข้าไปยึดเกาะบนผิวของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนซึ่งลักษณะชั้นของขั้วไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นในการเตรียมพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าปริมาณเนฟิออนที่ใช้ควรมีความเหมาะสม ไม่มากเกินไปเพราะจะทำให้การแพร่ผ่านของไอออนโลหะเกิดได้ยากและยังเป็นการเพิ่มความหนาของขั้วไฟฟ้าอีกด้วย แต่ก็ไม่ควรน้อยเกินไปเพราะจะทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนและพื้นที่ผิวที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลง (Taylor et al., 1992)



รูปที่ 2.7 ภาพจำลองลักษณะชั้นต่างๆ ของขั้วไฟฟ้า (Kim and Popov, 2004)

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ได้แก่

2.4.3.1 รูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการพอกพูน

การพอกพูนโดยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าระหว่างการเกิดปฏิกิริยา โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมเนื่องจากควบคุมได้ง่ายแต่มีข้อเสียคือ เมื่อสมบัติของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงอื่นได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง ส่วนการควบคุมศักย์ไฟฟ้าจะใช้เมื่อต้องการให้เกิดปฏิกิริยาใดปฏิกิริยาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งการควบคุมต้องใช้เครื่องเฉพาะที่เป็นการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการพอกพูนโดยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งการควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถทำได้หลายรูปแบบ

- การให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ (Direct current electrodeposition, DC)
- การให้กระแสแบบเป็นช่วงๆ (Pulse current electrodeposition, PC)
- การให้กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงๆ แบบตรงข้าม (Pulse reverse electrodeposition)
- การให้กระแสไฟฟ้าแบบเป็นคลื่น (Sinusoidal pulse current electrodeposition)

2.4.3.2 การเคลื่อนที่ของสารละลาย

การที่ไอออนโลหะในสารละลายมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลาด้วยแรงกวนสารละลายหรือการหมุนของขั้วไฟฟ้า มีส่วนช่วยให้การพอกพูนของสารเป็นไปได้ดีและสม่ำเสมอ เนื่องจากมีการถ่ายเทมวลสารของไอออนโลหะจากสารละลายไปยังผิวของอิเล็กโทรด ทำให้มีการพอกพูนโลหะดีขึ้น

2.4.3.3 อุณหภูมิในสารละลาย

การเพิ่มอุณหภูมิในสารละลายในระหว่างการพอกพูน มีส่วนช่วยในการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลาย เร่งการพอกพูนสารที่ขั้วไฟฟ้า แต่ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะและภาวะในการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายนั้นๆ ด้วย

2.4.3.4 การเกิดแก๊สระหว่างการพอกพูน

สาเหตุหนึ่งของการทำให้การพอกพูนสารไม่เรียบและหลุดง่าย อาจเนื่องมาจากแก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างการพอกพูน โดยที่ฝั่งแคโทดจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของการเกิดแก๊สไฮโดรเจนคู่กับปฏิกิริยาการพอกพูนของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ดังสมการ (2.6)



ซึ่งอาจส่งผลต่อการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าจึงส่งผลให้การเกาะตัวของสารไม่เรียบและหลุดออกได้ง่าย

2.5 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (Performance)

การศึกษาศมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถศึกษาได้จากโพลาริเซชัน

- โพลาริเซชัน (Polarization)

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงอธิบายได้จากกราฟโพลาริเซชันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่อ

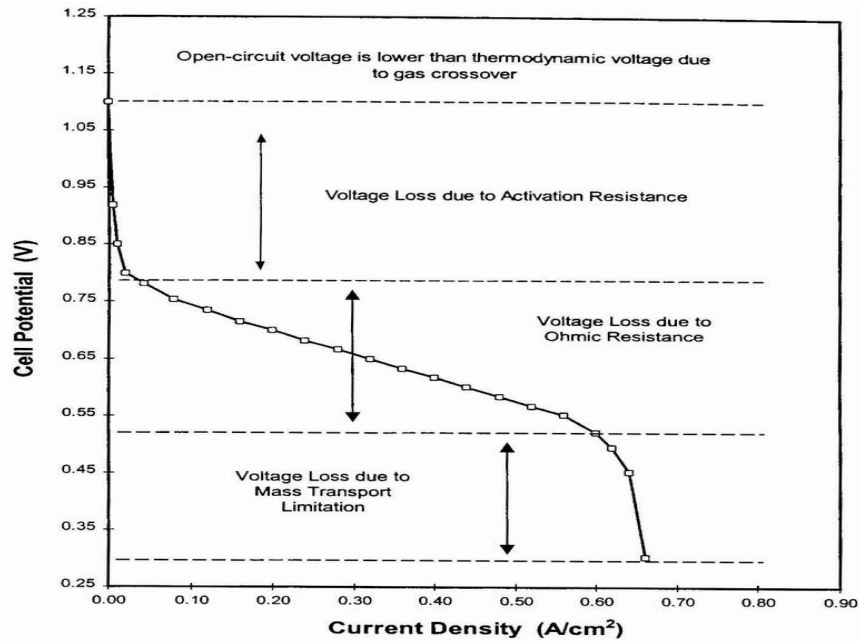
เข้ากับวงจรมานอกและมีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงให้กับเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ แต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าที่ลดลงไม่เท่ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี หรือที่ได้จากกระบวนการผันกลับได้ (Reversible process) ซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจนจะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎีประมาณ 1.299 โวลต์ ซึ่งผลต่างระหว่างค่าความต่างศักย์จริงที่จ่ายให้กับวงจรมานอกกับค่าความต่างศักย์ตามกระบวนการผันกลับได้ตามหลักของอุณหพลศาสตร์ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Overpotential) การลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงเกิดในกระบวนการที่เรียกว่า โพลาริเซชัน โดยการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.7)

$$E_{cell} = E_{cell}^o - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (2.7)$$

โดยที่ E_{cell}^o	คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (โวลต์)
η_{act}	คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากการสูญเสียเชิงแอคติเวชัน (โวลต์) เนื่องจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา หรือสูญเสียพลังงานก่อกัมมันต์
η_{ohm}	คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)
η_{conc}	คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากการถ่ายเทมวลสาร (โวลต์)

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง มาเขียนกราฟโพลาริเซชันจะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 2.8

ซึ่งจากรูปที่ 2.8 พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ เรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open-circuit potential) โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี ซึ่งความแตกต่างนี้เกิดจากการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (Crossover) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเมมเบรน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งหนึ่งจะมีการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนทางฝั่งขั้วแคโทด จึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันภายในขั้วแคโทดเดียวกัน ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าภายใน (Internal current) ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินขึ้นที่ขั้วแคโทด เช่นเดียวกันกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของแก๊สออกซิเจน ก็จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง



รูปที่ 2.8 โพล่าไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล (Wood et al., 1998)

เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.8 พบว่าเกิดการลดลงของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากกลไกต่างๆ โดยเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพล่าไรเซชันได้เป็น 3 ช่วงคือ

1. โพล่าไรเซชันทางเคมี (Activation Polarization) (η_{act}) เป็นค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงไปเนื่องมาจากการเอาชนะพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และความดัน ถ้าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะเกิดโพล่าไรเซชันทางเคมีมาก การลดค่าโพล่าไรเซชันทางเคมีสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง การเพิ่มความดัน เป็นต้น

2. โพล่าไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization) (η_{ohm}) เกิดจากความต้านทานในแต่ละองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดและที่บริเวณแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเมมเบรน และบริเวณจุดเชื่อมต่อกันต่างๆ ในการประกอบเซลล์ เป็นต้น

3. โพล่าไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization) (η_{conc}) เกิดเนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดส์ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วจนไม่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรด ทำให้ความเข้มข้นหรือความดันของสารตั้งต้นขาดแคลน เป็นผลทำให้ศักย์

ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนินสต์ด้านแคโทด ในกรณีที่ใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์มักจะไม่มีปัญหา
นี้เกิดขึ้น แต่เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์จะเกิดปัญหานี้ขึ้นเนื่องจากในอากาศมีความเข้มข้น
ของออกซิเจนน้อยกว่ามาก ดังนั้นเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์จำเป็นจะต้องมีการออกแบบ
ช่องทางเดินแก๊สให้อากาศสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ เพื่อให้
ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศสามารถแพร่เข้าไปยังบริเวณขั้วอิเล็กโทรดให้มากที่สุด ทางด้านแอโนด
ไฮโดรเจนก็มีโอกาสที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้เช่นกัน ซึ่งอาจเกิดจากกรณีที่
ไฮโดรเจนถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในอัตราที่เร็วจนไฮโดรเจนที่ถูกป้อนเข้ามาไม่
สามารถเข้าไปทดแทนในส่วนที่ใช้ไปในปฏิกิริยาได้ทัน จนทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนบริเวณ
ผิวขั้วอิเล็กโทรดลดลง ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินมากขึ้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang และ Shi (2006) ศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และความชอบน้ำ (hydrophilic) ของขั้วไฟฟ้าซึ่งส่งผลกระทบต่อการส่งผ่านโปรตอนและแก๊ส โดยศึกษาสมบัติขององค์
ประกอบในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ PTFE และเนฟลอนด้านแคโทดซึ่งประกอบด้วยชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา
2 ชั้นคือ ชั้นที่ชอบน้ำ และชั้นที่ไม่ชอบน้ำ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ ทำการเปลี่ยนแปลง
องค์ประกอบในชั้นที่ชอบน้ำ และอีกกลุ่มทำการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในชั้นที่ไม่ชอบน้ำ
โดยมีปริมาณแพลทินัมรวม 0.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ผลของ
ปริมาณเนฟลอนต่อสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าสมรรถนะของเซลล์จะเพิ่มจาก 0.56 วัตต์ต่อตา
วรางเซนติเมตรเป็น 0.59 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรเมื่อปริมาณเนฟลอนในชั้นที่ชอบน้ำเพิ่มจากร้อย
ละ 35 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก และเมื่อปริมาณเนฟลอนในชั้นที่ไม่ชอบน้ำลดลง
จาก 0.3 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรเป็น 0 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่น
กำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก 0.64 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรเป็น 0.77 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความดัน
บรรยากาศ

Sasikumar และคณะ (2004) ศึกษาว่าในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (PEMFC) เนฟลอนไม่ใช่
เป็นเพียงเมมเบรนที่อยู่ระหว่างขั้วแอโนด และขั้วแคโทด แต่ยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญต่อชั้นที่
ว่องไวในขั้วไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อการแพร่ผ่านของแก๊ส โดยปริมาณของเนฟลอนในขั้วไฟฟ้ามีผลต่อการ
ซึมผ่านของแก๊ส ตลอดจนความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา และความต้านทานไอออน ดังนั้น
ปริมาณเนฟลอนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงจำเป็นสำหรับสมรรถนะที่ดีของพีอีเอ็ม ซึ่งงาน
วิจัยนี้พบว่าปริมาณเนฟลอนที่เหมาะสมขึ้นกับปริมาณแพลทินัม โดยขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณ
แพลทินัมที่ 0.5, 0.25 และ 0.1 มิลลิกรัมแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร จะได้สมรรถนะสูงสุดเมื่อมี

ปริมาณเนฟลอนต่างกันที่ร้อยละ 20, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังพบว่าปริมาณเนฟลอนที่เหมาะสมไม่ขึ้นกับความหนาของเมมเบรน

Choi และคณะ (1998) ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับพีอีเอ็ม ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยการให้กระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วงๆ เทียบกับการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจะถูกพอกพูนที่อุณหภูมิห้องโดยใช้สารละลาย $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เข้มข้น 18 mM บนผ้าคาร์บอนที่ผ่านการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง โดยมีตาข่ายแพลทินัมเป็นขั้วแอโนด และผ้าคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด สำหรับการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ ค่าความหนาแน่นกระแสในการพอกพูนที่เหมาะสมคือที่ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะให้สมรรถนะที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาจากขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวขณะการพอกพูน ในขณะที่การให้กระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วงๆ ค่าความหนาแน่นกระแสในการพอกพูนที่ 50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะได้กระแสสูงสุด (peak current, i_p) คือ 320 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์ โดยการใช้ช่วงเวลาในการให้กระแสไฟฟ้า (on-time) เท่ากับ 100 มิลลิวินาที และหยุดให้กระแสไฟฟ้า (off-time) เท่ากับ 300 ms ซึ่งยังได้สมรรถนะที่สูงกว่าการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ในสภาวะเดียวกัน

Kim และคณะ (2004) ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยการให้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่องที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เทียบกับการให้กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงๆ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ช่วงเวลาในการให้กระแสไฟฟ้า 5.2 มิลลิวินาที หยุดให้กระแสไฟฟ้า 70 มิลลิวินาที และให้ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าของทั้งสองวิธีเท่ากันที่ 6 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ผลจากการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการให้กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงๆ ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการเตรียมด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง ซึ่งความแตกต่างนี้เป็นผลเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัมที่พอกพูน โดยการวิเคราะห์ภาพจาก SEM แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัมที่เตรียมด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่องมีขนาดใหญ่กว่า จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีน้อยกว่าการให้กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงๆ

Thompson และคณะ (2001) ศึกษาการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ซึ่งใช้วิธีการ Ion-exchange / electroreduction ในการเตรียมเพื่อให้มีการสัมผัสกันทั้ง 3 ส่วนมากขึ้นคือในส่วนของเชื้อเพลิง ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (Pt) และเนฟลอนเมมเบรน (Nafion membrane) โดยการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะใช้ปริมาณเนฟลอนที่แตกต่างกันคือ 15, 20 และ 29 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) พบว่ามีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมเท่ากับ 55, 36 และ 19 ($\text{m}^2\text{Ptg}^{-1}$) ตามลำดับ โดยคำนวณจาก Electrochemical surface area (ESA) ซึ่งแสดงว่าปริมาณ

เนฟิออนมีผลต่อขนาดของแพลทินัมที่พอกพูนโดยเห็นได้จากขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณเนฟิออนต่ำจะไปจำกัดการโตของขนาดอนุภาคแพลทินัม ส่งผลให้แพลทินัมมีพื้นที่ผิวที่สูงกว่าการใช้เนฟิออนในปริมาณมาก และปริมาณแพลทินัมที่พอกพูนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งในการทำ Ion-exchange / electroreduction ซึ่งถ้าหากจำนวนครั้งในการทำมากเกินไปจะส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลงเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคแพลทินัมเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น

Wei และคณะ (2005) ทำการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบน rotation disk electrode (RDE) ของ glass carbon (GC) ซึ่งเป็นชั้นของเนฟิออนกับคาร์บอน พบว่าการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมควรจะควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่า -0.20 โวลต์ เทียบกับ SSCE (saturated-potassium-chloride silver chloride electrode) เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้าสูงจะมีการเกิดไฮโดรเจน และมีการสร้างอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดใหญ่ โดยพบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนจะขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการพอกพูน แต่การใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงในการพอกพูนไม่เหมาะสมเนื่องจากที่กระแสสูงจะถูกใช้ในการผลิตไฮโดรเจน แต่การที่มีไฮออนแพลทินัมในสารละลายมากขึ้นจะช่วยลดฟองแก๊สไฮโดรเจนบน working electrode ได้ และจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค Cyclic Voltammograms (CV) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ในสารละลาย $0.5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ ก่อนและหลังการพอกพูนพบว่าสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณ $50 \mu\text{g Pt/cm}^2$ ดีกว่าขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณ $100 \mu\text{g Pt/cm}^2$

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 แก๊ส

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

3.1.2 สารเคมีและครุภัณฑ์

ชื่อสารเคมี/ครุภัณฑ์	บริษัท
กรดเฮกซะคลอโรแพลทินิก ($H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$)	Fluka
สารละลายเนฟิออน (5%wt. Nafion 117)	Fluka
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 30%W/V.)	Fluka
กรดซัลฟูริก (H_2SO_4 98%W/V.)	Fluka
ไอโซโพรพานอล (Isopropanol)	Fluka
กลีเซอรอล (Glycerol)	Fluka
โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (60%wt. Polytetrafluoroethylene, PTFE)	Aldrich
ผงคาร์บอน (Vulcan XC-72)	Cabot
ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth)	Electrochem, Inc.
เนฟิออนเมมเบรน (Nafion 115 membrane)	Electrochem, Inc.
ขั้วไฟฟ้าทางการค้า (Commercial electrode Pt/C 10%wt. 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอน)	Electrochem, Inc.

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

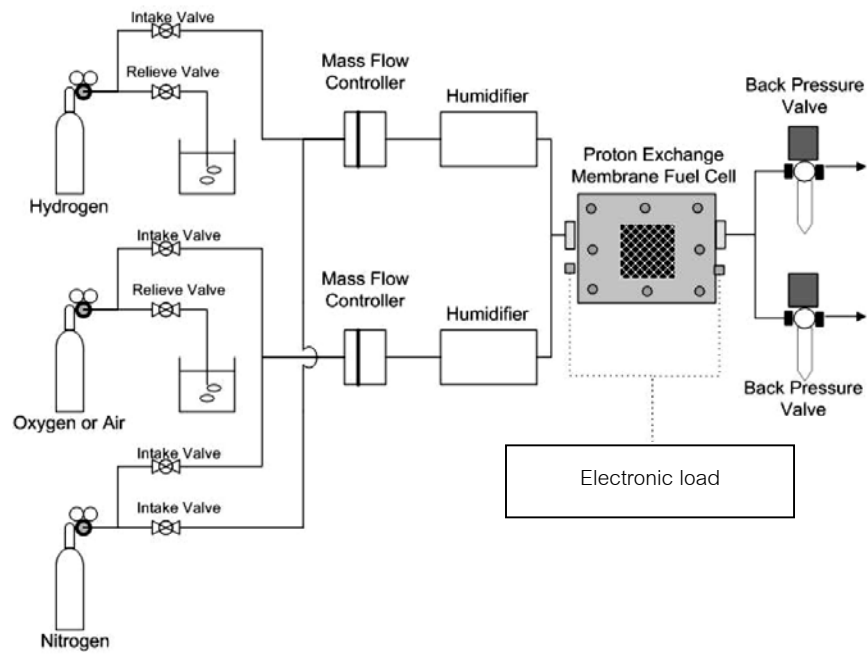
- ตู้อบไฟฟ้า (Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น F115
- เตาเผา (Muffle Furnace) ยี่ห้อ PHOENIK รุ่น 2
- เครื่องชั่งสารความละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Satorius รุ่น 1712
- ไมโครปิเปต (Micro pipett) ยี่ห้อ Labnet รุ่น BP10/0.5-10 µl
- โถดูดความชื้น (Descicator)
- อ่างอัลตราโซนิค (Ultrasonics bath) ยี่ห้อ CREST รุ่น 575DAE
- เครื่องอ่างน้ำ (Water bath) ยี่ห้อ Heto รุ่น SBD-50
- แผ่นกวน (Stirrer plate) ยี่ห้อ Nuova II
- เครื่องกดอัดด้วยความร้อน (Compression Mould) ยี่ห้อ LABTECH รุ่น LP20
- ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) บริษัท Radiometer Analytical S.A.
- ตาข่ายไทเทเนียม (Ti gauze)
- ชุดถ้วยแก้วสำหรับประกอบเซลล์เพื่อใช้ในการพอกพูนด้วยไฟฟ้า
- เครื่องแก้วอื่นๆ ในห้องปฏิบัติการ

3.3 ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เดี่ยว

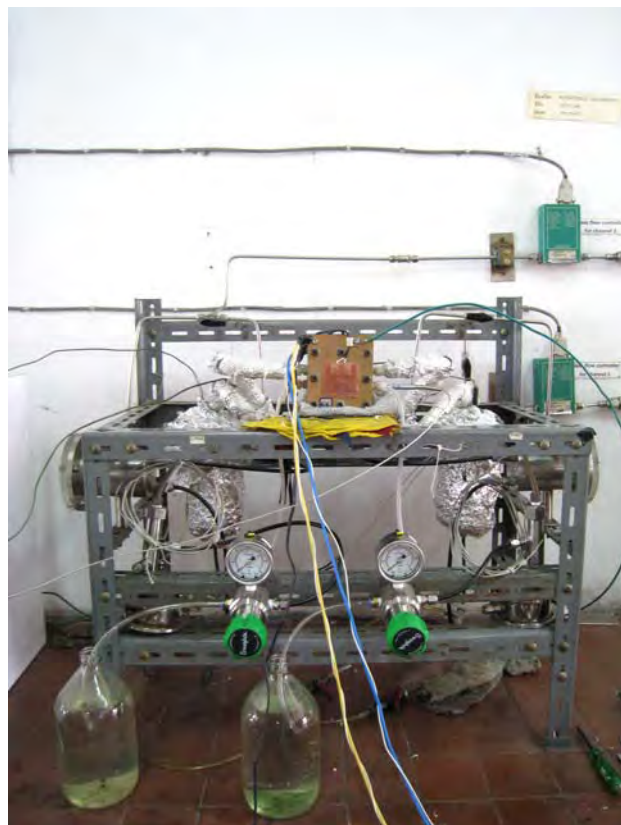
ระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มสำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

- เซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว (PEM single cell) จากบริษัท Electrochem, Inc.
- ระบบการไหลของแก๊ส (Gas flow system)
- หน่วยควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)
- หน่วยให้ความชื้นกับแก๊ส (Humidifier)
- หน่วยควบคุมความดันแก๊ส (Back pressure) และ
- เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งได้แก่ เครื่อง Electronic load รุ่น PLZ-3OF ของบริษัท KIKUSUI

ซึ่งควบคุมการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเซลล์เดี่ยว



รูปที่ 3.2 ระบบทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเซลล์เดี่ยว

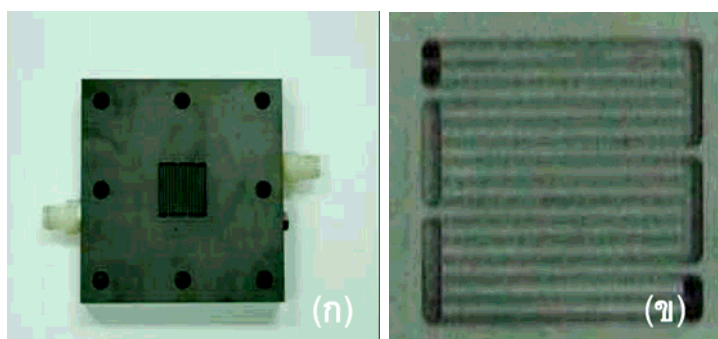
3.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์แบบเซลล์เดี่ยว (PEM single cell)

เซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเซลล์เชื้อเพลิงของบริษัท Electrochem, Inc. จากประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น FC05-01SP-REF ขนาดพื้นที่ 5 ตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 สำหรับใส่เอเอ็มอีเอเพื่อทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.3 เซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์เซลล์แบบเซลล์เดี่ยว (PEM single cell) ของบริษัท Electrochem, Inc.

ภายในมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าและการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิง (Flow field plate) ซึ่งทำจากแกรไฟต์ และมีช่องทางการไหลของแก๊สแบบ Serpentine อยู่บริเวณหัวไฟฟ้า ลักษณะการไหลของช่องทางการไหลของแก๊ส แสดงดังรูปที่ 3.4 ภายนอกมีข้อต่อเทฟลอน (Teflon) เพื่อเป็นข้อต่อแก๊สขาเข้า และขาออกซึ่งมีหัวต่อสำหรับใช้วัดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ได้ พร้อมช่องใส่เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อใช้วัดอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง และด้านนอกจะมีแผ่นโลหะประกบอีกชั้นหนึ่ง โดยมีแผ่นให้ความร้อนติดอยู่ทั้งสองข้าง เพื่อทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแผ่นให้ความร้อนจะต่อกับส่วนควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.4 (ก) แผ่นสะสมกระแสและการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิง;
(ข) ช่องทางการไหลของแก๊ส แบบ Serpentine

3.3.2 ระบบการไหลของแก๊ส (Gas flow system)

ระบบการไหลของแก๊สจากรูปที่ 3.1 มีส่วนประกอบดังนี้

- (i) ถังแก๊ส ซึ่งประกอบด้วย
- แก๊สไฮโดรเจน ใช้เป็นเชื้อเพลิงด้านแอนโนด
 - แก๊สออกซิเจน ใช้เป็นเชื้อเพลิงด้านแคโทด
 - แก๊สไนโตรเจน ใช้ในการไล่แก๊ส (purge)

ในระบบแก๊สทุกถังจะติดตั้งเครื่องควบคุมความดันแก๊ส (Pressure Regulator) การปรับความดันโดยหมุนตัวปรับความดันทวนเข็มนาฬิกา เพื่อลดความดัน และหมุนตามเข็มนาฬิกาเพื่อเพิ่มความดันของแก๊ส

- (ii) เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Mass flow controller) ของบริษัท MKS Instrument รุ่น MKS Type M100B จากประเทศสหรัฐอเมริกา โดยจะติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สไว้ถัดจากวาล์วขาเข้า มี 2 เครื่องสำหรับแก๊สขาเข้าทางด้านแอนโนดและแคโทด ตั้งค่าและอ่านค่าอัตราการไหลจากเครื่องวัดอัตราการไหลแบบ 4 ช่องควบคุม รุ่น MKS Type 247D Four-Channel Readout
- (iii) ชุดวาล์วขาเข้า (Intake valve) และวาล์วขาออก (Relieve valve) ซึ่งอยู่ในตำแหน่งระหว่างถังแก๊สกับเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยวาล์วขาเข้ามีหน้าที่ป้องกันการไหลย้อนกลับของแก๊ส ในกรณีที่ความดันในระบบมากกว่าภายในถังแก๊ส และช่วยป้องกันการปะปนกันของแก๊ส และวาล์วขาออกมีหน้าที่ช่วยลดความดันภายในท่อ ระหว่างถังแก๊สกับเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

3.3.3 หน่วยควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)

หน่วยควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายไฟให้ตัวทำความร้อนใน 3 ส่วนได้แก่ที่ เซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็มแบบเซลล์เดี่ยว และส่วนให้ความชื้นกับแก๊สทั้ง 2 ก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง

3.3.4 หน่วยให้ความชื้นกับแก๊ส (Humidifier)

หน่วยให้ความชื้นกับแก๊ส ทำหน้าที่เพิ่มความชื้นให้แก๊สก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็ม

3.3.5 หน่วยควบคุมความดันแก๊ส (Back pressure)

หน่วยควบคุมความดันแก๊ส ทำหน้าที่ในการปรับความดันของแก๊สภายในระบบ เพื่อควบคุมให้ความดันของแก๊สเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดภายในเซลล์ให้มีความเท่ากัน

3.3.6 เครื่อง Electronic load

เครื่อง Electronic load รุ่น PLZ-30F ของบริษัท KIKUSUI แสดงดังรูปที่ 3.5 ใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.5 เครื่อง Electronic load รุ่น PLZ-30F ของบริษัท KIKUSUI

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- X-Ray Diffractometer (XRD) บริษัท Bruker AXS รุ่น D8 Discover ที่ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Scanning Electron Microscope (SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6400 ที่ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- Transmission Electron Microscope (TEM) บริษัท JEOL รุ่น JEM-2100 ที่ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Potentiostat/Galvanostat บริษัท Autolab รุ่น PGSTAT30 ที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Electronic load บริษัท KIKUSUI รุ่น PLZ-30F ที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 ตัวแปรที่ศึกษา

1. องค์ประกอบและสัดส่วนที่เหมาะสมของชั้นที่ชอบน้ำ สำหรับการนำไปเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า
2. องค์ประกอบที่เหมาะสมในชั้นที่ไม่ชอบน้ำ โดยศึกษาสัดส่วนระหว่างปริมาณ PTFE กับผงคาร์บอน สำหรับการนำไปเตรียมชั้นที่ชอบน้ำต่อไป
3. ความแตกต่างของเทคนิคการเตรียมชั้นย่อย (Sublayer) โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการทำ (Painting) กับการสเปรย์ (Spraying)

3.6 วิธีดำเนินการวิจัย

3.6.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอน (Uncatalyst Carbon Electrode)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเตรียมพื้นผิวของผ้าคาร์บอน ให้มีความเหมาะสมก่อนจะนำไปเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนนี้จะแบ่งออกเป็นสองชั้นคือ ชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer) และชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer) ซึ่งทั้งสองชั้นนี้นอกจากจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แล้วยังมีผลต่อขั้นตอนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้อีกด้วย

3.6.1.1 ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Layer)

ชั้นนี้จะมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ โดยองค์ประกอบของสารเคมีในชั้นนี้ก็ควรจะมีสมบัติที่เหมือนกัน ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในการจัดการน้ำ (Water management) ป้องกันไม่ให้น้ำที่เกิดจาก

ปฏิกิริยาเข้าท่อมเซลล์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบในชั้นที่ไม่ชอบน้ำ และเปรียบเทียบวิธีการเตรียมคือ การทา และการสเปรย์ โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. อบผงคาร์บอน (Vulcan XC-72) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน เมื่ออบเสร็จแล้วเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อรอการใช้งาน
2. ตัดผ้าคาร์บอนให้มีขนาดกว้าง-ยาว ด้านละ 2.25 เซนติเมตร นำไปแช่ในอะซีโตน (Acetone) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำความสะอาดพื้นผิว
3. ทำการผสมสารโดยปิเปตน้ำปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วตัวอย่างที่มีฝาปิด
4. ใช้ไมโครปิเปต ปิเปตสารละลายพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน เข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (มีสมบัติไม่ชอบน้ำ) ลงในขวดตัวอย่าง ตามปริมาตรที่คำนวณต่อสัดส่วนที่ต้องการ
5. นำขวดตัวอย่างใส่อ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
6. ปิเปตไอโซโพรพานอลปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดตัวอย่าง รีบปิดฝาอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการระเหยของไอโซโพรพานอล
7. นำขวดตัวอย่างใส่อ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
8. ชั่งผงคาร์บอน (Vulcan XC-72 ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปนแล้ว จากข้อ 1) ลงในขวดตัวอย่าง ตามน้ำหนักที่คำนวณต่อสัดส่วนที่ต้องการ
9. นำขวดตัวอย่างใส่อ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายและผงคาร์บอนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
10. ชั่งน้ำหนักผ้าคาร์บอนก่อนการทาสารละลาย
11. ใช้ฟู่กันจุ่มสารละลายในขวดตัวอย่างแล้วทาลงบนผ้าคาร์บอนที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว ทิ้งให้แห้งแล้วจึงทาล้ำทำเช่นนี้จนได้น้ำหนักที่ต้องการ
12. ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานที่เตรียมได้ เพื่อคำนวณหาปริมาณของชั้นที่ไม่ชอบน้ำว่าได้ปริมาณตามที่ต้องการหรือไม่
13. เมื่อได้น้ำหนักที่ต้องการแล้ว นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่เจือปนให้หมด
14. เก็บชิ้นงานในโถดูดความชื้นเพื่อรอการนำไปเตรียมชั้นที่ชอบน้ำต่อไป

3.6.1.2 ชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Layer)

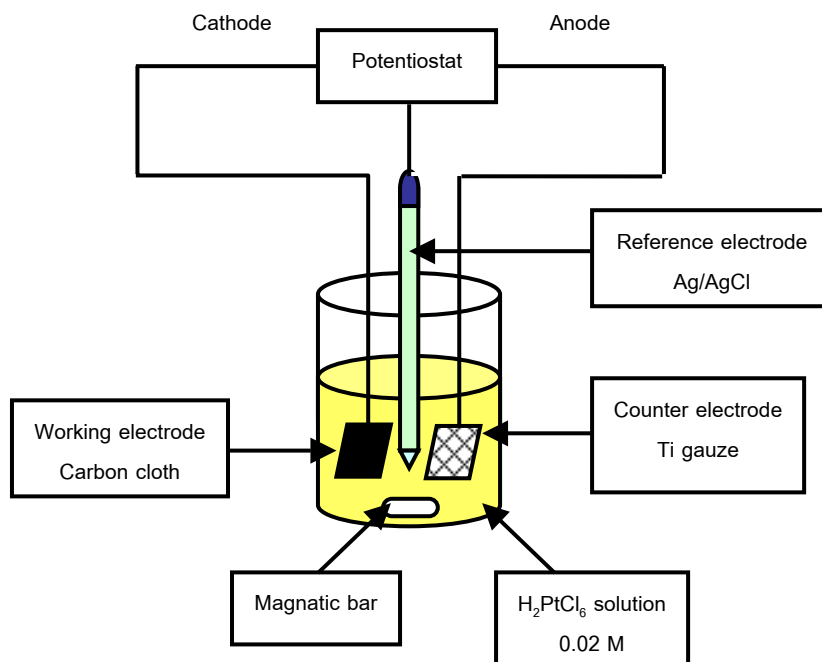
สารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในชั้นนี้จะมีสมบัติที่ชอบน้ำ ซึ่งมีหน้าที่ช่วยให้เมมเบรนมีความชื้นที่เพียงพอเพื่อให้โปรตอนเคลื่อนที่เข้าทำปฏิกิริยา โดยปริมาณของชั้นที่ชอบน้ำนี้จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์ เนื่องจากการจัดการน้ำว่าเหมาะสมหรือไม่ เพราะถ้าหากมีปริมาณที่มากเกินไปก็จะทำให้น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเข้าท่วมเซลล์ได้ แต่ถ้าน้อยเกินไปก็จะส่งผลให้ไม่มีความชื้นเพียงพอที่จะช่วยให้โปรตอนส่งผ่านไปได้ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงองค์ประกอบของสารที่เหมาะสม ปริมาณสารในชั้นที่ชอบน้ำ และอัตราส่วนของสารที่ผสมกันอยู่ โดยมีขั้นตอนการเตรียมโดยทั่วไปดังนี้

1. ใช้ไมโครปิเปต ปิเปตกลีเซอรอลตามปริมาณที่ต้องการลงในขวดตัวอย่างที่มีฝาปิด
2. ใช้ไมโครปิเปต ปิเปตสารละลายเนฟิออน 117 เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักลงในขวดตัวอย่าง ตามปริมาณที่ต้องการ
3. นำขวดตัวอย่างใส่อ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
4. ใช้ฟุ้งกันจุ่มสารละลายในขวดตัวอย่างทาลงบนผ้าคาร์บอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวของชั้นที่ไม่ชอบน้ำแล้ว (จากหัวข้อ 3.6.1.1)
5. นำชิ้นงานที่ได้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่เจือปนให้ออกไป
6. ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานที่เตรียมได้เพื่อคำนวณหาปริมาณของชั้นที่ชอบน้ำว่าได้ปริมาณตามที่ต้องการหรือไม่
7. เก็บชิ้นงานในโถดูดความชื้นเพื่อรอการนำไปเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าต่อไป

3.6.2 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาวิธีการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) เนื่องจากวิธีนี้สามารถเตรียมได้ง่ายและรวดเร็ว สามารถควบคุมปริมาณและขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้า หรือระยะเวลาที่ใช้ในการพอกพูน โดยมีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. เตรียมสารละลายเฮกซะคลอโรแพลทินิกเข้มข้น 0.02 โมลลาร์
2. ใช้ผ้าคาร์บอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวทั้งสองชั้นแล้วจากขั้นตอนที่ 3.6.1.2 เป็นขั้วแคโทด (Working electrode)
3. ใช้ตาข่ายไทเทเนียม (Ti gauze) เป็นขั้วแอนโนด (Counter electrode)
4. ใช้ขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode)
5. ต่อเซลล์ตามรูป 3.6 สำหรับการพอกพูนด้วยไฟฟ้า
6. ทำการกววนสารละลายด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
7. เปิดสวิทช์เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาทีก่อนทำการทดลอง โดยที่ปุ่ม cell enable อยู่ในตำแหน่งปิด
8. จากนั้นเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำหน้าที่บันทึกข้อมูลจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยใช้โปรแกรม GPES ซึ่งทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ โดยทำการเลือกวิธีแบบ Chrono methods (interval time > 0.1 sec) และเลือกวิธีแบบ Potentiometry (galvanostatic)
9. ทำการตั้งค่ากระแสและเวลาที่จะใช้ในการพอกพูนตามที่ต้องการ
10. เมื่อจะทำการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ให้กด cell enable ให้อยู่ในตำแหน่งเปิด จากนั้นกด start ที่โปรแกรมเพื่อเริ่มการพอกพูนโลหะ
11. เมื่อทำการพอกพูนเสร็จให้ปิด cell enable ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่อหยุดการทำงานของเซลล์
12. จากนั้นถอดเซลล์ออกจากระบบ แล้วนำผ้าคาร์บอนที่พอกพูนด้วยแพลทินัมเสร็จแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
13. นำผ้าคาร์บอนที่อบเสร็จแล้วไปชั่งน้ำหนัก เพื่อดำเนินการหาปริมาณของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการพอกพูน
14. เก็บขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอการใช้งานต่อไป



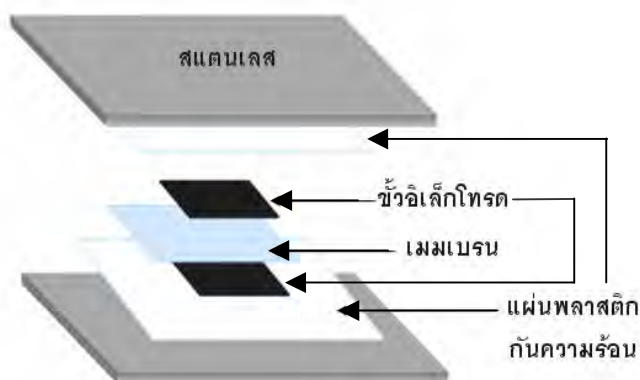
รูปที่ 3.6 การต่อเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า โดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

3.6.3 การปรับปรุงคุณภาพของเมมเบรน (ศศิการ์ต เอ็นดู, 2549)

1. ตัดเมมเบรน ให้มีขนาดกว้าง-ยาว ด้านละ 5 เซนติเมตร นำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำเมมเบรนจากข้อที่ 1 แช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์
3. นำเมมเบรนจากข้อที่ 2 ล้างด้วยน้ำกลั่นจากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลลาร์ ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดไอออนของโลหะ
4. นำเมมเบรนจากข้อที่ 3 แช่ในน้ำกลั่น ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อล้างคลอไรด์ไอออน
5. เก็บเมมเบรนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยการแช่ไว้ในน้ำกลั่น (เมื่อจะใช้งานให้นำเมมเบรนออกมาผึ่งให้แห้งก่อนจะนำไปใช้งาน)

3.6.4 การประกอบขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรน (Membrane Electrode Assembly, MEA)

1. นำแผ่นพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอนหรือพอลิยูรีเทนที่มีความหนาไม่มาก ตัดตรงกลางให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.25 x 2.25 เซนติเมตร
2. นำกาวยางหนามาแปะที่มุมทั้งสี่ของแผ่นพลาสติกแล้วนำไปแปะลงบนแผ่นสแตนเลสอันหนึ่ง
3. ทาสารละลายเนฟิออนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก บนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ และขั้วไฟฟ้าทางการค้าจากบริษัท Electrochem, Inc. โดยทาด้วยที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ได้ปริมาณ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร
4. นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. นำขั้วไฟฟ้าที่ทาสารละลายเนฟิออนแล้วมาวางบนแผ่นพลาสติก
6. นำเมมเบรนที่ปรับสภาพแล้ววางบนขั้วไฟฟ้าที่กึ่งกลางของเมมเบรน
7. นำขั้วไฟฟ้าอีกแผ่นวางประกบทับอีกด้านของเมมเบรน
8. นำแผ่นสแตนเลสอีกหนึ่งแผ่นมาประกบทับบนเมมเบรนกับขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.7 ก่อนกดอัด ด้วยความร้อนด้วยเครื่องกดอัดร้อน-เย็น (Compression mold)
9. วางแผ่นสแตนเลสทั้งสองบนแท่นกดอัดของเครื่องกดอัดร้อน-เย็น
10. เปิดเครื่องกดอัดร้อน-เย็นและกดอัดด้วยความร้อน โดยใช้ความดัน 65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที (Banyong et al., 2004)
11. เก็บขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอการทดสอบสมรรถนะต่อไป



รูปที่ 3.7 ภาพจำลองลักษณะชั้นในการเตรียมเอ็มอีเอ

3.7 การวิเคราะห์สมบัติของขั้วไฟฟ้า

สมบัติของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ ดังนั้นสมบัติพื้นฐานของขั้วไฟฟ้าที่ควรศึกษาประกอบด้วยสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

3.7.1 การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา

ศึกษาการกระจายตัวของโลหะแพลทินัมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อถ่ายภาพพื้นผิว ลักษณะอนุภาคและการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่กำลังขยายต่างๆ

3.7.2 การศึกษาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า

ศึกษาโครงสร้าง และขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) โดยใช้วัดหาค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2θ ตั้งแต่ 30-80 องศา

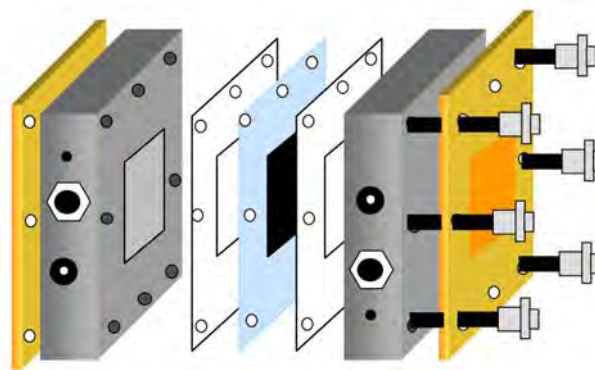
3.7.3 การศึกษาขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า

ศึกษาขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนขั้วไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Transmission electron microscope (TEM) โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้โดยใช้เครื่อง XRD

3.8 การวัดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มสำหรับเซลล์เดี่ยว

3.8.1 การประกอบเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

1. ประกอบขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรน ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร เข้ากับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้งสองด้าน โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ในการเร่งปฏิกิริยาด้านแคโทด และใช้ขั้วไฟฟ้าทางการค้าที่เป็นกระดาษคาร์บอน จากบริษัท Electrochem, Inc. (ปริมาณโลหะแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) อยู่ด้านแอโนด
2. ใช้แผ่นยางซิลิโคนบางเพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส โดยนำมาวางไว้ระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรนกับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้งสองด้าน
3. ยึดตรึงแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าที่ประกบกับขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรน ทั้งสองด้านเข้าด้วยกันโดยใช้น็อต และถัดจากแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าจะมีแผ่นปิดท้าย (End plate) ประกอบอยู่ทั้งสองด้าน จากนั้นจึงใช้ประแจปอนด์เพื่อทำการอัดส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยใช้โมเมนต์การหมุนที่ 40 ปอนด์แรงนิ้ว ดังรูปที่ 3.8
4. นำเซลล์เดี่ยวที่ได้ไปติดตั้งในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (Test station) และทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป



รูปที่ 3.8 ภาพจำลองของแต่ละชั้นในการประกอบเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มแบบเซลล์เดี่ยว

3.8.2 ขั้นตอนก่อนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้า (Intake Valve) ของแก๊สแต่ละชนิด ให้ปิดเปิดในทิศทางตามต้องการ เพื่อป้องกันการไหลปนกันของแก๊สชนิดต่าง ๆ และวาล์วขาออก (Relieve Valve) ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
2. ตรวจสอบความเรียบร้อยของข้อต่อต่าง ๆ ในหน่วยทดสอบ ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทำการทดลอง
3. ตรวจสอบระดับน้ำภายในส่วนระเหยน้ำของระบบให้มีความชื้น โดยดูจากส่วนจัดหาน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (สูงกว่าขีดบอกระดับน้ำเดิมเล็กน้อย เมื่อระดับน้ำลดจากระดับเดิมมาก ควรเติมน้ำให้ได้เท่ากับขีดบอกระดับน้ำเดิม)
4. ตรวจสอบเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังแก๊สทุกถังให้อยู่ตำแหน่งปิด
5. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองขั้วที่ต่อมายังเครื่อง Electronic load ว่าให้อยู่ในสภาพที่ต่อเรียบร้อย
6. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
7. เปิดเครื่องตรวจแก๊สไฮโดรเจนเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในกรณีที่เกิดการรั่วของแก๊สไฮโดรเจน
8. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 15 นาที ก่อนทำการทดลอง
9. เปิดสวิตช์เครื่อง Electronic load เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาที
10. เปิดสวิตช์ที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้าที่สวิตช์หลัก (Main switch) แล้วจึงเปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง แล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงเป็น 60 องศาเซลเซียส และเปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ตั้งค่าอุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำของด้านแอโนด 65 องศาเซลเซียสและด้านแคโทด 60 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งอุณหภูมิได้ตามค่าที่ตั้งไว้
11. ตั้งค่าอัตราการไหลตามต้องการที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สที่ 100 sccm ทั้งแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจน ส่วนของแก๊สไนโตรเจนจะใช้ทั้งสองช่องโดยเปลี่ยนทางเดินของแก๊ส โดยใช้วาล์วขาเข้าเป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของแก๊ส
12. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดถังแก๊สที่ต้องการใช้ที่วาล์วหัวถังของแก๊สแล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออกตามต้องการ

ซึ่งโดยปกติเท่ากับ 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วจึงมาเปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องรับอัตรา
การไหลแต่ละช่องเพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ

13. ก่อนจะทำการทดลอง ควรผ่านแก๊สไฮโดรเจนกับหน่วยทดสอบประมาณ 20 นาที โดยตั้งอัตราการไหลของแก๊สทั้งสองช่องไว้ที่ 100 sccm ก่อนด้วยสาเหตุดังนี้
 - เพื่อเป็นการไล่สิ่งสกปรกค้างอยู่ในหน่วยทดสอบออกก่อน
 - เพื่อตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำยาในการตรวจสอบการรั่วภายในหน่วยทดสอบ
 - เพื่อใช้วัดค่าความชื้นภายในแก๊สก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ส่วนวัดความชื้น
14. ก่อนการวัดสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ควรมีการทำให้ขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรนที่เตรียมได้นั้นมีความพร้อมก่อนการทดสอบโดยทำการ Run-in เพื่อให้ขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนมีความพร้อมหรือมีความชื้นที่เพียงพอก่อนทำการทดสอบ โดยการตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น 0.5 โวลต์ ทำการ run เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง ปรับค่าความดันภายในระบบโดยการหมุน regulator ที่ back pressure เพื่อเพิ่มความดันในระบบให้ได้ประมาณ 14.7 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 60 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของส่วนระเหยน้ำทางด้านแอโนด 65 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของส่วนระเหยด้านแคโทด 60 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับการทดสอบจริง
15. เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งค่าความต่างศักย์ในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟของเซลล์เชื้อเพลิง (Open circuit voltage) ที่ได้มีค่าคงที่ เริ่มทำการทดสอบโดยกดปุ่มที่เครื่อง Electronic load ปรับค่าความต่างศักย์ที่ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0.1-0.9 โวลต์ ตามต้องการ

3.8.3 ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

การศึกษาโพลาริเซชัน เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับค่าความต่างศักย์ โดยวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าความต่างศักย์ต่างๆ ที่ตั้งไว้ โดย Electronic load จากนั้นจึงนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์

3.8.4 ขั้นตอนภายหลังการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

1. เมื่อเสร็จสิ้นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่อง Electronic load กดปุ่มหยุดทดสอบ
2. ปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหลแล้วจึงปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สทุกถัง
3. ปิดวาล์วขาเข้าทุกตัวและค่อย ๆ เปิดวาล์วขาออกทีละตัว เพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอจนกระทั่งเกจที่วัดความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลงจนถึงศูนย์ทั้งขาเข้าและขาออกแล้วจึงเปิดวาล์วขาออกของแก๊สอีกถังหนึ่งทำในลักษณะเดียวกัน
4. เมื่อลดความดันในท่อแก๊สหมดจึงทำการปิดวาล์วขาออกของแก๊สทุกตัว
5. ปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า
6. ปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งไฟฟ้าแล้วจึงปิดสวิตช์หลัก
7. จากนั้นจึงปิดสวิตช์ที่เครื่อง Electronic load
8. ถอดสวิตช์ทั้งหมด
9. แกะเซลล์ออกจากหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง ถอดเอาขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรนออก
10. ทำการไล่น้ำที่ค้างในเซลล์ออกโดยการไล่น้ำด้วยแก๊สไนโตรเจน

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมชั้นย่อยเพื่อใช้เป็นพื้นผิวสำหรับการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา แพลทินัมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ซึ่งจะอาศัยหลักการเคมีไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์ โดยจะศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นย่อย ซึ่งคุณสมบัติของชั้นย่อยนี้จะส่งผลโดยตรงต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ชั้นย่อยจะแบ่งออกเป็นสองชั้นคือ ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer) และชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer) โดยเริ่มจากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมชั้นย่อย ซึ่งได้แก่ ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมชั้นย่อย ปริมาณสารในแต่ละชั้น สัดส่วนของส่วนผสมที่ใช้ โดยพิจารณาจากสมรรถนะของเอมอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมได้ในเซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์แบบชนิดเซลล์เดียว

4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรน (MEA) โดยศึกษาองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรนมีองค์ประกอบหลายๆ ส่วนที่มีผลต่อการเตรียมขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงโดยส่วนที่จะศึกษาจะประกอบไปด้วย

4.1.1 ชนิดของผ้าคาร์บอนที่ใช้เป็นชั้นแพร่ผ่านของแก๊ส

ในการศึกษาชั้นแพร่ผ่านของแก๊ส (GDL) ได้ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของผ้าคาร์บอน (carbon cloth) ของสองบริษัทคือของ Electrochem, Inc. และ E-TEK ซึ่งจากตารางที่ 4.1 พบว่าผ้าคาร์บอนทั้งสองบริษัทมีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยใช้ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ในการวัดความหนา ซึ่งผ้าคาร์บอนของบริษัท Electrochem, Inc. มีความหนามากกว่า และใช้เครื่อง Capillary Flow Porometer ในการวัดขนาดรูพรุนโดยขนาดรูพรุนที่น้อยกว่าของผ้าคาร์บอนของบริษัท Electrochem, Inc. แสดงว่าเส้นใยที่ถักมีความแน่นที่มากกว่าทำให้ผ้ามีความแข็งแรงมากกว่า และเมื่อสังเกตจากแผ่นผ้าคาร์บอนด้วยตาเปล่าก็พบว่าผ้ามีความแข็งแรงที่ต่างกัน โดยผ้าจาก Electrochem, Inc. ดูแข็งแรงและแน่นกว่า ในขณะที่ของ E-TEK พบว่าเส้นใยที่

ถักแน่นน้อยกว่า อีกทั้งเมื่อทำการตัดผ้าคาร์บอนทั้งสองพบว่าผ้าของ E-TEK มีการหลุดลุ่ยของเส้นใยที่ด้านขอบมากกว่า รวมทั้งเมื่อดูจากน้ำหนักของผ้าคาร์บอนทั้งสองบริษัท แสดงให้เห็นความหนาแน่นของผ้า โดยผ้าคาร์บอนของ Electrochem, Inc. จะมีน้ำหนักต่อพื้นที่ของผ้าที่สูงกว่า แสดงว่าผ้ามีความหนาแน่นมากกว่า

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของผ้าคาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc. และ E-TEK โดยใช้เครื่อง Capillary Flow Porometer ในการวัดขนาดรูพรุน และใช้ไมโครมิเตอร์ในการวัดความหนาของผ้าคาร์บอน

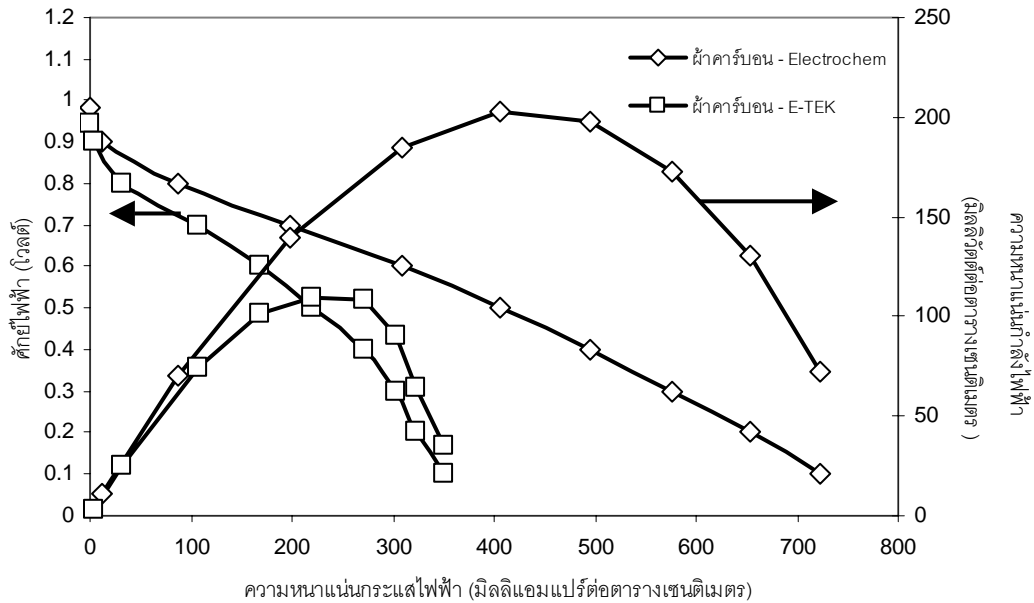
Sample	Electrochem	E-TEK
Mean flow pore diameter (microns)	55.99	58.69
Bubble point pore diameter (microns)	236.84	1802.77
Smallest detected pore diameter (microns)	6.64	1802.77
Standard deviation of AVG. pore diameter	59.68	321.10
Maximum pore size distribution	4.08	N/A
Diameter at maximum pore size distribution (microns)	21.10	N/A
Frazier analysis (ft ³ /ft ² -min)	7.39	8.12
Weight per area* (g/cm ²)	0.0171±0.0096	0.0135±0.0016
Thickness (mm)	0.39	0.34

*พื้นที่ของผ้าคาร์บอนเท่ากับ 6.9 cm²

จากนั้นทำการเตรียมชั้นย่อยลงบนผ้าคาร์บอนทั้งสองโดยทำการเตรียมชั้นที่ไม่ชอบน้ำให้มีปริมาณ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอนในสัดส่วน 30:70 และชั้นที่ชอบน้ำให้มีปริมาณ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างเนฟลอนกับกลีเซอรอลในสัดส่วน 50:50 จากนั้นนำไปเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) แบบกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยทำการพอกพูนในสารละลายไฮโดรเจนเฮกซะคลอโรแพลทินิก (H₂PtCl₆.6H₂O) เข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นนำไปทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยให้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าทางการค้าจากบริษัท Electrochem, Inc. ซึ่งเป็นกระดาษคาร์บอนที่มีปริมาณแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรเป็นขั้วแอโนด และใช้เมมเบรน 115 ทดสอบประสิทธิภาพในเซลล์เดี่ยวที่อุณหภูมิเซลล์ 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหล

ของแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจน 100 มิลลิลิตรต่อหน้าที่ ที่ความดันแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิง 1 บรรยากาศ

จากการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงกราฟโพลาริเซชันของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc. และ E-TEK พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc. จะให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงกว่า ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งสรุปผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากชั้นแพร่ผ่านของแก๊สมีหน้าที่สำคัญที่จะทำหน้าที่รองรับผงคาร์บอน เพื่อเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลและความสม่ำเสมอของแก๊สเชื้อเพลิงที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังช่วยเสริมการกระจายกระแสไฟฟ้าให้สม่ำเสมอ ณ บริเวณชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปชั้นแพร่ผ่านของแก๊สจะนิยมใช้เส้นใยคาร์บอน ที่เป็นวัสดุหลัก เนื่องจากมีความพรุนสูงและนำไฟฟ้าได้ดีซึ่งในทางการค้ามีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ กระดาษคาร์บอน และ ผ้าคาร์บอน ซึ่งผ้าของบริษัท Electrochem, Inc. จะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าดังคุณสมบัติข้างต้นที่กล่าวไปแล้ว จึงทำให้การที่เตรียมชั้นย่อยมีลักษณะที่ดีต่อการมาเกาะที่ผิวหน้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าที่สูงกว่า และจากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าผ้าคาร์บอนของบริษัท E-TEK จะมีขนาดรูพรุนที่มากกว่าผ้าคาร์บอนของบริษัท Electrochem, Inc. ทำให้ชั้นย่อยที่เตรียมอาจมีการกระจายลงไปตามรูพรุนที่มีขนาดที่ใหญ่กว่า และทำให้อนุภาคแพลทินัมที่จะมาเกาะเกิดการพอกพูนภายในรูพรุนของผ้ามากกว่าที่จะเกิดการพอกพูนที่ผิวหน้าของผ้า ซึ่งจะเป็นที่ที่จะมีการสัมผัสกับชั้นของเมมเบรนโดยตรงเลยทำให้ catalyst utilization ของผ้าคาร์บอน E-TEK น้อยกว่า จึงได้ประสิทธิภาพที่น้อยกว่า



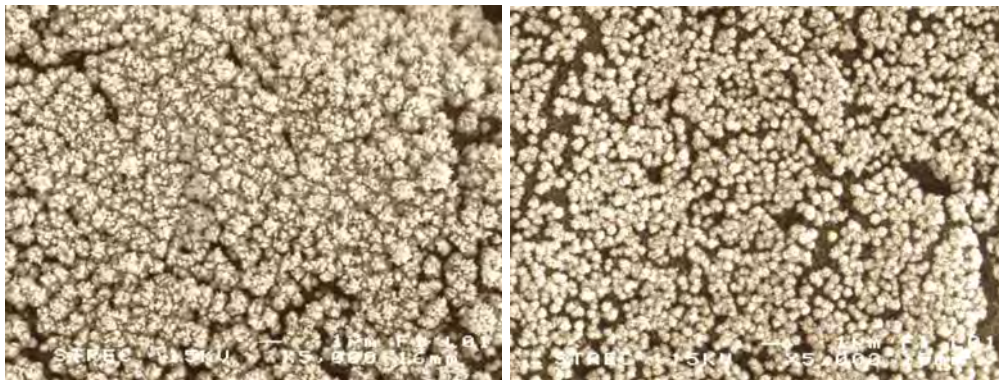
รูปที่ 4.1 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเอ็มอีเอทีที่เตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูอมบ์ต่อตารางเซนติเมตรบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc. และ E-TEK

ตารางที่ 4.2 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc. และ E-TEK

บริษัทของผ้าคาร์บอน	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V)	
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (mW/cm ²)
Electrochem	308	184.8
E-TEK	169	101.4

จากรูป 4.2 เป็นภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า โดยจากรูปจะพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc. จะมีการกระจายตัวของอนุภาคแพลทินัมที่สม่ำเสมอ มีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนดูเป็นพื้นผิวที่ปกคลุมทั่วทั้งหมด ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าจากบริษัท E-TEK ก็มีการกระจายตัวของอนุภาคแพลทินัมที่สม่ำเสมอ แต่ปกคลุมพื้นผิวอย่างไม่ทั่วถึง คือมีพื้นที่ผิวบางส่วนที่มองเห็นว่าไม่มีการเกาะของอนุภาคแพลทินัมซึ่งก็จะสอดคล้องกับผลของโพลาร์ไรเซชันโดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของผ้าคาร์บอนบริษัท E-TEK มีค่าที่น้อยกว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนผ้าคาร์บอนของบริษัท Electrochem, Inc. ซึ่งเห็นได้ว่าผ้าคาร์บอนจากแต่ละบริษัทจะมีผลต่อการเตรียมขั้วไฟฟ้า เพราะว่าเส้นใยของผ้าคาร์บอนที่ต่างกัน

ยอมทำให้ชั้นย่อยมีการเกาะลงบนชั้นรองรับที่แตกต่างกัน ทำให้การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะที่ต่างกันด้วย

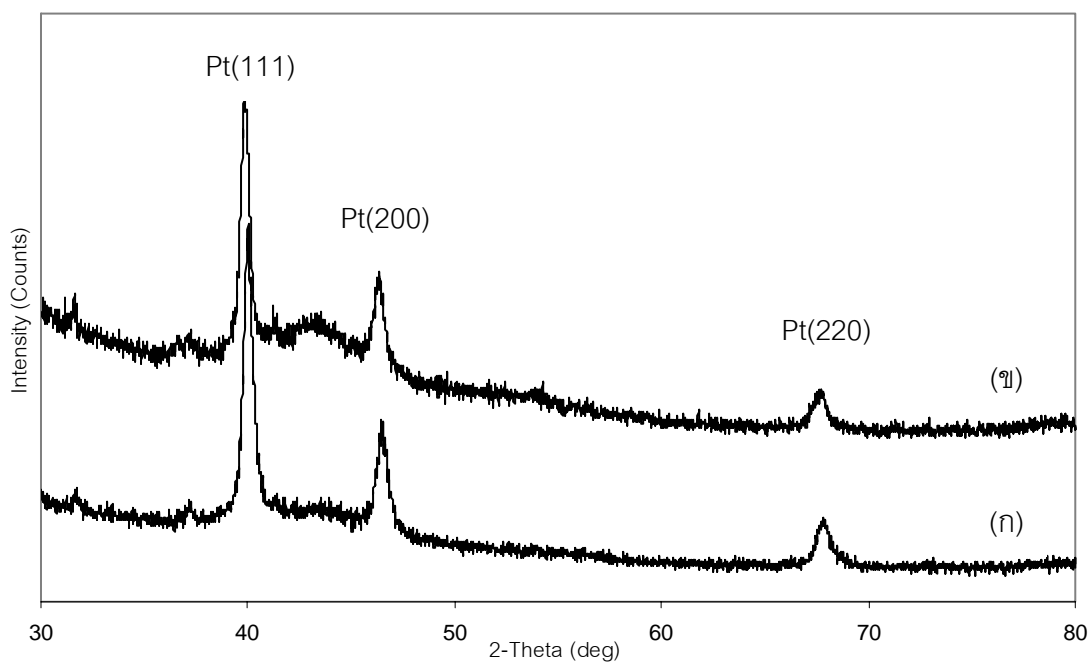


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท: (ก) Electrochem, Inc.; (ข) E-TEK

จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.3 จะเป็นการหาขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจาก XRD และหาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจาก CV (โดยวิธีการคำนวณหาขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจาก CV แสดงอยู่ในภาคผนวก ง. และ จ. ตามลำดับ) ซึ่งจะพบว่าขนาดอนุภาคของแพลทินัมมีขนาดที่ใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าจะทำการเตรียมชั้นย่อยลงบนผ้าคาร์บอนต่างบริษัทกัน เนื่องมาจากการเตรียมชั้นย่อยลงบนผ้าคาร์บอนทั้งสองที่ต่างกัน จะทำให้การกระจายตัวของผงคาร์บอนต่างกัน จึงให้แพลทินัมมาเกาะในลักษณะที่ต่างกันด้วย แต่ว่าจากการหาขนาดของอนุภาคแพลทินัมจาก XRD ได้ขนาดที่ใกล้เคียงกัน เพราะว่าในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยไฟฟ้าได้ทำการป้อนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่เท่ากันไม่ว่าจะทำการเตรียมบนผ้าคาร์บอนทั้งสองซึ่งต่างบริษัทกัน จึงทำให้ได้ขนาดของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นน่าจะเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของชั้นแพร่ผ่านของแก๊สที่ต่างกันมากกว่าที่ส่งผลให้การกระจายตัวของผงคาร์บอนต่างกัน ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีการเกาะที่ต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพที่ได้ต่างกันด้วย ในส่วนของพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าอนุภาคแพลทินัมที่เกาะบนผ้าคาร์บอนของบริษัท E-TEK อาจมีการพอกพูนลงไปตามรูพรุนของผ้าที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นเมื่อทำการหาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจึงได้ค่าที่มากกว่า แต่ว่าพื้นที่เกิดปฏิกิริยาจริงๆ อาจเกิดเฉพาะที่บริเวณผิวหน้าสัมผัสสัมผัสกับชั้นของเมมเบรนก็ได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพที่ได้น้อยกว่า



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท: (ก) Electrochem, Inc.; (ข) E-TEK

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมบนผ้าคาร์บอนจากบริษัท Electrochem, Inc. และ E-TEK

บริษัทของผ้าคาร์บอน	XRD*	CV
	ขนาดอนุภาคแพลทินัม (nm)	พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (m ² /g)
Electrochem	12.62	47.7
E-TEK	12.99	87.48

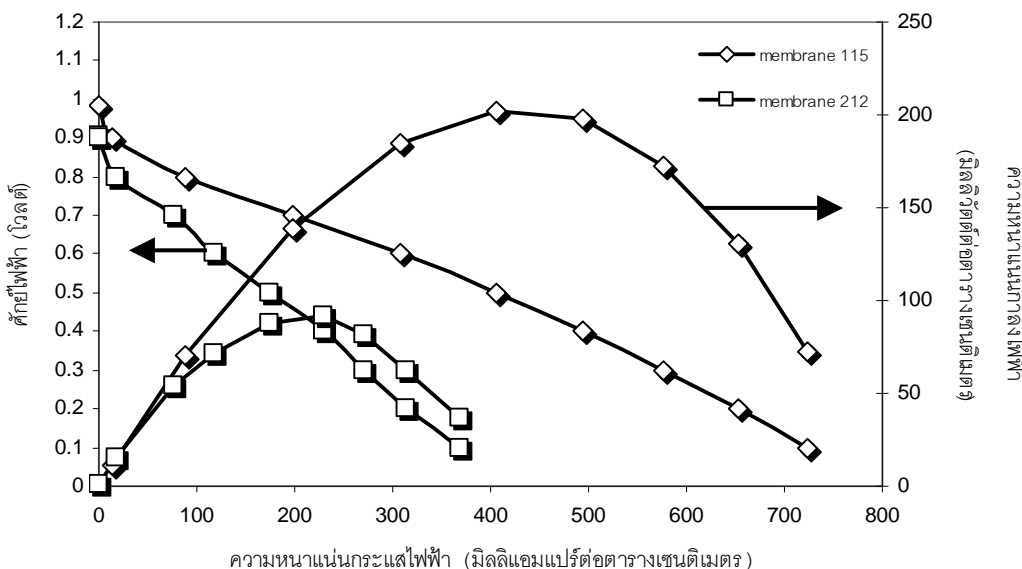
* ผลการวิเคราะห์ XRD คัดจาก Pt(111)

ดังนั้นผ้าคาร์บอนที่เหมาะสมต่อการเตรียมชั้นย่อยเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าคือ ผ้าคาร์บอนของบริษัท Electrochem, Inc. โดยจะเลือกผ้าคาร์บอนของบริษัท Electrochem, Inc. ในการทำการทดลองต่อไปด้วย

4.1.2 ชนิดของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ก่อนที่จะทำการศึกษาศึกษาการเตรียมชั้นย่อย ได้ทำการหาเมมเบรนที่เหมาะสมเพื่อนำมาประกอบเป็นเอ็มอีเอ เพื่อให้เป็นมาตรฐานในงานวิจัยต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการประกบขั้วอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรนหรือเอ็มอีเอ โดยจะทำการเปรียบเทียบเมมเบรนสองตัวคือ เมมเบรน 115 และเมมเบรน 212 ซึ่งเมมเบรนทั้งสองจะมีความแตกต่างกันในความหนาคือเมมเบรน 115 จะหนา 5 mil หรือเทียบเท่ากับ 0.12 มิลลิเมตร และเมมเบรน 212 จะหนา 2 mil หรือเทียบเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.4 พบว่าเอ็มอีเอที่เตรียมโดยใช้เมมเบรน 115 จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าการใช้เมมเบรน 212 ซึ่งในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะทำการเตรียมขั้วไฟฟ้าทางด้านแคโทด โดยจะทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนผ้าคาร์บอนที่เป็นชั้นแพร่ผ่านของแก๊ส ซึ่งจะเตรียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ส่วนทางด้านแอโนดจะใช้ขั้วไฟฟ้าทางการค้าซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมอยู่บนกระดาษคาร์บอนที่เป็นชั้นแพร่ผ่านของแก๊สและมีปริมาณของแพลทินัมเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งในการประกอบเป็นเอ็มอีเอโดยด้านหนึ่งเป็นผ้าคาร์บอน อีกด้านเป็นกระดาษคาร์บอน ย่อมส่งผลต่อการกอดัดลงบนเมมเบรนทั้งสองฝั่ง จากการทดสอบประสิทธิภาพจะเห็นว่าการประกบอัดเป็นเอ็มอีเอโดยใช้เมมเบรน 115 จะได้ค่ากระแสที่มากกว่าการประกบอัดเป็นเอ็มอีเอโดยใช้เมมเบรน 212



รูปที่ 4.4 กราฟโพลารไรเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้เมมเบรน 115 และเมมเบรน 212 ในการประกอบเอ็มอีเอ

ตารางที่ 4.4 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้เมมเบรน 115 และเมมเบรน 212

ชนิดของเมมเบรน	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V)	
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (mW/cm ²)
115	308	184.8
212	118.6	71.16

ซึ่งลักษณะของเอมีโอเอที่เตรียมได้ย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมก็ได้แก่ ลักษณะของชั้นแพร่ผ่านของแก๊สซึ่งจะส่งผลต่อผิวหน้าของของชั้นย่อยที่ทำการเตรียม และก็ยังส่งผลต่อลักษณะของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการเตรียมขึ้น จึงส่งผลต่อการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับเมมเบรนที่ใช้ด้วย

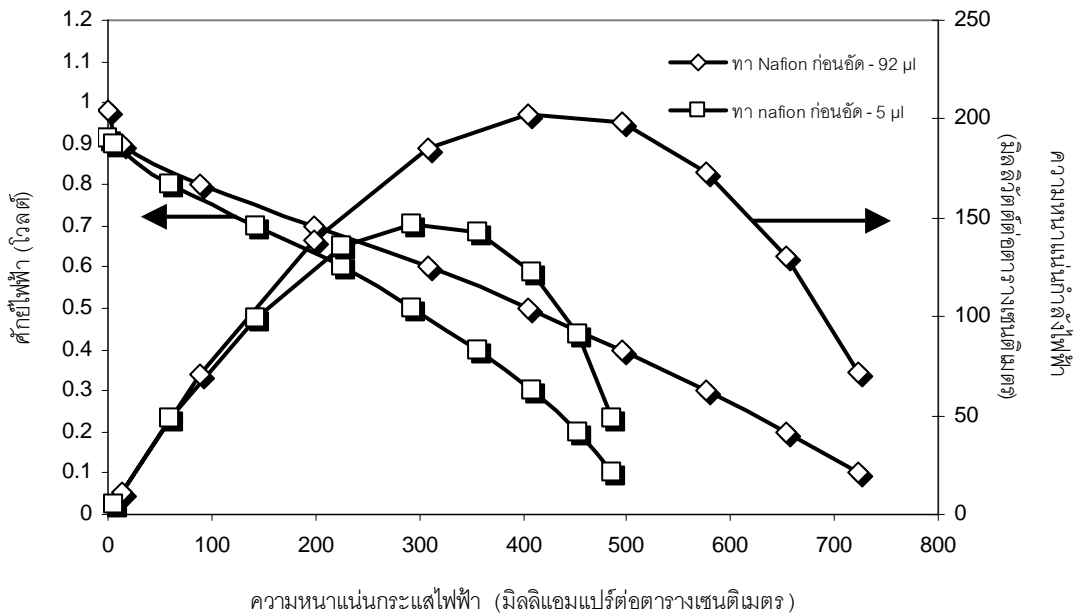
ดังนั้นในการเตรียมขั้วไฟฟ้าประกอบเมมเบรนซึ่งทำการเตรียมขั้วไฟฟ้าแพลทินัมลงบนผ้านคาร์บอน เมมเบรนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าคือ เมมเบรน 115

4.1.3 ปริมาณเนฟลอนที่ทา ก่อนการประกอบเอมีโอเอ

สารละลายเนฟลอนที่ทา ก่อนการประกอบเป็นเอมีโอเอจะเป็นตัวช่วยในการสัมผัสกันระหว่างชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยากับเมมเบรน ซึ่งปริมาณของเนฟลอนจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ จึงได้ทำการศึกษาว่าปริมาณเนฟลอนที่ทาแตกต่างกันจะส่งผลอย่างไรบ้างจึงได้ทำการเตรียมขั้วไฟฟ้าจากนั้นนำไปประกอบระหว่างเมมเบรน 115 ซึ่งก่อนการประกอบจะทำการทาสารละลายเนฟลอนความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่ปริมาณ 5 และ 92 ไมโครลิตรที่ขั้วอิเล็กโทรด แล้วเมื่อได้เอมีโอเอก็นำไปทดสอบหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งได้ผลดังแสดงรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.5 พบว่าเอมีโอเอที่ประกอบโดยใช้ปริมาณเนฟลอน 92 ไมโครลิตรจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าการใช้ปริมาณเนฟลอน 5 ไมโครลิตร เพราะว่าปริมาณเนฟลอนที่ทา ก่อนการอัดเป็นเอมีโอเอจะเป็นตัวช่วยที่สำคัญในการยึดติดกันระหว่างผิวหน้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและเมมเบรน ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง จากรูป 4.5 จะเห็นว่ากราฟทั้งสองที่ได้ต่างกันในช่วงของ Ohmic loss ซึ่งเป็นช่วงที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านไอออนไม่ว่าจะเป็นการส่งผ่านโปรตอนหรือการส่ง

ผ่านอิเล็กโทรน ซึ่งปริมาณเนฟออนที่ทาเพียง 5 ไมโครลิตรอาจมีปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อการสัมผัสกันทั้งสามเฟสจึงทำให้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและเมมเบรนสัมผัสกันได้ไม่ดีเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น การส่งผ่านโปรตอนให้ข้ามไปยังอีกฝั่งของขั้วไฟฟ้าจึงเป็นไปได้ยากและจึงทำให้เกิดความต้านทานในส่วนนี้ขึ้นประสิทธิภาพที่ควรจะได้ก็เลยลดลง (Dokyol and Siwoo, 2008)



รูปที่ 4.5 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ปริมาณเนฟออนที่ทา ก่อนการอัดเป็นเอ็มอีเอเท่ากับ 5 และ 92 ไมโครลิตร

ตารางที่ 4.5 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ปริมาณเนฟออนที่ทา ก่อนการอัดเป็นเอ็มอีเอเท่ากับ 5 และ 92 ไมโครลิตร

ปริมาณเนฟออนที่ทา ก่อนการประกอบเป็น เอ็มอีเอ	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V)	
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (mW/cm ²)
92 μl	308	184.8
5 μl	226.4	135.84

ดังนั้นปริมาณเนฟออนที่ทา ก่อนการประกอบอัดเป็นเอ็มอีเอมีปริมาณเท่ากับ 92 ไมโครลิตร จึงทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงและเหมาะสมต่อการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

4.2 การศึกษาองค์ประกอบของชั้นย่อย (Sublayer)

การเตรียมชั้นย่อยก่อนเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยสองชั้นคือชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer) และชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer) ซึ่งจะเป็นส่วนที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ โดยลำดับของชั้นย่อย ส่วนที่ติดกับชั้นแพร่ผ่านของแก๊สจะเป็นชั้นที่ไม่ชอบน้ำ ถัดมาเป็นชั้นที่ชอบน้ำ แล้วจึงเป็นชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะติดกับเมมเบรน ดังแสดงในรูปที่ 2.7

4.2.1 ชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer)

เป็นชั้นที่ช่วยในการจัดการน้ำเพราะถ้าหากไม่มีชั้นที่ชอบน้ำเซลล์ก็จะแห้ง อีกทั้งน้ำจะเป็นตัวช่วยในการส่งผ่านโปรตอนด้วย ถ้าหากไม่มีน้ำอยู่ภายในเซลล์หรือมีอยู่ในปริมาณที่ไม่เหมาะสมก็จะทำให้ปฏิกิริยาที่จะเกิดได้ยากประสิทธิภาพที่ได้ก็จะลดลง ดังนั้นองค์ประกอบในชั้นที่ชอบน้ำจึงเป็นส่วนจำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ชั้นที่ชอบน้ำยังอาจส่งผลต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า เพราะเป็นชั้นที่จะสัมผัสกับสารละลายที่ใช้ในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง เพื่อให้แพลทินัมมาเกาะ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ต่อไป โดยจะศึกษาถึงส่วนต่างๆ ดังนี้

4.2.1.1 องค์ประกอบของส่วนผสมในชั้นที่ชอบน้ำ

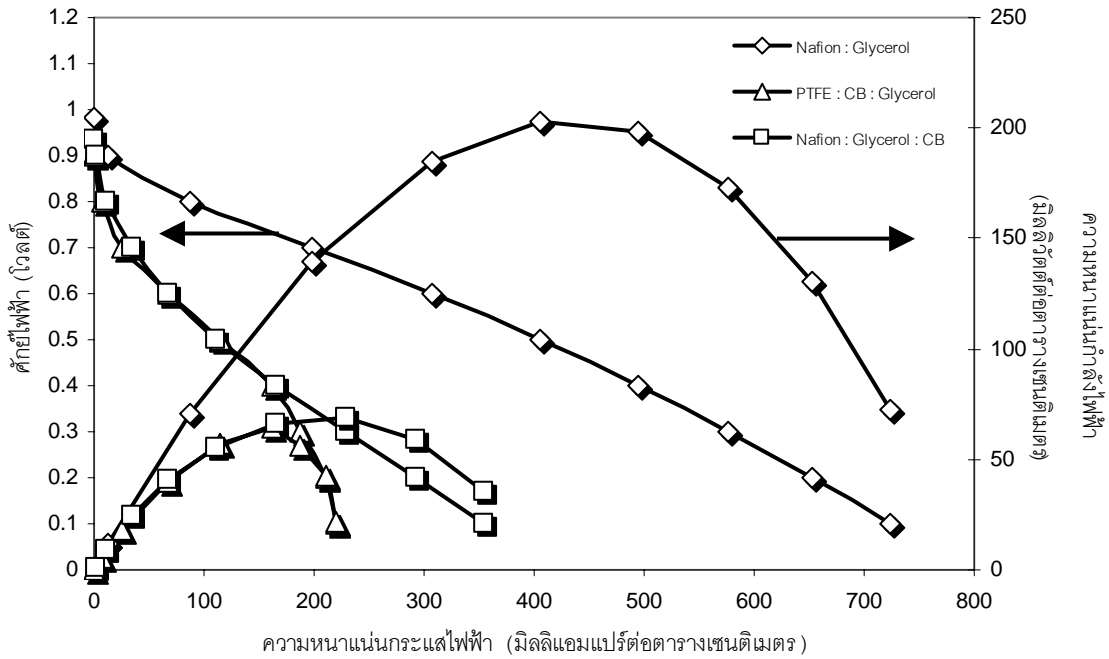
ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะทำการเตรียมชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer) ลงบนผ้านคาร์บอนที่เป็นชั้นแพร่ผ่านของแก๊สก่อน โดยให้มีปริมาณชั้นที่ไม่ชอบน้ำเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน ในอัตราส่วน 30:70 จากนั้นจะทำการเตรียมชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer) โดยในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมชั้นที่ชอบน้ำซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Litster and Mclean, 2004) โดยมีด้วยกันทั้งหมดสามส่วนผสมคือ

- (i) เนฟิออน (Nafion) กับกลีเซอรอล (Glycerol) ในอัตราส่วน 1:1
- (ii) เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน ในอัตราส่วน 1:1:1
- (iii) PTFE กับผงคาร์บอน (Carbon black) ในอัตราส่วน 30:70 และเติมกลีเซอรอล 4 ไมโครลิตร

ซึ่งส่วนผสมสุดท้ายนี้จะเตรียมปริมาณชั้นที่ไม่ชอบน้ำเท่ากับ 1.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน จากนั้นจึงทำการเตรียมชั้นที่ชอบน้ำให้มีปริมาณเท่ากับ 0.7 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Kim et al., 2004)

เมื่อทำการเตรียมชั้นย่อยแล้วจึงนำมาเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยวิธีพอกพูนด้วยไฟฟ้า และนำไปทำการประกบเป็นเอ็มอีเอ เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.6 พบว่าส่วนผสมที่ใช้เฉพาะเนฟิออนกับกลีเซอรอลจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอีกสองตัว โดยส่วนผสมของ PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล และส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในส่วนผสมของ PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล ที่ได้ค่าน้อยอาจเนื่องมาจากส่วนผสมที่ใช้ไม่มีองค์ประกอบของเนฟิออน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าในชั้นที่ชอบน้ำส่วนประกอบหลักก็คือเนฟิออน ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติที่ชอบน้ำ ดังนั้นจึงเป็นตัวที่ทำให้ชั้นย่อยที่เตรียมขึ้นมีลักษณะตามที่ต้องการ แต่ส่วนผสม PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอลไม่มีเนฟิออน จึงอาจทำให้คุณสมบัติในส่วนนี้ขาดลงเมื่อทดสอบประสิทธิภาพก็พบว่ากราฟจะลดลงช่วงแรก ซึ่งเป็นช่วงที่เกี่ยวข้องกับตัวเร่งปฏิกิริยาอีกทั้งอาจเป็นเพราะถ้าหากขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นไม่มีคุณสมบัติที่ชอบน้ำก็จะทำให้ปฏิกิริยาที่จะเกิด เกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากเซลล์แห้งเกินไปปฏิกิริยาที่จะเกิดได้ยาก ส่วนส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอนจากกราฟก็เห็นว่า จะลดลงช่วงแรกเหมือนกันทั้งๆ ที่ส่วนผสมมีส่วนของเนฟิออนอยู่ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าในส่วนผสมนี้มีส่วนของผงคาร์บอนโดยในชั้นที่ไม่ชอบน้ำก็มีปริมาณของผงคาร์บอนซึ่งผสมกับ PTFE อยู่ในปริมาณ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อในชั้นที่ชอบน้ำเป็นส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลแต่กลับมีส่วนผสมของผงคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นอีกในปริมาณ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นอาจจะเป็นการทำให้ปริมาณรวมของผงคาร์บอนทั้งในชั้นที่ไม่ชอบและชอบน้ำมีปริมาณที่มากเกินไป ซึ่งจะทำให้ชั้นย่อยที่เตรียมขึ้นมีความหนาที่มากเกินไปและอาจทำให้ความต้านทานภายในเพิ่มขึ้นด้วย และทำให้แก๊สที่จะเข้าทำปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าทำปฏิกิริยาได้ยากเลยทำให้ประสิทธิภาพที่ได้ลดลง และเมื่อสังเกตที่ส่วนผสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล และส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน จะเห็นว่าประสิทธิภาพของส่วนผสมทั้งสองใกล้เคียงกันแต่ส่วนผสมของ PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล กราฟจะลดลงเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นซึ่งเป็นกราฟในส่วนของการถ่ายเทมวลสารเนื่องจากส่วนผสมของ PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอลดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าเป็นส่วนผสมที่ทำให้ชั้นย่อยมีความหนาที่มากเกินไปและทำให้ความต้านทานมากขึ้น อีกทั้งทำให้แก๊สที่จะเข้าทำปฏิกิริยาหรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านได้ไม่สะดวกจึงทำให้ประสิทธิภาพที่ได้ลดลง



รูปที่ 4.6 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเอ็มอีเอทีที่เตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ส่วนผสมของชั้นที่ขอบน้ำคือเนฟิออนกับกลีเซอรอล; PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน ในการเตรียมชั้นย่อย

ตารางที่ 4.6 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของชั้นที่ขอบน้ำคือเนฟิออนกับกลีเซอรอล; PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน ในการเตรียมชั้นย่อย

ส่วนผสมในชั้นที่ขอบน้ำ	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V)	
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (mW/cm ²)
เนฟิออน:กลีเซอรอล	308	184.8
PTFE:ผงคาร์บอน:กลีเซอรอล	66.46	39.88
เนฟิออน:กลีเซอรอล:ผงคาร์บอน	68	40.8

นอกจากนี้ ส่วนผสมของชั้นที่ขอบน้ำที่แตกต่างกัน ยังส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยใช้ไฟฟ้า เช่นคุณสมบัติการ Wetting ของสารละลายที่ใช้ในการพอกพูนบนขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะผิวหน้าที่ต่างกัน ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนได้มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคตลอดจนการ

กระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากชั้นย่อยทั้ง 3 มีลักษณะที่แตกต่างกัน (Litster and Mclean, 2004)

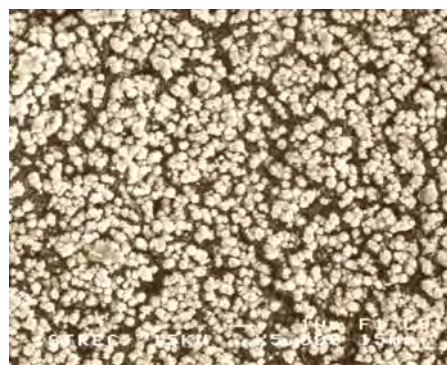
จากรูปที่ 4.7 จะพบว่าอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีการกระจายตัวและการเกาะเป็นกลุ่มที่แตกต่างกันโดยจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้รูป (ก) เป็นรูปส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากที่สุด จากรูปจะเห็นว่าอนุภาคแพลทินัมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและมีการรวมตัวเป็นกลุ่มที่มีขนาดที่เหมาะสมกว่าส่วนผสมอีกสองตัว โดยรูป (ข) เป็นส่วนผสมของ PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล ซึ่งจะเห็นว่าอนุภาคแพลทินัมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ แต่มีการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมที่ให้เป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งอาจมีขนาดที่ใหญ่เกินไป จึงทำให้พื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาลดลงประสิทธิภาพที่ได้เลยลดลงด้วย และเป็นส่วนผสมที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมทั้งหมด



(ก)



(ข)

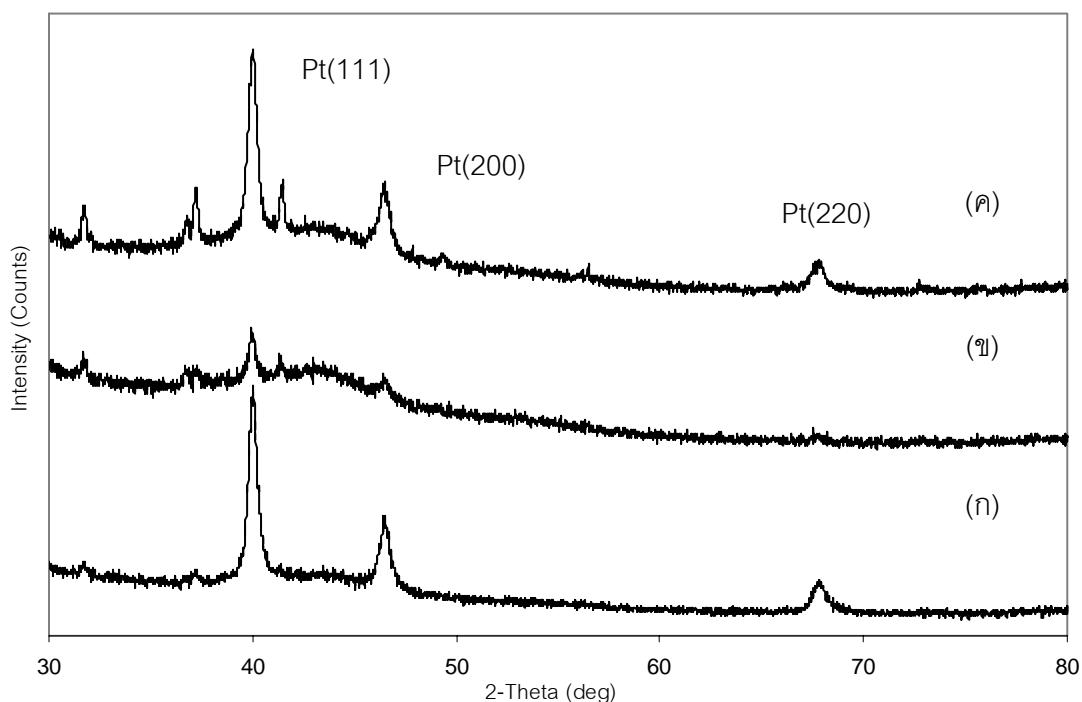


(ค)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของ ชั้นที่ขอบน้ำคือ: (ก) เนฟิออนกับกลีเซอรอล; (ข) PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; (ค) เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน

ส่วนรูปที่ 4.7 (ค) เป็นส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน โดยจากรูปจะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวบางส่วนที่ไม่มีการเกาะของแพลทินัมอีกทั้งการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมให้เป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้นก็มีน้อย ก็เลยทำให้ประสิทธิภาพได้น้อยแต่เมื่อเทียบระหว่างรูป (ข) และรูป (ค) จะเห็นว่ารูป (ข) มีการรวมตัวของแพลทินัมที่มีขนาดใหญ่มากซึ่งจะทำให้แก๊สที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยาเข้ามาทำได้ยากกว่าเมื่อเทียบกับรูป (ค) ดังนั้นจึงทำให้กราฟโพลาริเซชันลดลงในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น หรือในส่วนของกราฟถ่ายเทมวลสาร

รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากส่วนผสมของชั้นขอบน้ำต่างๆ โดยพีคของ Pt(111) Pt(200) และ Pt(220) แสดงในตำแหน่ง 2θ ที่ 40, 47 และ 68 ตามลำดับซึ่งจะมีพีคของคาร์บอนที่ขึ้นใกล้เคียงกับพีคของ Pt(111) ในตำแหน่ง 2θ ช่วง 30-40 (Antolini et al., 2006) โดยขนาดของอนุภาคผลึกแพลทินัม (crystal size) ที่พอกพูนได้คำนวณจากพีคของ Pt(111) สรุปได้ดังตารางที่ 4.7 พบว่าขนาดของอนุภาคแพลทินัมมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่จากรูป 4.7 พบว่ามีการจับรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ในกรณีส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอล และส่วนผสมของเนฟิออน กลีเซอรอล กับผงคาร์บอน ซึ่งจะเห็นว่าส่วนผสมทั้งสองมีองค์ประกอบหลักที่เป็นเนฟิออน ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยในการสัมผัสกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมกับตัวรองรับที่เป็นผงคาร์บอน ซึ่งจากการคำนวณหาขนาดจะเห็นว่าขนาดอนุภาคที่ได้ไม่ต่างกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยามีการป้อนกระแสไฟฟ้าที่เท่ากัน จึงทำให้ขนาดของอนุภาคแพลทินัมมีขนาดที่เท่ากัน ส่วนส่วนผสมของ PTFE ผงคาร์บอน กับกลีเซอรอล จะเห็นว่ามีขนาดอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ทั้งที่กระแสที่ใช้ป้อนในการพอกพูนเท่ากัน ขนาดอนุภาคที่ได้ก็ควรจะเท่ากัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ส่วนผสมที่ใช้ไม่มีองค์ประกอบของเนฟิออน ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยในการสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวรองรับ จึงทำให้การสัมผัสแย่และอาจทำให้อนุภาคมีการเกาะที่ไม่ดี หรือในขณะที่ทำการพอกพูน เมื่อพื้นที่ผิวในการเกาะสัมผัสไม่ดี ทำให้ขนาดอนุภาคที่จะมาเกาะที่พื้นผิวต้องมีขนาดเล็กลงเพื่อให้การเกาะดีขึ้นก็ได้ และเมื่อดูจากรูป SEM จะเห็นว่าอนุภาคแพลทินัมมีการเกาะรวมตัวที่มีขนาดใหญ่กว่าอีกสองส่วนผสม อาจเป็นเพราะในการยึดเกาะของอนุภาคแพลทินัมกับอนุภาคแพลทินัม จะมีการยึดเกาะที่ดีกว่าการยึดเกาะของอนุภาคแพลทินัมบนตัวรองรับ เนื่องจากที่กล่าวไปแล้วว่าไม่มีตัวของเนฟิออนที่ช่วยในการเพิ่มการสัมผัสระหว่างอนุภาคแพลทินัมกับตัวรองรับ



รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมโดยใช้ส่วนผสมของชั้นที่ขอบน้ำ: (ก) เนฟิออนกับกลีเซอรอล; (ข) PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; (ค) เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน

โดยผลของพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาก็สอดคล้องกับผลของโพลาริเซชันด้วยคือเมื่อมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากก็ทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดได้ดีด้วยประสิทธิภาพที่ได้ก็จะสูงขึ้นด้วย และยังสอดคล้องกับรูป SEM เมื่อดูจากรูป 4.7 (ข) จะเห็นว่าอนุภาคของแพลทินัมมีการรวมตัวที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับรูปอื่นๆ จึงทำให้พื้นที่ผิวที่ได้มีค่าที่น้อยที่สุด ส่วนรูป (ค) จะเห็นว่าอนุภาคของแพลทินัมมีการเกาะรวมตัวที่ขนาดเล็กกว่ารูป (ข) แต่มีการเกาะที่ไม่ทั่วพื้นที่ผิว พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จึงน้อยกว่ารูป (ก) ที่มีการรวมตัวของแพลทินัมที่มีขนาดเล็กและยังมีการกระจายที่สม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวค่าพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีค่าที่สูงที่สุด

ตารางที่ 4.7 ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของชั้นที่ชอบน้ำคือเนฟิออนกับกลีเซอรอล; PTFE กับผงคาร์บอน และกลีเซอรอล; เนฟิออนกับกลีเซอรอล และผงคาร์บอน

ส่วนผสมในชั้นที่ชอบน้ำ	XRD*	CV
	ขนาดอนุภาคแพลทินัม (nm)	พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (m ² /g)
Nafion:Glycerol	12.62	47.7
PTFE:CB:Glycerol	8.45	6.66
Nafion:Glycerol:CB	12.8	14.57

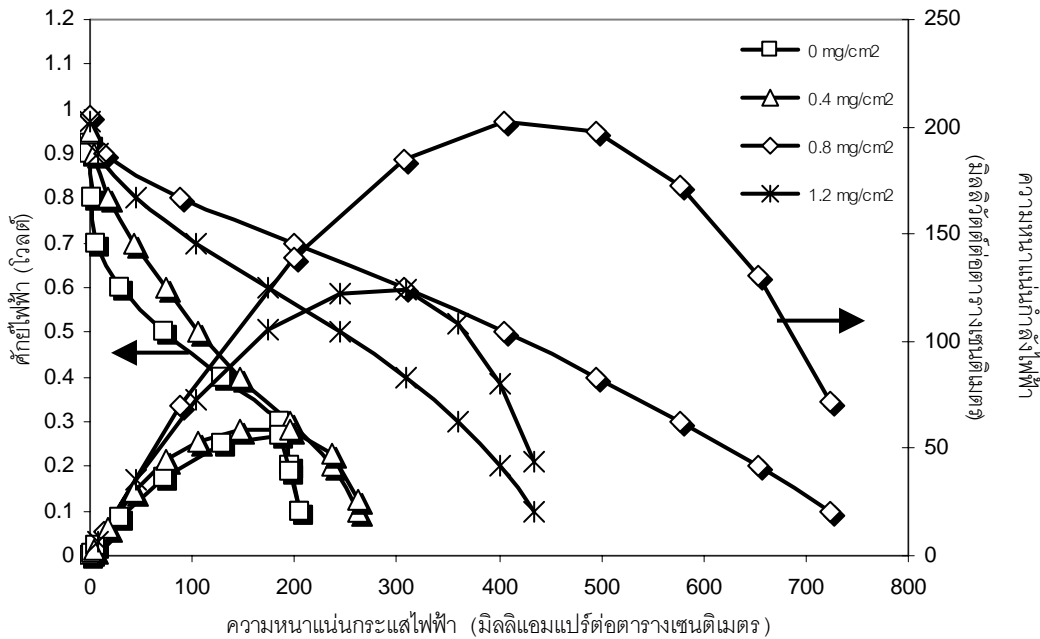
* ผลการวิเคราะห์ XRD คัดจาก Pt(111)

ดังนั้นส่วนผสมที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นที่ชอบน้ำคือส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอล ซึ่งเป็นส่วนผสมที่จะใช้ในการศึกษาเพื่อหาปริมาณของชั้นที่ชอบน้ำ และหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมต่อไป

4.2.1.2 ปริมาณชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer loading)

โดยองค์ประกอบของชั้นที่ชอบน้ำที่จะใช้เตรียม คือองค์ประกอบของเนฟิออนต่อกลีเซอรอล ซึ่งปริมาณของชั้นที่ชอบน้ำก็ย่อมจะมีผลต่อประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน เนื่องจากเป็นชั้นที่มีคุณสมบัติที่ชอบน้ำ และมีเนฟิออนเป็นองค์ประกอบหลัก ทำหน้าที่ช่วยให้โปรตอนที่เกิดจากการแตกตัวจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเพื่อทำปฏิกิริยารีดักชันที่ฝั่งแคโทด โดยจะมีการเติมกลีเซอรอล ซึ่งมีคุณสมบัติในการละลายน้ำผสมกับเนฟิออนเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการทาสารละลายให้ดียิ่งขึ้น (Improve paintability) (Chisaka and Daiguji, 2006) จึงได้ศึกษาปริมาณชั้นที่ชอบน้ำโดยทำการเตรียมชั้นที่ชอบน้ำที่ปริมาณ 0, 0.4, 0.8 และ 1.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอัตราส่วนระหว่างเนฟิออน ต่อกลีเซอรอลเป็น 50:50 และมีปริมาณชั้นที่ไม่ชอบน้ำเท่ากับที่ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากรูปที่ 4.9 และตาราง 4.8 จะพบว่าเอมีโอไอที่เตรียมจากขั้วไฟฟ้าโดยมีปริมาณชั้นที่ชอบน้ำในปริมาณ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรจะให้ประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณชั้นที่ชอบน้ำอื่นๆ และได้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ คือ 184.8 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.9 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเอ็มอีเอทีที่เตรียมจากข้อไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ขอบน้ำ

ตารางที่ 4.8 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของข้อไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ขอบน้ำ

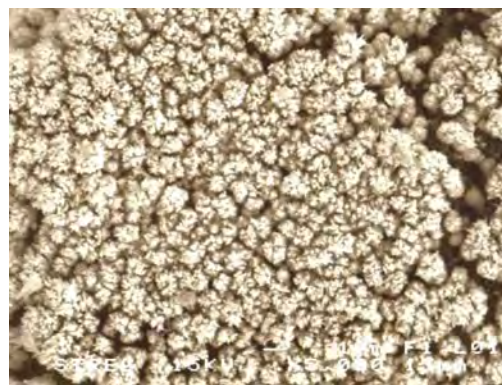
ปริมาณชั้นที่ขอบน้ำ (mg/cm ²)	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V)	
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (mW/cm ²)
0	30.16	18.1
0.4	74	44.4
0.8	308	184.8
1.2	175	105

เมื่อพิจารณาลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ดังแสดงจากภาพถ่าย SEM รูป 4.10 พบว่าปริมาณของชั้นที่ขอบน้ำจะส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ โดยใช้วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณชั้นที่ขอบน้ำมีผลต่อการพอกพูนของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม โดยชั้นที่ขอบน้ำจะมีคุณสมบัติความชอบน้ำ ที่มีผลต่อการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

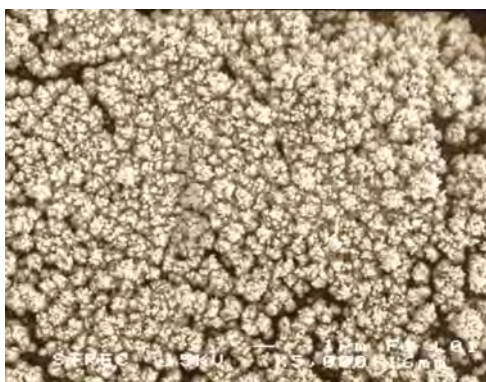
โดยรวมกว่า เช่น ถ้ามีชั้นที่ขอบน้ำก็จะเพิ่มคุณสมบัติการ wetting ของสารละลายแพลทินัมที่ใช้ในการพอกพูน ทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีการจับตัวที่ดีกว่า ไม่เป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่เกินไป แต่ถ้าไม่มีชั้นที่ขอบน้ำก็จะทำให้การ wetting ไม่ดี และทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดใหญ่ตั้งรูป (ก) เพราะว่าในขณะที่การพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมไอออนจะแพร่ผ่านชั้นของเนฟิออน และเกิดปฏิกิริยารีดักชันโลหะแพลทินัมที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนในบริเวณที่มีการนำไฟฟ้า และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสผงคาร์บอน อนุภาคโลหะแพลทินัมและเนฟิออน ซึ่งเป็นส่วนการสัมผัสกันทั้งสามเฟส (Three phase region) โดยที่ถ้าหากปริมาณเนฟิออนมีมากเกินไปจะส่งผลให้ชั้นเนฟิออนมีความหนามากขึ้น ทำให้การแพร่ผ่านของแพลทินัมไอออนเข้าสู่บริเวณผิวหน้าที่จะเกาะได้ยาก แต่ถ้าหากน้อยเกินไปจะทำให้การสัมผัสของสามเฟสนี้น้อยก็จะทำให้ส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยาลดน้อยลงด้วย และยิ่งถ้าไม่มีชั้นที่ขอบน้ำอยู่ตั้งรูป (ก) ก็พบว่าอนุภาคแพลทินัมมีการรวมตัวกันทำให้มีขนาดที่ใหญ่มาก และมีการรวมเป็นกลุ่มก้อนที่อัดแน่นเกินไป ซึ่งอาจทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาของแก๊สเกิดได้ยาก นอกจากนี้ถ้าไม่มีปริมาณของเนฟิออนก็จะทำให้การสัมผัสกันของสามเฟสไม่ดี เมื่อเกิดปฏิกิริยามีการแตกตัวได้โปรตอน โปรตอนที่เกิดขึ้นก็จะเคลื่อนที่ผ่านไปสู่ออกไซด์เมมเบรนได้ยากเมื่อไม่มีปริมาณของเนฟิออนอยู่ จึงทำให้ประสิทธิภาพที่ได้น้อย แต่เมื่อพิจารณา (ข) กับ (ค) จะเห็นว่ารูปมีลักษณะการรวมตัวของแพลทินัมที่ใกล้เคียงกันแต่รูป (ข) จะมีการรวมตัวที่ขนาดใหญ่มากกว่ารูป (ค) เพราะอาจยังมีปริมาณของเนฟิออนที่ยังไม่เพียงพอ ซึ่งกล่าวไปแล้วว่าเนฟิออนจะมีคุณสมบัติที่ขอบน้ำ และจะเป็นตัวช่วยการ wetting ในขณะที่ทำการพอกพูนด้วยไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่ทำการเตรียมพื้นผิวหน้าแล้ว โดยรูป (ค) จะมีการรวมตัวเป็นก้อนที่เล็กกว่าและมีการกระจายที่คลุมพื้นผิวอย่างทั่วถึงพื้นผิวดูเรียบสม่ำเสมอ จึงอาจทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีมากกว่ารูป (ข) ส่วนรูป (ง) จะมีลักษณะการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดเล็ก แต่ปกคลุมไม่ทั่วทั้งพื้นผิว เนื่องมาจากมีปริมาณของเนฟิออนที่มากเกินไปจึงทำให้การแพร่ผ่านของไอออนแพลทินัมเกิดได้ยากจึงทำให้อนุภาคเกาะรวมกันเป็นเม็ดซ้อนกันหนาแน่นขึ้นมาและอาจไม่ได้เกาะลงบนคาร์บอน คือเป็นการเกาะซ้อนๆ กันของอนุภาคแพลทินัมจึงทำให้การสัมผัสทั้งสามส่วนลดลงแต่ก็มีค่าที่ดีกว่าที่ปริมาณเนฟิออนที่น้อยเกินไป (Antolini et al., 1999)



(ก)



(ข)



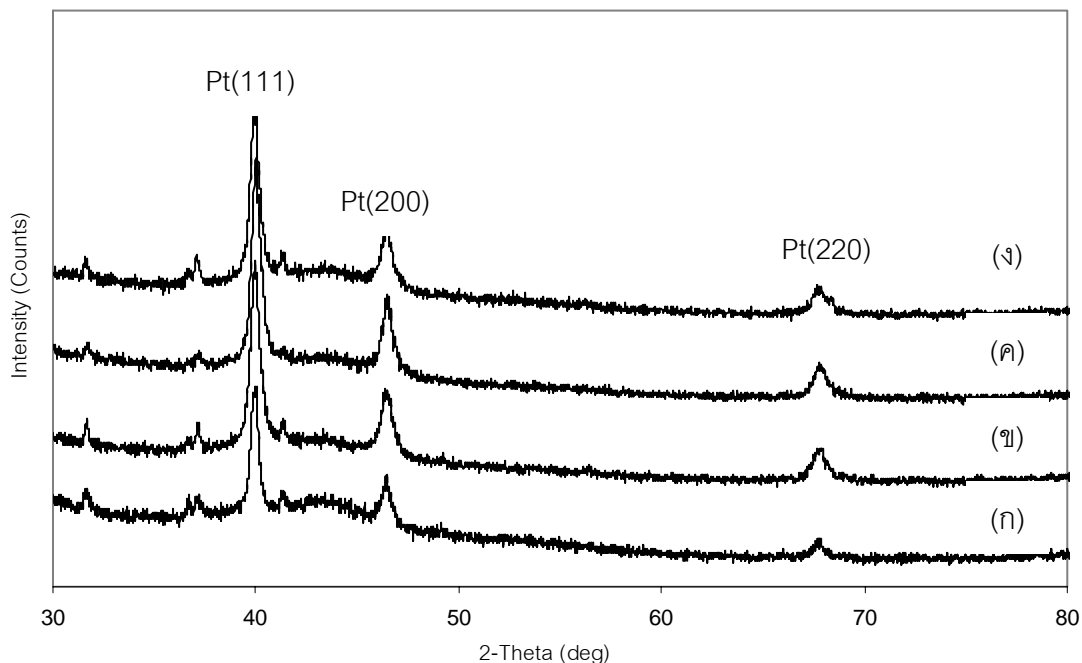
(ค)



(ง)

รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM (x5000) ของข้าวไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอล ซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ซอบน้ำ: (ก) 0; (ข) 0.4; (ค) 0.8; (ง) 1.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากรูป 4.11 และตาราง 4.9 เป็นการหาขนาดอนุภาคของแพลทินัมและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะพบว่าขนาดของอนุภาคแพลทินัมของข้าวไฟฟ้าที่เตรียมบนชั้นย่อยที่มีปริมาณชั้นที่ซอบน้ำที่แตกต่างกัน กลับมีขนาดอนุภาคแพลทินัมที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าปริมาณชั้นที่ซอบน้ำไม่ได้มีผลต่อขนาดอนุภาคของแพลทินัม แต่มีผลต่อการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมเป็นกลุ่มก้อนมากกว่าเมื่อดูจากรูป SEM และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาก็มีผลที่สอดคล้องกับผลของกราฟโพลาริเซชันคือเมื่อพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีมากปฏิกิริยาก็เกิดได้ดีประสิทธิภาพที่ได้ก็สูงตาม



รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ชอนน้ำ: (ก) 0; (ข) 0.4; (ค) 0.8; (ง) 1.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4.9 ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างของปริมาณชั้นที่ชอนน้ำ

ปริมาณชั้นที่ชอนน้ำ (mg/cm ²)	XRD*		CV
	ขนาดอนุภาคแพลทินัม (nm)	พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (m ² /g)	
0	12.62	5.54	
0.4	12.62	7.49	
0.8	12.62	47.7	
1.2	12.27	14.86	

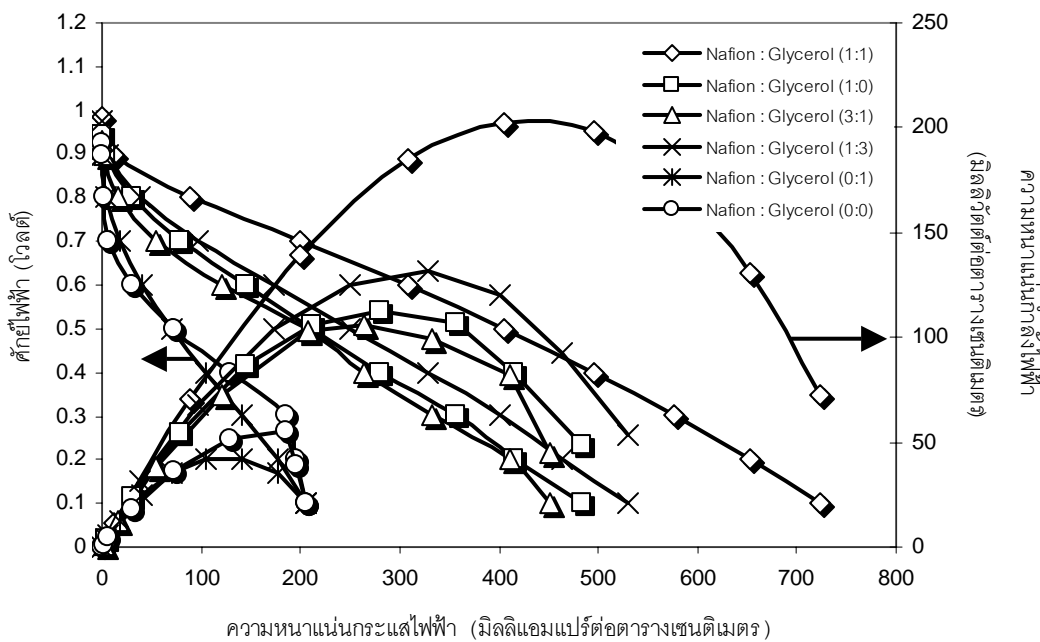
* ผลการวิเคราะห์ XRD คัดจาก Pt(111)

ดังนั้นส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลในชั้นที่ชอนน้ำที่มีปริมาณที่เหมาะสมต่อการเตรียมชั้นที่ชอนน้ำจึงเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4.2.1.3 สัดส่วนขององค์ประกอบในชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer ratio)

โดยส่วนที่จะศึกษาจะเป็นองค์ประกอบผสมระหว่างเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีปริมาณรวมเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยจะเป็นการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมของส่วนผสมนี้ จากไม่มีเนฟิออนจนมีแต่เนฟิออนอย่างเดียว โดยที่ 0:1 คือไม่มีเนฟิออนอยู่มีแต่กลีเซอรอลอย่างเดียว และ 1:0 คือมีแต่เนฟิออนอย่างเดียวเท่านั้นไม่มีกลีเซอรอล โดยมีปริมาณชั้นที่ไม่ชอบน้ำยังคงเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.10 พบว่าสัดส่วนระหว่างเนฟิออนต่อกลีเซอรอลที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดคือ สัดส่วน 50:50 และจะพบว่าสัดส่วนที่ไม่มีเนฟิออนผสมอยู่ (0:0 และ 0:1) ก็จะให้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุดด้วย แต่ถ้ามีแต่เนฟิออนไม่มีกลีเซอรอลอยู่ ประสิทธิภาพที่ได้ก็จะลดลงเมื่อเทียบกับที่มีปริมาณของกลีเซอรอลอยู่ในส่วนผสมด้วย



รูปที่ 4.12 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลมอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง

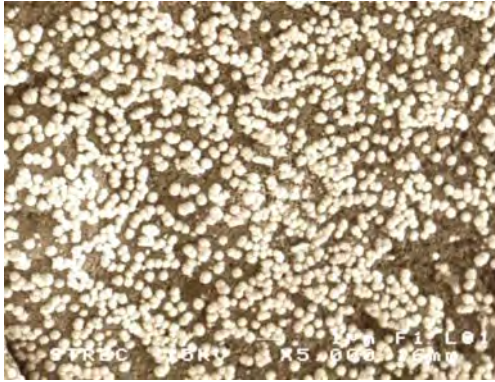
ตารางที่ 4.10 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง

สัดส่วนของ ชั้นที่ขอบน้ำ	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V)	
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า
เนฟิออน:กลีเซอรอล	(mA/cm ²)	(mW/cm ²)
1:0 (100:0)	144.6	86.76
3:1 (75:25)	121.4	72.84
1:1 (50:50)	308	184.8
1:3 (25:75)	173.4	104.04
0:1 (0:100)	40.6	24.36
0:0	30.16	18.1

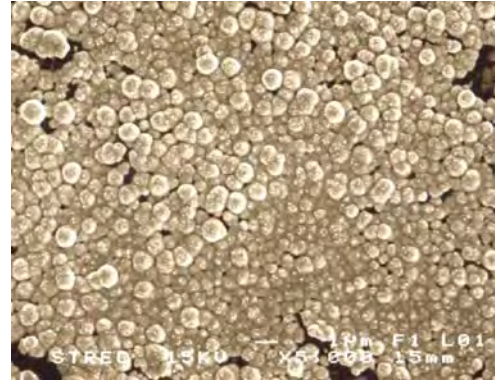
จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่ากรณีที่มีชั้นที่ขอบน้ำและสัดส่วนที่เหมาะสม จะส่งผลต่อการรวมตัวและการกระจายตัวของอนุภาคของแพลทินัม โดยจากรูป (ข) เป็นรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมบนชั้นย่อยที่ไม่มีชั้นที่ขอบน้ำอยู่จะเห็นว่าเมื่อไม่มีชั้นที่ขอบน้ำการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมจะมีขนาดที่เป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่มาก อาจเป็นเพราะว่าขาดคุณสมบัติความชอบน้ำจึงทำให้ในขณะทำการพอกพูนในสารละลายแพลทินัมด้วยไฟฟ้าพื้นผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามีการ wetting ที่ไม่ดีจึงทำให้อนุภาคแพลทินัมเกาะกันได้ไม่ดี ซึ่งอาจเป็นเพราะการสัมผัสกันระหว่างผงคาร์บอนบนชั้นที่ไม่ชอบน้ำกับตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมสัมผัสกันไม่ได้ดีเพราะไม่มีตัวช่วยเพิ่มการสัมผัส อนุภาคของแพลทินัมจึงรวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้พื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยาน้อย และอาจทำให้เกิดที่เข้ามาทำปฏิกิริยาเข้ามาได้ยาก ประสิทธิภาพที่ได้โดยนัยที่สุดจากนั้นทำการเตรียมสัดส่วนระหว่างเนฟิออนต่อกลีเซอรอลเป็น 0:100 ซึ่งก็คือมีแต่กลีเซอรอลไม่มีเนฟิออน ดังรูป (จ) อนุภาคมีการเกาะรวมตัวเป็นก้อนที่เรียงติดกันเป็นแผ่นแน่นเกินไปจึงทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยานี้น้อยเช่นกัน ซึ่งอาจเป็นเพราะตัวกลีเซอรอลมีความหนืดเพื่อช่วยคุณสมบัติในการทา เมื่อทำการทาลงบนชั้นที่ไม่ชอบน้ำ ในกรณีที่ไอออนของแพลทินัมจะแพร่เข้าไปเกาะกับผงคาร์บอนก็เลยแพร่เข้าไปได้ยากซึ่งทำให้แพลทินัมอาจเกาะรวมตัวกันเองที่บริเวณผิวหน้าที่มีกลีเซอรอลอยู่จึงเห็นเป็นก้อนๆที่เรียงติดกันอย่างเรียบเนียนอีกทั้งยังเป็นสัดส่วนที่ไม่มีเนฟิออนซึ่งเป็นตัวช่วยที่สำคัญในการสัมผัสกันระหว่างผงคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ไม่มีทางเดินของโปรตอนที่เกิดจากปฏิกิริยาไปสู่ชั้นเมมเบรนอย่างทั่วถึง (3-phase zone) ก็เลยทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้น้อย ซึ่งสัดส่วนในรูป (จ) และรูป (ข) จะเห็นว่าเป็นสัดส่วนที่ไม่มีเนฟิออนอยู่จึง

ทำให้อนุภาคแพลทินัมมีการรวมตัวที่มีขนาดใหญ่เกินไป ดังนั้นเนฟิออนจึงเป็นส่วนที่สำคัญ เพราะมีผลต่อการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัม อีกทั้งเนฟิออนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อชั้นที่ขอบน้ำเพราะเป็นส่วนที่ช่วยในการสัมผัสกันทั้งสามเฟส เป็นตัวช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมสัมผัสกับตัวรองรับคาร์บอน และเมมเบรนได้ดี และยังเป็นตัวที่ช่วยในการส่งผ่านโปรตอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ถ้าไม่มีเนฟิออนประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้ก็จะได้น้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากกราฟโพลาริเซชัน (Lee et al., 1998)

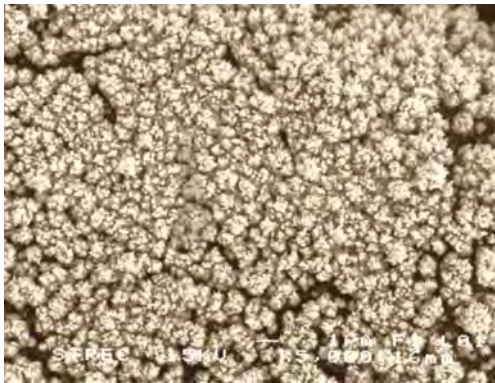
จากนั้นลองเตรียมชั้นที่ขอบน้ำให้มีสัดส่วนเป็น 100:0 คือมีแต่เนฟิออนไม่มีกลีเซอรอลจะได้ตามรูป (ก) จะเห็นว่าอนุภาคแพลทินัมมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ไม่ทั่วพื้นผิวแต่มีการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดเล็กซึ่งช่วยให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีมาก แต่ไม่เท่ากับสัดส่วนที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ ซึ่งกลีเซอรอลจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มสมบัติการทาเพราะว่าสารละลายเนฟิออนมีการระเหยที่เร็วจึงอาจทำให้ในขณะที่ทำการทาเนฟิออน บางส่วนมีการระเหยในขณะที่ทาจึงทำให้มีการกระจายของเนฟิออนไม่ทั่วพื้นผิว อนุภาคแพลทินัมจึงเกาะได้ไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อมีการผสมกลีเซอรอลซึ่งมีความหนืดจึงเป็นตัวที่ช่วยในการทาจึงทำให้เนฟิออนมีการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอมากกว่าที่ไม่มีกลีเซอรอลโดยจากรูปจะเห็นว่าอนุภาคแพลทินัมเกาะเป็นจุดๆ ตามบริเวณพื้นผิวแต่ไม่ทั่วซึ่งอาจจะเกาะอยู่ตามบริเวณที่มีเนฟิออนอยู่เท่านั้น ส่วนรูป (ค) และรูป (ง) มีลักษณะรูปที่คล้ายกันคือมีการกระจายตัวของอนุภาคแพลทินัมที่เหมือนกันต่างกันว่า (ง) จะมีการรวมตัวกันเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่กว่า (ค) ซึ่งอาจมาจากเพราะมีปริมาณกลีเซอรอลที่มากกว่าเลยทำให้อนุภาคแพลทินัมเกาะเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจึงมีน้อยกว่าประสิทธิภาพที่ได้เลยน้อยกว่ารูป (ค) ส่วนรูป (ข) จะเป็นสัดส่วน 75:25 ซึ่งมีปริมาณของเนฟิออนที่มากและอาจเป็นปริมาณที่มากเกินไป เพราะจากรูปจะเห็นว่าอนุภาคมีการรวมตัวเป็นขนาดใหญ่เช่นกันจึงทำให้ประสิทธิภาพที่ได้น้อย



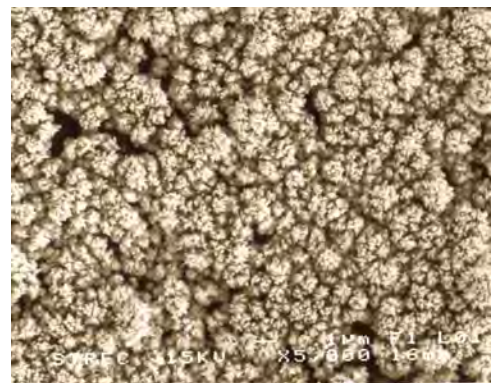
(ก)



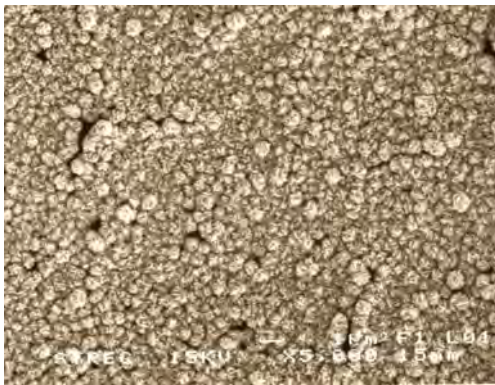
(ข)



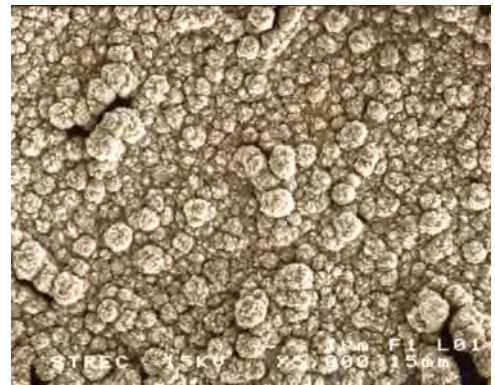
(ค)



(ง)



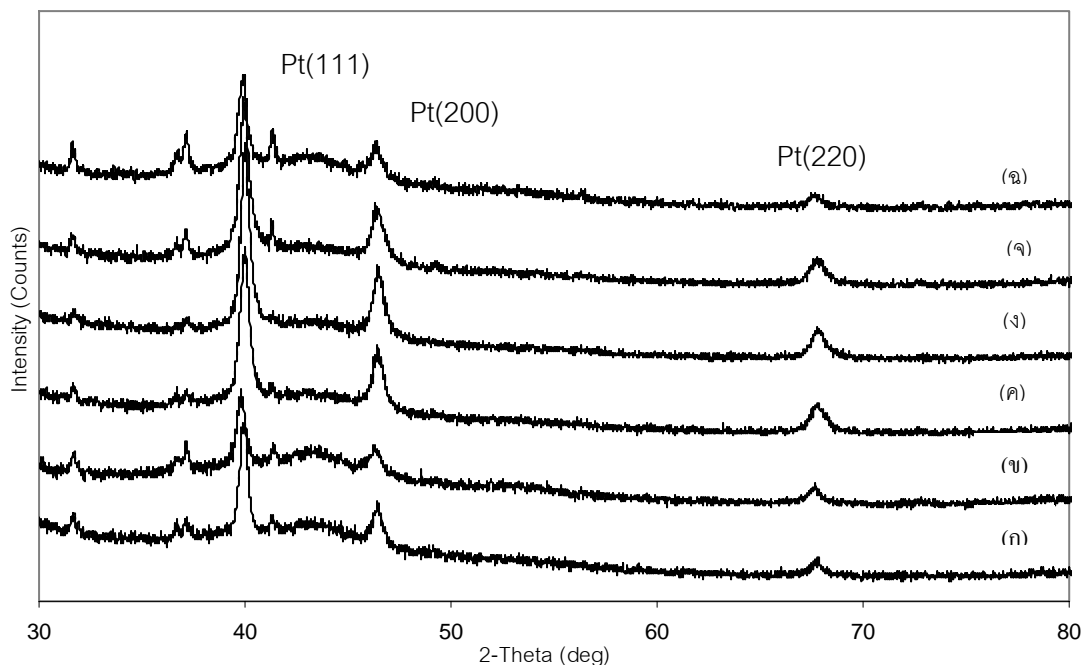
(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอล ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง: (ก) 100:0; (ข) 75:25; (ค) 50:50; (ง) 25:75; (จ) 0:100; (ฉ) 0:0

จากรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าขนาดอนุภาคแพลทินัมที่หาจาก XRD มีขนาดที่ใกล้เคียงกันไม่ว่าจะเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวของชั้นย่อยที่ขอบน้ำในสัดส่วนที่ต่างกัน แสดงว่าสัดส่วนของส่วนผสมในชั้นที่ขอบน้ำไม่มีผลต่อขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแต่จะส่งผลต่อการรวมตัวกันของอนุภาคแพลทินัมโดยดูจากรูป SEM ส่วนพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจะเห็นว่ามีความที่ต่างกันซึ่งอาจมีผลมาจากการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคแพลทินัมที่แตกต่างบนผิวที่มีการเตรียมสัดส่วนของเนฟิออนต่อกลีเซอรอลที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลให้การเกาะรวมตัวกันของอนุภาคแพลทินัมมีขนาดที่ใหญ่เล็กแตกต่างกัน อีกทั้งยังทำให้อนุภาคมีการเกาะลงบนพื้นผิวให้มีความสม่ำเสมอที่ไม่เหมือนกัน โดยส่วนที่กล่าวมานี้จะส่งผลต่อพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มีความที่ต่างกันออกไป (Passalacqua et al., 2001)



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง: (ก) 100:0; (ข) 75:25; (ค) 50:50; (ง) 25:75; (จ) 0:100; (ฉ) 0:0

ตารางที่ 4.11 ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลซึ่งมีความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมทั้งสอง

สัดส่วนของ ชั้นที่ชอบน้ำ เนฟิออน:กลีเซอรอล	XRD*	CV
	ขนาดอนุภาคแพลทินัม (nm)	พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (m ² /g)
1:0 (100:0)	10.33	6.54
3:1 (75:25)	11.7	12.04
1:1 (50:50)	12.62	47.7
1:3 (25:75)	12.02	11.66
0:1 (0:100)	11.32	6.28
0:0	12.62	5.54

* ผลการวิเคราะห์ XRD คัดจาก Pt(111)

ดังนั้นจะเห็นว่าสัดส่วนของชั้นที่ชอบน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเกาะของอนุภาคแพลทินัมบนพื้นผิวของชั้นย่อยหรือการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมโดยสัดส่วนของชั้นที่ชอบน้ำซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างเนฟิออนกับกลีเซอรอลที่ทำให้มีการกระจายตัวและการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมที่เหมาะสมที่สุดคือ 50:50

4.2.2 ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer)

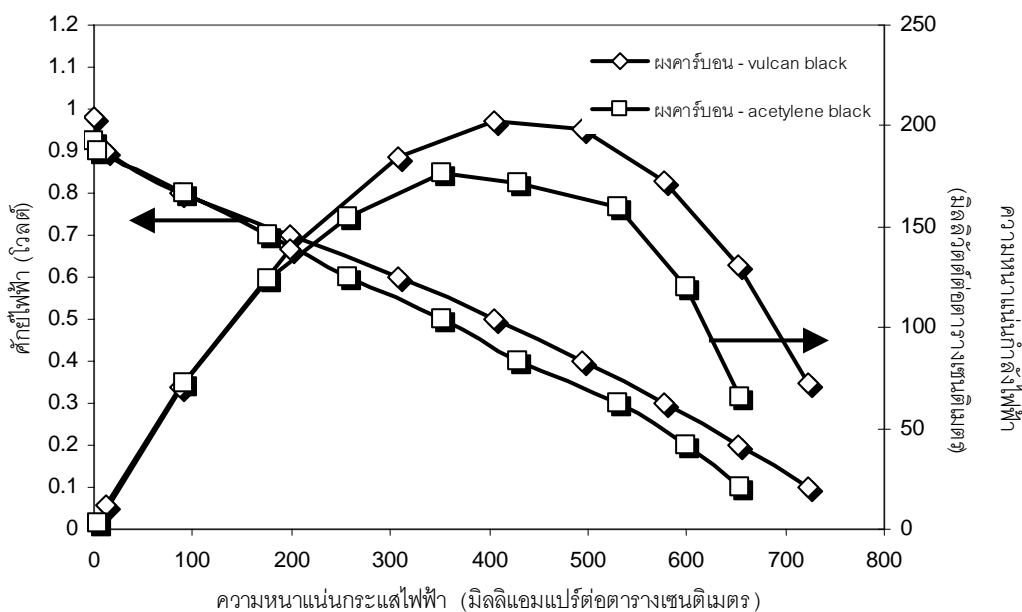
เป็นชั้นที่ช่วยในการจัดการน้ำเพราะถ้าไม่มีชั้นที่ไม่ชอบน้ำ หากเกิดปฏิกิริยาก็จะมีน้ำเกิดขึ้น และน้ำก็จะไปปิดกั้นแก๊สในการเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะศึกษาชนิดของผงคาร์บอนที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลักในการผสมกับ PTFE และศึกษาถึงสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน

4.2.2.1 ชนิดของผงคาร์บอน

องค์ประกอบของชั้นที่ไม่ชอบน้ำประกอบด้วย สารละลาย PTFE และผงคาร์บอน ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาถึงชนิดของผงคาร์บอนที่ใช้เป็นส่วนประกอบในชั้นที่ไม่ชอบน้ำโดยเทียบระหว่างผงคาร์บอนชนิด Vulcan และ Acetylene black ซึ่งมีปริมาณชั้นที่ไม่ชอบน้ำรวมเท่ากับ

1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีส่วนผสมของชั้นที่ขอบน้ำคือเนฟิออนกับกลีเซอรอลในปริมาณ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในสัดส่วน 50:50

จากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.12 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกันแต่ผงคาร์บอนชนิด Vulcan จะให้ค่าที่สูงกว่าในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพที่ได้จากโพลาริเซชันจะเห็นว่าผงคาร์บอนที่ใช้แตกต่างกันก็ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ โดยผลที่ได้จะแตกต่างกันในช่วงกราฟซึ่งเป็นส่วนของความต้านทาน ซึ่งอาจมีผลมาจากผงคาร์บอนที่ใช้มีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน ทำให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนต่างกันด้วย จึงทำให้มีความต้านทานในส่วนนี้เกิดขึ้น (Jian-hua et al., 2008)

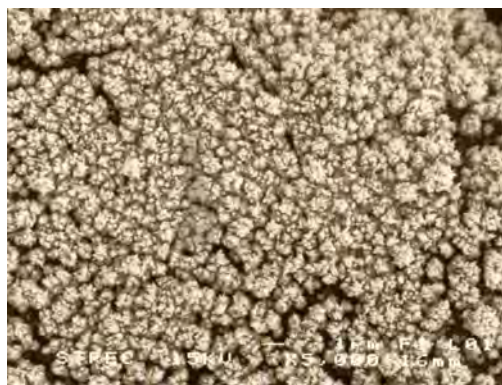


รูปที่ 4.15 กราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยเปรียบเทียบชนิดของผงคาร์บอนในชั้นที่ไม่ขอบน้ำระหว่าง Vulcan และ Acetylene black

ตารางที่ 4.12 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเปรียบเทียบชนิดของผงคาร์บอนในชั้นที่ไม่ชอบน้ำระหว่าง Vulcan และ Acetylene black

ชนิดของผงคาร์บอน	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V)	
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า
	(mA/cm ²)	(mW/cm ²)
Vulcan	308	184.8
Acetylene black	257.4	154.44

จากรูปที่ 4.16 พบว่าการกระจายตัวของพื้นผิวและการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมบนชั้นย่อยมีลักษณะที่ต่างกัน โดยรูป (ก) เป็นการใช้ผงคาร์บอนชนิด Vulcan ในชั้นย่อยซึ่งจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและการรวมของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดที่เหมาะสมกว่ารูป (ข) ที่มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอไม่ปกคลุมทั่วพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ามีการเกาะเป็นกลุ่มก้อนการจัดกระจายอาจเพราะว่าผงคาร์บอนที่ใช้อาจมีพื้นผิวที่แตกต่างกันทำให้ผลต่อการเกาะของแพลทินัมซึ่งเลยได้ลักษณะที่ต่างกันได้ด้วย



(ก)



(ข)

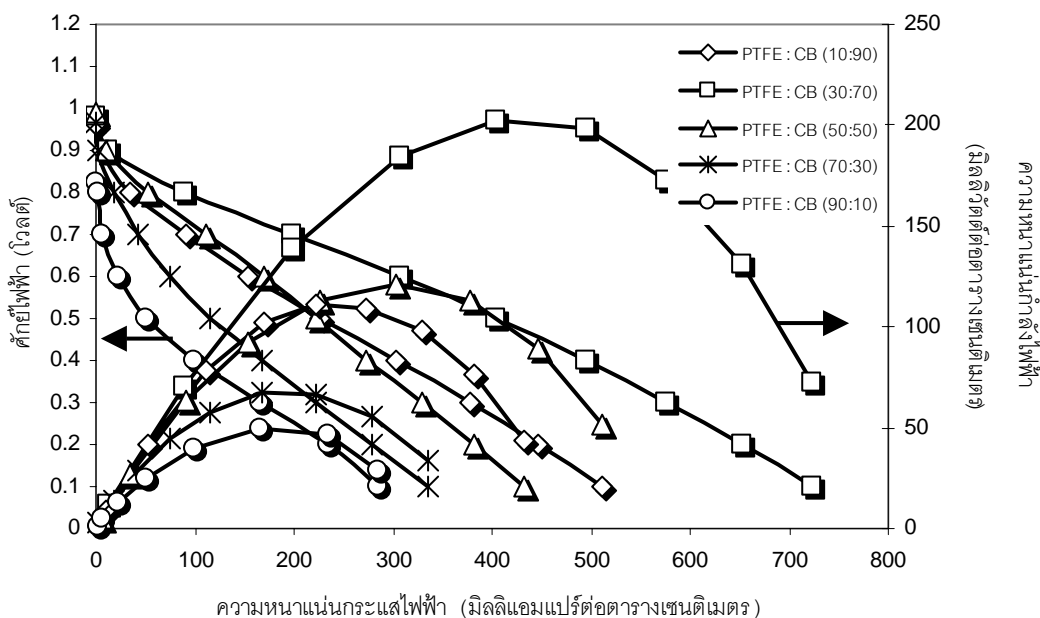
รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ส่วนผสมของ PTFE กับผงคาร์บอน ซึ่งทำการเปรียบเทียบชนิดของผงคาร์บอนระหว่าง: (ก) Vulcan; (ข) Acetylene black

ดังนั้นในการเตรียมชั้นที่ไม่ชอบน้ำซึ่งมีองค์ประกอบของ PTFE และผงคาร์บอน โดยมีปริมาณเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผงคาร์บอนที่เหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมคือ ผงคาร์บอนชนิด Vulcan

4.2.2.2 สัดส่วนของชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer ratio)

ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างสารละลาย PTFE และผงคาร์บอนโดยให้มีปริมาณชั้นที่ไม่ชอบน้ำเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยทำการเตรียมสัดส่วน PTFE:ผงคาร์บอน ตั้งแต่ 10:90 จนถึง 90:10 และให้มีปริมาณชั้นที่ชอบน้ำเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเป็นส่วนผสมระหว่างเนฟลอนกับกลีเซอรอล ในสัดส่วน 50:50

จากรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.13 พบว่าสัดส่วนของส่วนผสมในชั้นที่ไม่ชอบน้ำระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอนมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งสัดส่วนระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอนที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ PTFE:ผงคาร์บอน (30:70) โดยสัดส่วนที่มี PTFE:ผงคาร์บอน (90:10) จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดอาจเป็นเพราะมีปริมาณของผงคาร์บอนที่น้อยเกินไปทำให้พื้นที่ผิวในการที่อนุภาคแพลทินัมจะมาเกาะก็น้อยตามไปด้วย และก็ยังทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพที่ได้จึงน้อยที่สุด แต่ถ้าปริมาณของผงคาร์บอนมากเกินไปก็อาจทำให้ชั้นย่อยที่ทำการเตรียมมีความหนามากเกินไป ส่งผลให้แก๊สที่จะผ่านเข้ามาทำปฏิกิริยาแพร่ผ่านเข้ามาได้ยาก เนื่องจากชั้นคาร์บอนที่มีความหนามากเกินไป



รูปที่ 4.17 กราฟโพลาริเซชันของเอ็มเอเอที่เตรียมจากขี้เถ้าไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน

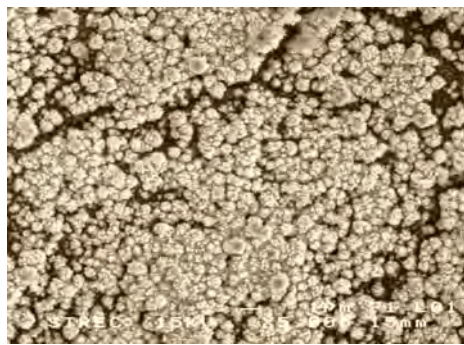
ตารางที่ 4.13 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยหาคัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน

สัดส่วนของ ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V)	
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (mW/cm ²)
PTFE:ผงคาร์บอน		
10:90	154	92.4
30:70	308	184.8
50:50	170	102
70:30	74	44.4
90:10	21.4	12.84

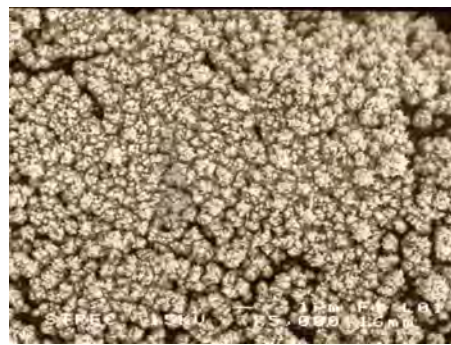
แต่เมื่อปริมาณ PTFE เพิ่มขึ้นจาก 30 จนถึง 90 และเมื่อปริมาณผงคาร์บอนลดลงจาก 70 เป็น 10 ประสิทธิภาพที่ได้ก็จะลดลงตามลำดับเช่นกัน ซึ่งอาจเกิดจากการที่พื้นที่ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมาเกาะน้อยลงตามปริมาณผงคาร์บอน ทำให้พื้นที่สัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลงตามไปด้วย (Song et al., 2001; Park et al., 2006)

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าปริมาณของผงคาร์บอนต่อ PTFE มีผลต่อการเกาะของอนุภาคแพลทินัมโดยเมื่อดูจากภาพรวมจากรูป (ก) ถึงรูป (ค) จะมีขนาดการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดเล็กใกล้เคียงกันแต่เมื่อปริมาณของผงคาร์บอนมีมากขึ้นเกินร้อยละ 50 ขนาดการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมจะมีการรวมที่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นซึ่งอาจเป็นผลมาจากพื้นที่ที่ผงคาร์บอนจะให้อนุภาคแพลทินัมมาเกาะมีพื้นที่ที่น้อยลงจึงทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพที่ได้ลดลง โดยจากรูป (ก) ซึ่งมีปริมาณของผงคาร์บอนที่มากที่สุดทำให้ชั้นย่อยมีความหนาแน่นมาก และผงคาร์บอนที่มีความเป็นรูพรุนสูงอาจเกาะกันแน่นเกินไปทำให้ความเป็นรูพรุนลดลงและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมเข้ามาเกาะได้น้อยลงดังรูปซึ่งจะเห็นว่าอนุภาคแพลทินัมมีการเกาะไม่ทั่วพื้นผิวของชั้นย่อย และเมื่อเปรียบเทียบรูป (ข) (ค) (ง) และ (จ) ซึ่งมีปริมาณของผงคาร์บอนที่ลดลงตามลำดับจะเห็นว่าอนุภาคแพลทินัมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอเท่าๆ กันแต่มีการรวมตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นแตกต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าอนุภาคแพลทินัมมีการรวมตัวของอนุภาคเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้นตามลำดับของปริมาณผงคาร์บอนที่ลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณผงคาร์บอนที่น้อยลงทำให้พื้นที่ผิวในการที่อนุภาคแพลทินัมจะมาเกาะก็จะน้อยลง จึงทำให้อนุภาคของแพลทินัมจำเป็นต้องเกาะรวมตัวกันเองมากกว่าจึงทำให้มีอนุภาคที่รวมกันเป็นขนาดที่ใหญ่ขึ้นนั่นเอง โดยปริมาณของ PTFE ซึ่งถ้ามีปริมาณที่มากเกินไปอย่างในสัดส่วน

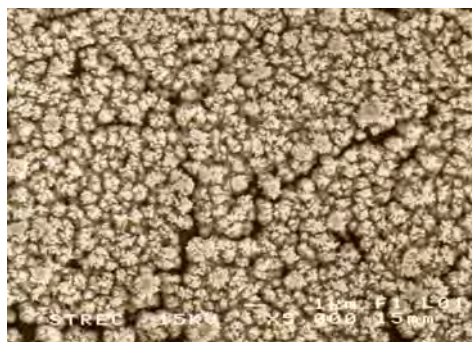
ส่วน 90:10 ก็จะทำให้ขั้วไฟฟ้ามีความต้านทานมากเกินไป ซึ่งคุณสมบัติของ PTFE คือมีความไม่ชอบน้ำ และอาจทำให้เซลล์แห้งเกินไป ปฏิกริยาที่จะเกิดก็จะเกิดได้น้อยลงซึ่งก็สอดคล้องกับผลของโพลาริเซชันที่เป็นเส้นที่ได้ประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุด แต่ถ้าไม่มีปริมาณของ PTFE หรือมีปริมาณที่น้อยเกินไป ก็จะทำให้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมไม่มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ป้องกันไม่ให้น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเข้าท่วมเซลล์ ก็อาจจะทำให้น้ำท่วมเซลล์ได้ประสิทธิภาพที่ได้ก็จะลดลงเช่นกัน (Nakajima et al., 2007)



(ก)



(ข)



(ค)



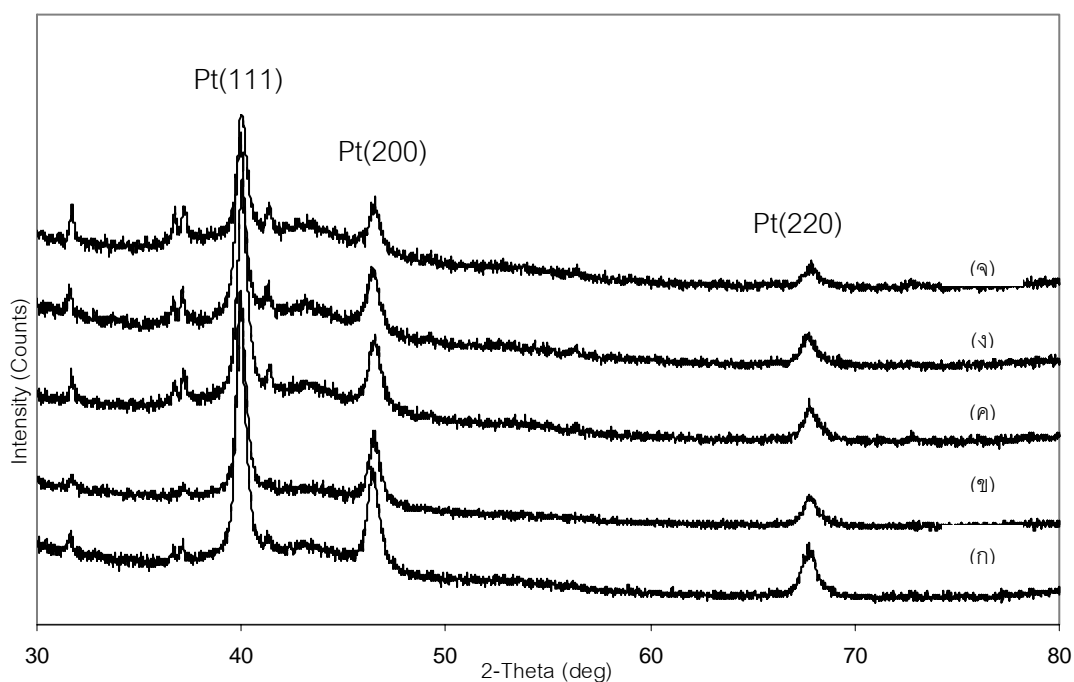
(ง)



(จ)

รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน: (ก) 10:90; (ข) 30:70; (ค) 50:50; (ง) 70:30; (จ) 90:10

จากรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.14 พบว่าขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมบนชั้นย่อยที่มีสัดส่วนของชั้นที่ไม่ชอบน้ำที่แตกต่างกันมีขนาดที่ใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าสภาวะที่ใช้ในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนกันก็เลยทำให้อนุภาคแพลทินัมที่ได้มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาก็สอดคล้องกับผลของโพลาริเซชัน ซึ่งเมื่อปริมาณของผงคาร์บอนลดลงจาก 70 เป็น 10 จะเห็นว่าจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยลง ดังที่กล่าวไปแล้วว่าเมื่อปริมาณของผงคาร์บอนน้อยลงก็ทำให้พื้นที่ผิวที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจะมากก็จะน้อยลงด้วย ทำให้มีการเกาะรวมของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งก็จะทำให้พื้นที่ผิวในการที่จะเกิดปฏิกิริยาน้อยลงตามไปด้วยและเมื่อปริมาณผงคาร์บอนมีปริมาณที่มากเกินไปก็ทำให้การเกาะของแพลทินัมบนชั้นย่อยน้อยลงเช่นกันเนื่องจากปริมาณผงคาร์บอนที่มากเกินไปก็ทำให้ชั้นย่อยมีความหนาที่มาก ส่งผลให้แพลทินัมสามารถเคลื่อนที่เข้าไปเกาะกับผงคาร์บอนได้ยากจึงทำให้การเกาะเกิดได้ไม่ดีนักจึงมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่น้อย พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจึงน้อยลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมโดยหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน: (ก) 10:90; (ข) 30:70; (ค) 50:50; (ง) 70:30; (จ) 90:10

ตารางที่ 4.14 ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยหาคัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน

สัดส่วนของ ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ	XRD*	CV
	ขนาดอนุภาคแพลทินัม	พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา
PTFE:ผงคาร์บอน	(nm)	(m ² /g)
10:90	13.28	9.25
30:70	12.62	47.7
50:50	12.9	10.14
70:30	12.1	1.94
90:10	10.91	0.68

* ผลการวิเคราะห์ XRD คัดจาก Pt(111)

ดังนั้นสัดส่วนระหว่าง PTFE ต่อผงคาร์บอนที่จะใช้ในการเตรียมชั้นย่อยที่ไม่ชอบน้ำให้มีปริมาณ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเหมาะสมต่อการเตรียมให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดที่เหมาะสม และสม่ำเสมอที่สุดคือ 30:70

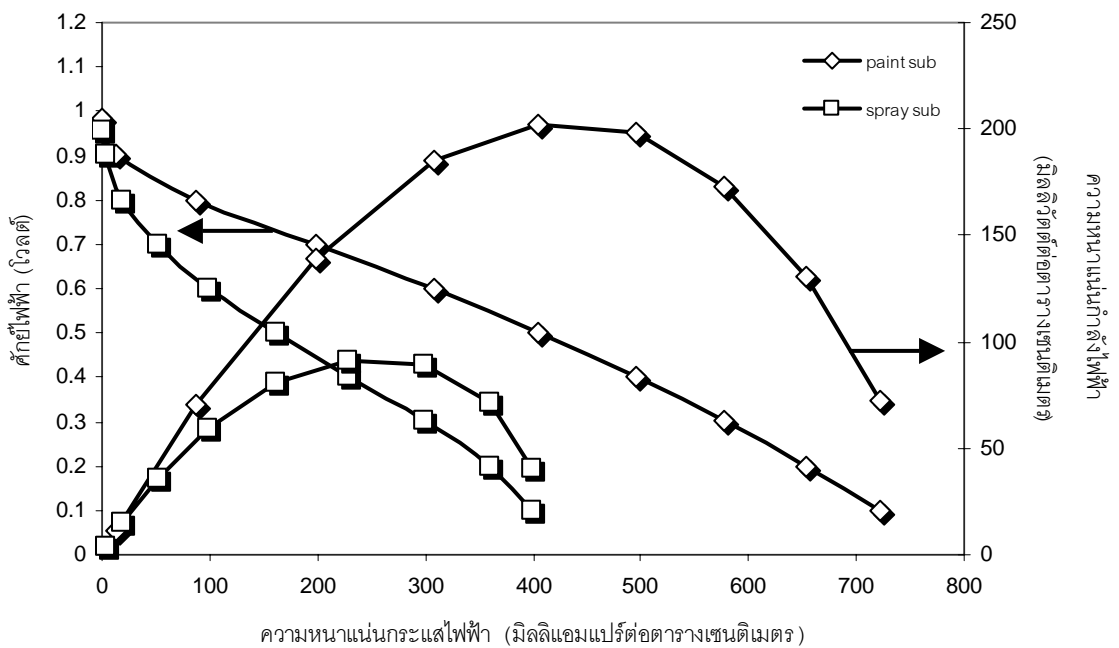
4.3 ปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมขั้วไฟฟ้า

ซึ่งจะศึกษาในส่วนวิธีการเตรียมชั้นย่อยโดยวิธีการทา (Paint) เพื่อเทียบกับการเตรียมชั้นย่อยด้วยวิธีการสเปรย์ (Spray) ก่อนการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า

โดยจะทำการเตรียมชั้นย่อยด้วยวิธีการสเปรย์แทนการทาทั้งชั้นที่ไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นส่วนผสมของ PTFE กับผงคาร์บอนในปริมาณ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในสัดส่วนของ PTFE ต่อผงคาร์บอน (30:70) และชั้นที่ชอบน้ำซึ่งเป็นส่วนผสมของเนฟลอนกับกลีเซอรอลในปริมาณ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในสัดส่วนของ เนฟลอนต่อกลีเซอรอล (50:50) จากนั้นทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบคงที่ โดยทำการพอกพูนในสารละลายไฮโดรเจนเฮกซะคลอโรแพลทินิก (H₂PtCl₆.6H₂O) เข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร ควบคุมที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

จากรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.15 พบว่าการเตรียมชั้นย่อยด้วยวิธีการทาจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าการเตรียมชั้นย่อยด้วยวิธีการ

สเปรย์ ซึ่งในการเตรียมสารทั้งชั้นที่ไม่ชอบน้ำและชั้นที่ชอบน้ำจะทำการเตรียมสารที่เหมือนกันแต่วิธีการใช้จะแตกต่างกันโดยในวิธีการทาจะใช้ฟู่กันทาลงบนชั้นแพร์ผ่านของแก๊สที่เป็นผ้าคาร์บอน ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของสารจะขึ้นอยู่กับลักษณะการทาและเป็นตามแนวที่ทาของฟู่กัน ส่วนการสเปรย์จะใช้หัวสเปรย์และเครื่องพ่นซึ่งจะทำให้สารมีการกระจายลงบนผ้าคาร์บอนซึ่งลักษณะการกระจายของสารขึ้นกับความดันที่ปรับ ระยะระหว่างหัวสเปรย์และแผ่นผ้าคาร์บอน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งนั้น (Lee et al., 2004)

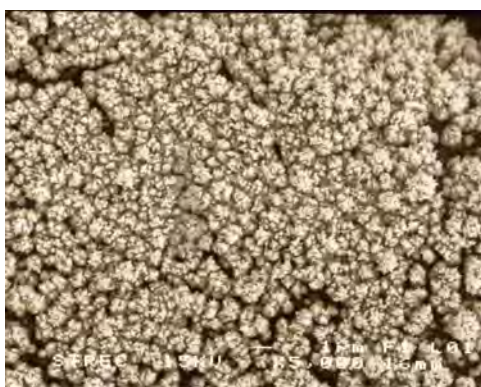


รูปที่ 4.20 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเอ็มอีเอทีเตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตรโดยเปรียบเทียบวิธีการเตรียมชั้นย่อย

ตารางที่ 4.15 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเปรียบเทียบวิธีการเตรียมชั้นย่อย

วิธีการเตรียมชั้นย่อย	สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง (ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V)	
	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm ²)	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (mW/cm ²)
การทา	308	184.8
การสเปรย์	98	58.8

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าการเตรียมชั้นย่อยด้วยวิธีการทาจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ และมีการเกาะรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดที่เหมาะสมกว่าการเตรียมชั้นย่อยด้วยวิธีการสเปรย์ดังรูป (ข) ซึ่งเป็นการเตรียมชั้นย่อยด้วยวิธีการสเปรย์จะมีการกระจายตัวที่ไม่เต็มพื้นผิวและยังมีการเกาะรวมตัวของอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดที่ใหญ่กว่าการเตรียมด้วยวิธีการทาอาจเนื่องมาจากการสเปรย์อาจทำให้สารที่ใช้เป็นชั้นย่อยมีการกระจายตัว ไม่สม่ำเสมอ และอาจมีการระเหยของสารในขณะทำการสเปรย์ เพราะอาจเกิดจากปัจจัยที่กล่าวไปข้างต้น ในขณะที่การทาจะทำให้มีการกระจายตัวของสารที่สม่ำเสมอมากกว่าจึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีการเกาะบนพื้นผิวที่มีการเตรียมที่ดีกว่านั่นเอง



(ก)



(ข)

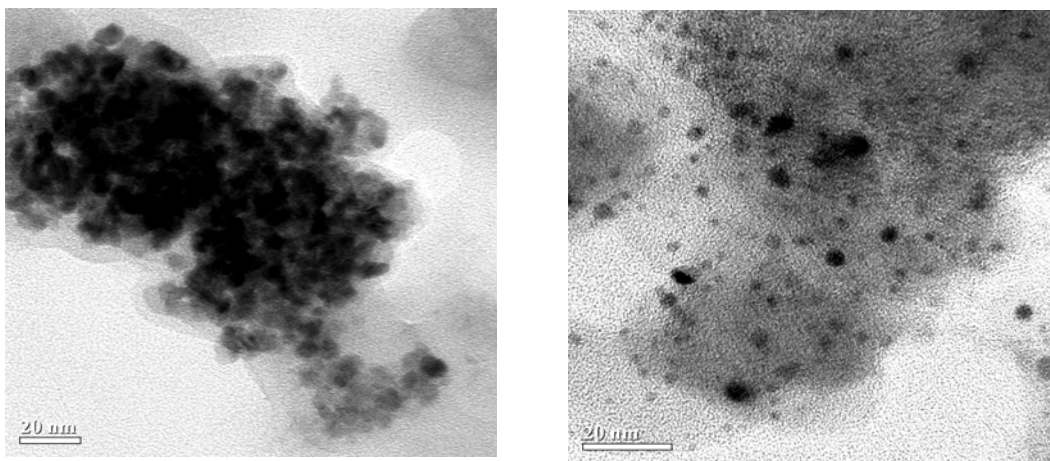
รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย SEM (x5000) ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเปรียบเทียบวิธีการเตรียมชั้นย่อยระหว่าง: (ก) การทา; (ข) การสเปรย์

ดังนั้นเทคนิคในการเตรียมชั้นย่อยก็มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ด้วยเช่นกัน ซึ่งเทคนิคในการเตรียมชั้นย่อยทั้งในส่วนของชั้นที่ไม่ชอบน้ำ และชั้นที่ชอบน้ำที่เหมาะสมก่อนการนำไปเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า คือเทคนิคการทา

4.4 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

ขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัมของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบคงที่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ประจุไฟฟ้าเท่ากับ 2 คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมทางการค้า Pt/C 10%wt. สามารถแสดงได้จากภาพถ่าย TEM ดังรูป 4.22 และตารางที่ 4.16 ซึ่งพบว่าอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้ามีการกระจายตัวที่ดีกว่า และมีขนาดเล็กกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียม

เองโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ซึ่งขนาดอนุภาคของแพลทินัมย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพของ เซลล์ นอกจากนี้ยังแสดงว่า ขนาดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค TEM และ XRD มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย TEM แสดงขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัม: (ก) ที่เตรียมโดยการพอกพูน ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 10 mA/cm^2 , 2 C/cm^2 ; (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า Pt/C 10%wt.

ตารางที่ 4.16 ขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัมจากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค TEM และ XRD

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัม	ขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัม (นาโนเมตร)	
	TEM	XRD*
พอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่	11 ± 3	12.62
ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า	3 ± 3	2.53

* ผลการวิเคราะห์ XRD คัดจาก Pt(111)

การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยในอดีตที่ทำการเตรียมชั้นย่อย และชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันแสดงได้ดังตารางที่ 4.17 ซึ่งวิธีการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะใช้นอกจากการพอกพูนด้วยไฟฟ้าจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าในการเตรียมส่วนใหญ่ จึงได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอง ก็สอดคล้องกับผลของ TEM เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้ามีขนาดอนุภาคแพลทินัมที่มีขนาดเล็กกว่าจึงทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า และมีการกระจายตัวที่ดีกว่าการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเอง

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 V กับงานวิจัยอื่นๆ

ผู้วิจัย	การเตรียมชั้นย่อย		การเตรียมชั้นตัว เร่งปฏิกิริยา	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 0.6 V (mA/cm ²)
	ชั้น Hydrophobic	ชั้น Hydrophilic		
Choi และ คณะ (1998)	/	x	electrodeposition (Direct Current)	420
			electrodeposition (Pulse Current)	460
Lee และคณะ (1998)	/	x	rolling	900
Kim และคณะ (2004)	/	/	electrodeposition (Direct Current)	780
			electrodeposition (Pulse Current)	1580
Lee และคณะ (2004)	/	x	spraying	730
Park และ คณะ (2006)	/	x	spraying	820
Chen-Yang และคณะ (2007)	/	x	brushing	1270
งานวิจัยนี้	/	/	electrodeposition (Direct Current)	308

แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้ามีราคาแพงดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความเหมาะสมทั้งขนาด และราคา เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งจากตารางที่ 4.17 จะเห็นว่าไม่ใช่แค่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เท่านั้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง แต่ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยไม่ว่าจะเป็น วิธีการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ชั้นย่อย (องค์ประกอบ ส่วนผสมที่ใช้ สัดส่วน) เป็นต้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมชั้นย่อย (Sublayer) เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) แพลทินัมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบคงที่ (Direct current electrodeposition; DC) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ควบคุมปริมาณ และลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างมีมาตรฐาน และรวดเร็ว โดยให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการพอกพูนเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเท่ากับ 2 คูมอมปีต่อตารางเซนติเมตร ทำในสารละลาย $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 0.02 M (นพวรรณ สายบัวทอง, 2550) โดยในการเตรียมชั้นย่อย จะประกอบไปด้วยชั้นที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันถึงสองชั้น ได้แก่ ชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer) และชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer) ซึ่งชั้นทั้งสองนี้จะมีส่วนช่วยในเรื่องการจัดการน้ำภายในเซลล์ (Water management) และยังส่งผลต่อขั้นตอนในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ซึ่งจะทำให้ได้ลักษณะของอนุภาคแพลทินัมที่มีลักษณะที่ต่างกันตามชั้นย่อยที่เตรียม อีกทั้งยังช่วยในเรื่องการสัมผัสกันทั้งสามส่วน (Three-phase zone) รวมถึงยังส่งผลต่อความต้านทานภายในเซลล์อีกด้วย ซึ่งผลที่กล่าวมาจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยในชั้นแรกที่ทำการศึกษาจะเป็นชั้นที่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นชั้นที่สัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรงคือเริ่มศึกษาส่วนผสมที่ใช้เป็นส่วนประกอบในชั้นที่ชอบน้ำ ซึ่งทำการเตรียมส่วนผสมทั้งหมด 3 ส่วนผสม จากผลการทดลองจะเห็นว่าส่วนผสมหลักที่สำคัญในชั้นที่ชอบน้ำคือ เนฟิออน ซึ่งเป็นตัวช่วยในเรื่องการสัมผัสกันของทั้งสามเฟส โดยช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมสัมผัสกับตัวรองรับคาร์บอนได้ดี และยังเป็นตัวช่วยส่งผ่านโปรตอนที่ดีอีกด้วย จากการทดลองส่วนผสมที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด คือส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอล โดยปริมาณชั้นที่ชอบน้ำและสัดส่วนระหว่างส่วนผสมของเนฟิออนกับกลีเซอรอลก็มีผลต่อประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่า ปริมาณของชั้นที่ชอบน้ำถ้ามีปริมาณที่มากเกินไปก็อาจทำให้ชั้นที่ชอบน้ำมีความหนาที่มากเกินไป ทำให้การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจะสัมผัสกับตัวรองรับคาร์บอนได้ยาก แต่ถ้ามีปริมาณชั้นที่ชอบน้ำที่น้อยเกินไปทำให้การสัมผัสกันไม่ดี ประสิทธิภาพที่ได้ก็จะลดลง ดังนั้น ปริมาณชั้นที่ชอบน้ำที่เหมาะสมคือ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนสัดส่วนระหว่างเนฟิออนกับกลีเซอรอล ซึ่งก็ต้องเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพที่สูง โดยปริมาณกลีเซอรอลเป็นตัวที่ช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติการทา และเป็นตัวช่วยให้เนฟิออนมีการกระจายตัวทั่วพื้นผิวที่ดี

ขึ้น โดยคุณสมบัติที่ชอบน้ำนี้จะส่งผลต่อการรวมตัวของอนุภาคแพลทินัม ซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมคือ เนฟิออน:กลีเซอ รอลในอัตราส่วน 50:50 จากนั้นได้ศึกษาในส่วนของชั้นที่ไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นส่วนผสมของ PTFE กับผงคาร์บอน โดยทำการศึกษาจากชนิดของผงคาร์บอนซึ่งเทียบระหว่างผงคาร์บอนชนิด Vulcan กับ Acetylene black ซึ่งชนิดของผงคาร์บอนก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพด้วย เนื่องจากคุณสมบัติความเป็นรูพรุนของผงคาร์บอน ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในด้านการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผงคาร์บอนชนิด Vulcan ได้ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าซึ่งได้ทำการเตรียมชั้นที่ไม่ชอบน้ำให้มีปริมาณเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และศึกษาถึงสัดส่วนระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอน ซึ่งสัดส่วนของส่วนผสมในชั้นนี้ก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน โดยสัดส่วนที่ให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดคือ PTFE:ผงคาร์บอน (30:70) และได้ศึกษาถึงเทคนิคการเตรียมชั้นย่อยโดยเทียบระหว่างเทคนิคการทา (Paint) และการสเปรย์ (Spray) ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของสารที่ใช้ในชั้นย่อยมีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน ทำให้การเกาะตัวของอนุภาคแพลทินัมมีความแตกต่างกันจึงได้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไปด้วย และในส่วนของเมมเบรนที่ใช้เป็นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน และผ้าคาร์บอนที่ใช้ก็ล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพ

โดยประสิทธิภาพที่ได้สูงที่สุดที่ 0.6 โวลต์ได้จากการใช้ผ้าคาร์บอนของบริษัท Electrochem, Inc. ทำการเตรียมชั้นที่ไม่ชอบน้ำลงผ้าคาร์บอนในปริมาณ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอนชนิด Vulcan ในสัดส่วน (30:70) และทำการเตรียมชั้นที่ชอบน้ำในปริมาณ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างเนฟิออนกับกลีเซอรอลในสัดส่วน (50:50) ทำการเตรียมโดยใช้เทคนิคการทา โดยขั้วไฟฟ้าที่ทำการเตรียมจะใช้เป็นขั้วแคโทดในขณะที่ขั้วแอโนดจะใช้ขั้วไฟฟ้าทางการค้า ซึ่งมีปริมาณแพลทินัมเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร นำมาประกบระหว่างเมมเบรน 115 โดยใช้เครื่องกดอัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส ความดัน 65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที ได้เป็นเอ็มอีเอานำไปทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หม้อความชื้นฝั่งไฮโดรเจน 65 องศาเซลเซียส ฝั่งออกซิเจน 60 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 308 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 184.8 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

นอกจากเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชั้นย่อย หรือองค์ประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมชั้นย่อยแล้ว วิธีการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาก็ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงด้วยเนื่อง

จากวิธีการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลต่อขนาด การกระจายตัว การสัมผัสกับตัวรองรับ พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งทั้งหมดนี้ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ทั้งสิ้น โดยปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวไปล้วนสอดคล้องกันหมด ซึ่งน่าจะมีการหาความสัมพันธ์ระหว่างการเตรียมชั้นย่อยต่อการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการศึกษาถึงวิธีการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมกับการเตรียมชั้นย่อยที่เหมาะสมจึงน่าจะเป็นแนวทางในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เซลล์เชื้อเพลิง [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.scientific-computing.com/images/scwjnfeb03fuelcell1.jpg> [5 มีนาคม 2552]
- เซลล์เชื้อเพลิง [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.usfcc.com/about/how.html [5 มีนาคม 2552]
- นพวรรณ สายบัวทอง. การเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- ศศิگانต์ เอ็นดู. ผลของตัวแปรต่อการเตรียมเอเอ็มไอในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- สุกัญญา ทองคำ. ผลของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ. เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง การประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1. สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
- อาทิตย์ กฤษยาสกุล. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าฐานทองสำหรับออกซิเจนรีดักชันในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ภาษาอังกฤษ

- Appleby, A. J., and Foulkes, F. R. *Fuel cell handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- Abaoud, H. A., Ghouse, M., Lovell, K. V., and Al-Motairy, G. N. A hybrid technique for fabricating PEMFC's low platinum loading electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005): 385-391.
- Antolini, E., Giorgi, L., Pozio, A., and Passalacqua, E. Influence of Nafion loading in the catalyst layer of gas-diffusion electrodes for PEFC. *Journal of Power Sources* 77 (1999): 136-142.

- Antolini, E., Salgado, J. R. C., and Gonzalez, E. R. The stability of Pt-M (M=first row transition metal) alloy catalysts and its effect on the activity in low temperature fuel cells. Journal of Power Sources 160 (2006): 957-968.
- Banyong, N., Kejvalee, P., and Pornpote, P. Optimum condition of membrane electrode assembly fraction for PEM fuel cell. Korean J. Chem. Eng. 23, 2 (2004): 570-575.
- Barbir, F. PEM fuel cells. California: Elsevier Academic Press, 2005.
- Bard, A. J., and Faulker, L. R. Electrochemical Methods Fundamentals and Application. New York: John Wiley & sons, 1980.
- Chen-Yang, Y. W., Hung, T. F., Huang, J., and Yang, F. L. Novel single-layer gas diffusion layer based on PTFE/carbon black composite for proton exchange membrane fuel cell. Journal of Power Sources (2007)
- Chisaka, M., and Daiguji, H. Effect of glycerol on micro/nano structures of catalyst layers in polymer electrolyte membrane fuel cells. Electrochimica Acta 51 (2006): 4828-4833.
- Choi, K. H., Kim, H. S., and Lee, T. H. Electrode fabrication for proton exchange membrane fuel cells by pulse electrodeposition. Journal of Power Sources 75 (1998): 230-235.
- Dokyo, L., and Siwoo, H. Effect of loading and distributions of Nafion ionomer in the catalyst layer for PEMFCs. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008): 2790-2794.
- Fuel cell [On-line]. Available from: <http://physics.nist.gov/MajResFac/NIF/Images/FuelCellBasic.gif> [5 มีนาคม 2552]
- Jian-hua, T., Zhao-yuan, S., Jin-song, S., and Zhong-qiang, S. Preparation of water management layer and effects of its composition on performance of PEMFCs. Energy Conversion & Management 49 (2008): 1500-1505.
- Kim, H., and Popov, B. N. Development of novel method for preparation of PEMFC electrodes. Electrochemical and Solid-State Letters 7, 4 (2004): A71-A74.
- Kim, H., Subramanian, N. P., and Popov, B. N. Preparation of PEM fuel cell electrodes using pulse electrodeposition. Journal of Power Sources 138 (2004): 14-24.
- Larminie, J., and Simader, G. Fuel cell system explained. Chichester: John Willey & Sons, 2000.

- Lee, H. K., Park, J. H., Kim, D. Y., and Lee, T. H. A study on the characteristics of the Diffusion layer thickness and porosity of the PEMFC. Journal of Power Sources 131 (2004): 200-206.
- Lee, S. J., Mukerjee, S., McBreen, J., Rho, Y. W., Kho, Y. T., and Lee, T. H. Effects of Nafion impregnation on performances of PEMFC electrodes. Electrochimica Acta 43,24 (1998): 3693-3701.
- Litster, S., and Mclean, G. PEM fuel cell electrodes. Journal of Power Sources 130 (2004): 61-76.
- Metha, V., and Cooper, J. S. Review and analysis of PEM fuel cell design and Manufacturing. Journal of Power Sources 114 (2003): 32-53.
- Moreira, J., Delangle, P., Ocampo, A. L., Sebastian, P. J., Montoya J. A., and Castellanos, R. H. Synthesis characterization and application of a Pd/Vulcan and Pd/C catalyst in a PEM fuel cell. Journal of Hydrogen energy 29 (2004): 915-920.
- Nafion [On-line]. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nafion> [5 มีนาคม 2552]
- Nakajima, H., Konomi, T., and Kitahara, T. Direct water analysis on a polymer electrolyte fuel cell (PEFC): Effects of hydrophobic treatment and micro-porous layer addition to the gas diffusion layer of a PEFC on its performance during a simulated start-up operation. Journal of Power Sources 171 (2007): 457-463.
- Park, S., Lee, J. W., and Popov, B. N. Effect of carbon loading in microporous layer on PEM fuel cell performance. Journal of Power Sources 163 (2006): 357-363.
- Passalacqua, E., Lufrano, F., Squadrito, G., Patti, A., and Giorgi, L. Nafion content in the catalyst layer of polymer electrolyte fuel cells: effects on structure and performance. Electrochimica Acta 46 (2001): 799-805.
- Rao, C. R. K., and Trivedi, D. C. Chemical and electrochemical depositions of platinum group metals and their applications. Coordination Chemistry Reviews 249 (2005): 613-361.
- Samuel, F. The Principle of Electrodeposition. 2nd edition. London: Sir Lsacc Pitman & Sons, 1949.
- Sasikumar, G., Ihm, J. W., and Ryu, H. Dependence of optimum Nafion content in catalyst layer on platinum loading. Journal of Power Sources 132 (2004): 11-17.

- Sawyer, D. T., Sobkowiak, A., and Roberts, J. L. Electrochemistry for Chemists. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- Song, J. M., Cha, S. Y., and Lee, W. M. Optimal composition of polymer electrolyte fuel cell electrodes determined by the AC impedance method. Journal of Power Sources 94 (2001): 78-84.
- Taylor, E. J., Anderson E. B., and Vilambi, N. R. K. Preparation of high-platinum utilization gas diffusion electrode for proton exchange membranr fuel cells. Electrochemical Society Letters 139, 5 (1992): L45-L46.
- Thompson, S. D., Jordan, L. R., and Forsyth, M. Platinum electrodeposition for polymer electrolyte membrane fuel cells. Electrochimica Acta 46 (2001): 1657-1663.
- Wei, Z. D., Chan, S. H., Li, L. L., Cai, H. F., Xia, Z. T., and Sun, C. X. Electrodeposition Pt on a Nafion-bonded carbon electrode as a catalyzed electrode for oxygen reduction reaction. Electrochimica Acta 50 (2005): 2279-2287.
- Wei, Z. D., Ran, H. B., Liu, X. A., Liu, Y., Sun, C. X., Chan, S. H., and Shen, P. K. Numerical analysis of Pt utilization in PEMFC catalyst layer using random cluster model. Electrochimica Acta 51 (2006): 3091-3096.
- Wood, D. L., Yi, J. S., and Nguyen, T. V. Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells. Electrochimica Acta 43 (1998): 3795-3809.
- Zhang, X., and Shi, P. Nafion effect on dual-bonded structure cathode of PEMFC. Electrochemistry Communications 8 (2006): 1615-1620.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลในการเตรียมขั้วไฟฟ้าเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว

ขั้วไฟฟ้า	บริษัทของผ้าคาร์บอนที่ใช้เป็นชั้นแพร่ผ่านของแก๊ส	เมมเบรนที่ใช้	ปริมาณเนฟลอนที่ทาก่อนประกอบเป็นเอ็มอีเอ (μl)	ส่วนผสมที่ใช้ในชั้นที่ชอน้ำ	ปริมาณชั้นที่ชอน้ำ (mg/cm ²)	สัดส่วนของเนฟลอนต่อ กดี เซอร์คอลในชั้นที่ชอน้ำ	ผงคาร์บอนที่ใช้ในชั้นที่ไม่ชอน้ำ	สัดส่วนของ PTFE ต่อผงคาร์บอนในชั้นที่ไม่ชอน้ำ	วิธีการเตรียมชั้นย่อย	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm ²)
1	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	50:50	Vulcan	30:70	ทา	308
2	E-TEK	115	92	N:G	0.8	50:50	Vulcan	30:70	ทา	169
3	Electrochem, Inc.	212	92	N:G	0.8	50:50	Vulcan	30:70	ทา	118.6
4	Electrochem, Inc.	115	5	N:G	0.8	50:50	Vulcan	30:70	ทา	226.4
5	Electrochem, Inc.	115	92	PTFE:CB:G	0.8	-	Vulcan	30:70	ทา	66.46
6	Electrochem, Inc.	115	92	N:G:CB	0.8	50:50:50	Vulcan	30:70	ทา	68
7	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0	50:50	Vulcan	30:70	ทา	30.16
8	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.4	50:50	Vulcan	30:70	ทา	74
9	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	1.2	50:50	Vulcan	30:70	ทา	175

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ข้อมูลในการเตรียมขั้วไฟฟ้าเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยว

ขั้วไฟฟ้า	บริษัทของผ้าคาร์บอนที่ใช้เป็นชั้นแพรร่ผ่านของแก๊ส	เมมเบรนที่ใช้	ปริมาณเนพ็อนที่ทาาก่อนประกอบเป็นเอ็มอีเอ (μl)	ส่วนผสมที่ใช้ในชั้นที่ชอบน้ำ	ปริมาณชั้นที่ชอบน้ำ (mg/cm ²)	สัดส่วนของเนพ็อนต่อ กลีเซอรอลในชั้นที่ชอบน้ำ	ผงคาร์บอนที่ใช้ในชั้นที่ไม่ชอบน้ำ	สัดส่วนของ PTFE ต่อผงคาร์บอนในชั้นที่ไม่ชอบน้ำ	วิธีการเตรียมชั้นย่อย	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ที่ 0.6 โวลต์ (mA/cm ²)
10	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	100:0	Vulcan	30:70	ทา	144.6
11	Electrochem, Inc	115	92	N:G	0.8	75:25	Vulcan	30:70	ทา	121.4
12	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	25:75	Vulcan	30:70	ทา	173.4
13	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	0:100	Vulcan	30:70	ทา	40.6
14	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	50:50	Actylene	30:70	ทา	257.4
15	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	50:50	Vulcan	10:90	ทา	154
16	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	50:50	Vulcan	50:50	ทา	170
17	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	50:50	Vulcan	70:30	ทา	74
18	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	50:50	Vulcan	90:10	ทา	21.4
19	Electrochem, Inc.	115	92	N:G	0.8	50:50	Vulcan	30:70	สเปรย์	98

ภาคผนวก ข

การคำนวณในการเตรียมชั้นย่อย

ข.1 การคำนวณหาปริมาณสารในอัตราส่วนของ PTFE กับผงคาร์บอนในชั้นที่ไม่ชอบน้ำ (Ratio of hydrophobic layer)

การคำนวณหาอัตราส่วนของ PTFE กับผงคาร์บอนโดยให้มีปริมาณชั้นที่ไม่ชอบน้ำเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

ตัวอย่าง การคำนวณหาปริมาณของ PTFE กับผงคาร์บอนในอัตราส่วน 30:70 (บนขั้วไฟฟ้า 5 ตารางเซนติเมตร คิดเพื่อ 4 ชิ้นงาน) (ขั้วไฟฟ้า 1)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารผสมที่ต้องใช้} &= \text{พื้นที่} \times \text{ปริมาณสารในชั้นที่ชอบน้ำ} \\ &= 20 \times 1.9 = 38 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

การเตรียม PTFE ต่อผงคาร์บอนในอัตราส่วน 30:70 แสดงว่าในสารผสมทั้งหมด 38 มิลลิกรัม จะมีปริมาณ PTFE ร้อยละ 30 และผงคาร์บอนร้อยละ 70

$$\diamond \text{ ปริมาณ PTFE ที่ใช้} = (30/100) \times 38 = 11.4 \text{ มิลลิกรัม}$$

โดยเตรียมจากสารละลาย PTFE 60 wt% ($\rho_{\text{PTFE}} = 1.5$ กรัมต่อมิลลิลิตร)

PTFE 60 มิลลิกรัม อยู่ในสารละลาย PTFE 100 มิลลิกรัม

PTFE 11.4 มิลลิกรัม อยู่ในสารละลาย PTFE 19 มิลลิกรัม หรือเท่ากับ 0.019 กรัม

ดังนั้น ปริมาณ PTFE ที่ใช้ $= 0.019/1.5 = 0.01266$ มิลลิลิตร

หรือเท่ากับ 12.66 ไมโครลิตร

$$\diamond \text{ ปริมาณผงคาร์บอนที่ใช้} = (70/100) \times 38 = 26.6 \text{ มิลลิกรัม หรือเท่ากับ} \\ 0.0266 \text{ กรัม}$$

\therefore ปริมาณสารในชั้นที่ไม่ชอบน้ำระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอนในอัตราส่วน 30:70 บนผ้าคาร์บอนขนาด 5 ตารางเซนติเมตรต้องใช้สาร PTFE 12.66 ไมโครลิตรผสมกับผงคาร์บอน 0.0266 กรัม

โดยปริมาณสาร PTFE และผงคาร์บอนที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆ ในชั้นที่ไม่ชอบน้ำแสดงดังตารางที่ ข.1

ข.2 การคำนวณในการเตรียมปริมาณชั้นที่ชอบน้ำ (Hydrophilic layer loading)

การคำนวณปริมาณสารในชั้นที่ชอบน้ำ โดยให้มีอัตราส่วนของเนฟิออนต่อกลิเซอรอลในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 มีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

ตัวอย่าง การคำนวณปริมาณสารในชั้นที่ชอบน้ำ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (บนขั้วไฟฟ้า 5 ตารางเซนติเมตร) (ขั้วไฟฟ้า 1)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารผสมที่ต้องใช้} &= \text{พื้นที่} \times \text{ปริมาณสารในชั้นที่ชอบน้ำ} \\ &= 5 \times 0.8 = 4 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

การเตรียมเนฟิออนต่อกลิเซอรอลในอัตราส่วน 50:50 แสดงว่าในสารผสมทั้งหมด 4 มิลลิกรัม จะมีปริมาณเนฟิออนร้อยละ 50 และกลีเซอรอลร้อยละ 50

$$\diamond \text{ ปริมาณเนฟิออนที่ใช้} = (50/100) \times 4 = 2 \text{ มิลลิกรัม}$$

โดยเตรียมจากสารละลายเนฟิออน 5 wt% ($\rho_{\text{Nafion}} = 0.87$ กรัมต่อมิลลิลิตร)

เนฟิออน 5 มิลลิกรัม อยู่ในสารละลายเนฟิออน 100 มิลลิกรัม

เนฟิออน 2 มิลลิกรัม อยู่ในสารละลายเนฟิออน 40 มิลลิกรัม หรือเท่ากับ 0.04 กรัม

ดังนั้น ปริมาณสารละลายเนฟิออนที่ใช้ $= 0.04/0.87 = 0.045977$ มิลลิลิตร

หรือเท่ากับ 45.98 ไมโครลิตร

$$\diamond \text{ ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้} = (50/100) \times 4 = 2 \text{ มิลลิกรัม}$$

หรือเท่ากับ 0.002 กรัม ($\rho_{\text{Glycerol}} = 1.261$ กรัมต่อมิลลิลิตร)

ดังนั้น ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้ $= 0.002/1.261 = 0.001586$ มิลลิลิตร

หรือเท่ากับ 1.59 ไมโครลิตร

\therefore ปริมาณสารในชั้นที่ชอบน้ำ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนผ้าคาร์บอนขนาด 5 ตารางเซนติเมตรต้องใช้สารผสมเนฟิออน 45.98 ไมโครลิตรและกลีเซอรอล 1.59 ไมโครลิตร

โดยปริมาณสารเนฟิออนกับกลีเซอรอลที่ใช้ในปริมาณชั้นที่ชอบน้ำตั้งแต่ 0 ถึง 1.2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรจะแสดงดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.1 ปริมาณส่วนผสมระหว่าง PTFE กับผงคาร์บอนที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆ ในการเตรียมชั้นที่ไม่ชอบน้ำ โดยมีปริมาณเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร คิดเพื่อ 4 ชั้นงาน)

ขั้วไฟฟ้า	สัดส่วนระหว่าง PTFE:ผงคาร์บอน	ปริมาณ PTFE ที่ใช้ (µl)	ปริมาณผงคาร์บอน ที่ใช้ (g)
15	10:90	4.22	0.0342
1	30:70	12.66	0.0266
16	50:50	21.10	0.0190
17	70:30	29.54	0.0114
18	90:10	37.98	0.0038

ตารางที่ ข.2 ปริมาณของส่วนผสมที่ใช้ระหว่างเนฟิออนกับกลีเซอรอลในการเตรียมขั้วไฟฟ้าให้มีปริมาณชั้นที่ชอบน้ำที่แตกต่างกัน โดยให้มีสัดส่วนระหว่างเนฟิออนต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 50:50 (ขั้วไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร)

ขั้วไฟฟ้า	ปริมาณชั้นที่ชอบน้ำ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	ปริมาณเนฟิออนที่ใช้ (µl)	ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้ (µl)
7	0	0	0
8	0.4	22.99	0.79
1	0.8	45.98	1.59
9	1.2	68.97	2.38

ข.3 การคำนวณหาอัตราส่วนของเนฟิออนกับกลีเซอรอลในชั้นที่ชอบน้ำ (Ratio of hydrophilic layer)

การคำนวณหาอัตราส่วนของเนฟิออนกับกลีเซอรอลโดยให้มีปริมาณชั้นที่ชอบน้ำเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

ตัวอย่าง การคำนวณหาปริมาณของเนฟิออนกับกลีเซอรอลในอัตราส่วน 75:25 (บนขั้วไฟฟ้า 5 ตารางเซนติเมตร) (ขั้วไฟฟ้า 11)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารผสมที่ต้องใช้} &= \text{พื้นที่} \times \text{ปริมาณสารในชั้นที่ชอบน้ำ} \\ &= 5 \times 0.8 = 4 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

การเตรียมเนฟิออนต่อกลีเซอรอลในอัตราส่วน 75:25 แสดงว่าในสารผสมทั้งหมด 4 มิลลิกรัม จะมีปริมาณเนฟิออนร้อยละ 75 และกลีเซอรอลร้อยละ 25

$$\diamond \text{ ปริมาณเนฟิออนที่ใช้} = (75/100) \times 4 = 3 \text{ มิลลิกรัม}$$

โดยเตรียมจากสารละลายเนฟิออน 5 wt% ($\rho_{\text{Nafion}} = 0.87$ กรัมต่อมิลลิลิตร)

เนฟิออน 5 มิลลิกรัม อยู่ในสารละลายเนฟิออน 100 มิลลิกรัม

เนฟิออน 3 มิลลิกรัม อยู่ในสารละลายเนฟิออน 60 มิลลิกรัม หรือเท่ากับ 0.06 กรัม

ดังนั้น ปริมาณเนฟิออนที่ใช้ = $0.06/0.87 = 0.0689655$ มิลลิลิตร

หรือเท่ากับ 68.97 ไมโครลิตร

$$\diamond \text{ ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้} = (25/100) \times 4 = 1 \text{ มิลลิกรัม}$$

หรือเท่ากับ 0.001 กรัม ($\rho_{\text{Glycerol}} = 1.261$ กรัมต่อมิลลิลิตร)

ดังนั้น ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้ = $0.001/1.261 = 0.000793$ มิลลิลิตร

หรือเท่ากับ 0.79 ไมโครลิตร

\therefore ปริมาณสารในชั้นที่ชอบน้ำระหว่างเนฟิออนกับกลีเซอรอลในอัตราส่วน 75:25 บนผ้าคาร์บอนขนาด 5 ตารางเซนติเมตรต้องใช้สารเนฟิออน 68.97 ไมโครลิตรผสมกับกลีเซอรอล 0.79 ไมโครลิตร

โดยปริมาณสารเนฟิออนกับกลีเซอรอลที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆ ในชั้นที่ชอบน้ำแสดงดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 ปริมาณส่วนผสมระหว่างเนฟิออนกับกลีเซอรอลที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆ ในการเตรียมชั้นที่ชอบน้ำ โดยมีปริมาณเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ข้าวไฟฟ้าขนาด 5 ตารางเซนติเมตร)

ข้าวไฟฟ้า	สัดส่วนระหว่าง เนฟิออน:กลีเซอรอล	ปริมาณเนฟิออนที่ใช้ (μ l)	ปริมาณกลีเซอรอลที่ ใช้ (μ l)
10	100:0	91.95	0
11	75:25	68.97	0.79
1	50:50	45.98	1.59
12	25:75	22.99	2.38
13	0:100	0	3.17
7	0:0	0	0

ภาคผนวก ค

การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าจากความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

ก่อนทำการพอกพูนขั้วไฟฟ้าในแต่ละครั้งให้ทำการชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าก่อน และเมื่อทำการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าเสร็จ จะต้องฉีดล้างผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าด้วยน้ำกลั่นเพื่อล้างสารละลายแพลทินัมส่วนเกินที่ไม่ยึดเกาะบนพื้นผิวออก แล้วนำขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วไปชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าหลังการพอกพูน บนสมมติฐานที่ว่า น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาหลังจากการพอกพูนด้วยไฟฟ้า คือน้ำหนักของโลหะแพลทินัมที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มายึดเกาะบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า

$$\text{Pt loading} = \frac{\text{น้ำหนักขั้วไฟฟ้าหลังการพอกพูน} - \text{น้ำหนักขั้วไฟฟ้าก่อนการพอกพูน}}{\text{พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า}}$$

ตัวอย่าง ข้อมูลจากการทดลองของขั้วไฟฟ้า 1

น้ำหนักขั้วไฟฟ้าก่อนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า 138 มิลลิกรัม

น้ำหนักขั้วไฟฟ้าหลังการพอกพูนด้วยไฟฟ้า 141.2 มิลลิกรัม

พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า 6.9 ตารางเซนติเมตร

$$\text{Pt loading} = \frac{141.2 - 138}{6.9} = 0.46 \text{ mg / cm}^2$$

∴ ปริมาณแพลทินัมบนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.46 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

โดยข้อมูลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการพอกพูนด้วยไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้า	พื้นที่ (cm ²)	น้ำหนักผ้าคาร์บอนก่อน การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (mg)	น้ำหนักผ้าคาร์บอนหลัง การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (mg)	น้ำหนักแพลทินัม (mg)	ปริมาณแพลทินัมบน ขั้วไฟฟ้า (mg/cm ²)
1	6.9	138.0	141.2	3.2	0.46
2	6.9	138.6	140.0	1.4	0.20
3	6.9	135.4	139.8	4.4	0.64
4	6.9	135.1	139.8	4.7	0.68
5	6.9	135.7	138.8	3.1	0.45
6	6.9	146.5	147.9	1.4	0.20
7	6.9	135.0	138.4	3.4	0.49
8	6.9	144.8	147.9	3.1	0.45
9	6.9	138.6	142.3	3.7	0.54

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้า	พื้นที่ (cm ²)	น้ำหนักผ้าคาร์บอนก่อน การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (mg)	น้ำหนักผ้าคาร์บอนหลัง การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (mg)	น้ำหนักแพลทินัม (mg)	ปริมาณแพลทินัมบน ขั้วไฟฟ้า (mg/cm ²)
10	6.9	133.3	139.5	6.2	0.90
11	6.9	137.3	141.1	3.8	0.55
12	6.9	136.1	139.9	3.8	0.55
13	6.9	131.0	132.8	1.8	0.26
14	6.9	133.7	137.8	4.1	0.59
15	6.9	144.6	147.0	2.4	0.35
16	6.9	144.6	147.3	2.7	0.39
17	6.9	144.4	148.3	3.9	0.57
18	6.9	148.5	152.7	4.2	0.61
19	6.9	141.9	145.8	3.9	0.57

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ X-rays diffraction

การคำนวณหาขนาดอนุภาคผลึกของโลหะแพลทินัมจากการวิเคราะห์ X-rays diffraction สามารถคำนวณได้จาก Debye-Scherrer Equation ดังสมการที่ ง.1 ซึ่งเลือกใช้พีคของแพลทินัม (111) ในการคำนวณหาขนาดอนุภาคผลึกของแพลทินัม เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีความเหมาะสมที่สุดในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีซีเอ็ม

$$L = \frac{0.9\lambda_{kal}}{\beta_{2\theta} \cos \theta_{max}} \quad (ง.1)$$

โดยที่	L	คือ	ขนาดอนุภาคผลึก (นาโนเมตร)
	λ_{kal}	คือ	ความยาวคลื่นของ X-rays ในที่นี้คือ $1.54056 \text{ \AA}^{\circ}$ หรือ 0.154056 นาโนเมตร
	$\beta_{2\theta}$	คือ	ความกว้างที่ความเข้มครึ่งหนึ่งของพีค Pt(111) (เรเดียน)
	θ	คือ	Bragg angle ของการสะท้อนของรังสี (เรเดียน)

ตัวอย่าง การคำนวณหาขนาดอนุภาคผลึกแพลทินัมจาก XRD (ขั้วไฟฟ้า 1)

$$\beta_{2\theta} = 0.7 \text{ องศา หรือ } 0.012211 \text{ เรเดียน}$$

$$2\theta = 40.05 \text{ องศา ดังนั้น } \theta = 0.349325 \text{ เรเดียน}$$

$$\cos\theta = \cos(0.349325) = 0.939604$$

$$L = \frac{0.9 \times 0.154056}{0.012211 \times 0.939604} = 12.62 \text{ nm}$$

โดยข้อมูลการคำนวณหาขนาดอนุภาคผลึกแพลทินัมจาก XRD แสดงดังตาราง ง.1

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการคำนวณขนาดอนุภาคผลึกแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วย X-rays diffraction

ข้อไฟฟ้า	Angle 2θ (องศา)	Angle θ (เรเดียน)	$\beta_{2\theta}$ (องศา)	$\beta_{2\theta}$ (เรเดียน)	ขนาดอนุภาคผลึก (nm)
1	40.05	0.349325000	0.700	0.012211000	12.62
2	39.93	0.348278333	0.680	0.011862222	12.99
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	40.03	0.349150556	1.045	0.018229444	8.45
6	40.06	0.349412222	0.690	0.012036667	12.80
7	40.00	0.348888889	0.700	0.012211111	12.62
8	40.03	0.349150556	0.700	0.012211111	12.62
9	40.00	0.348888889	0.720	0.012560000	12.27

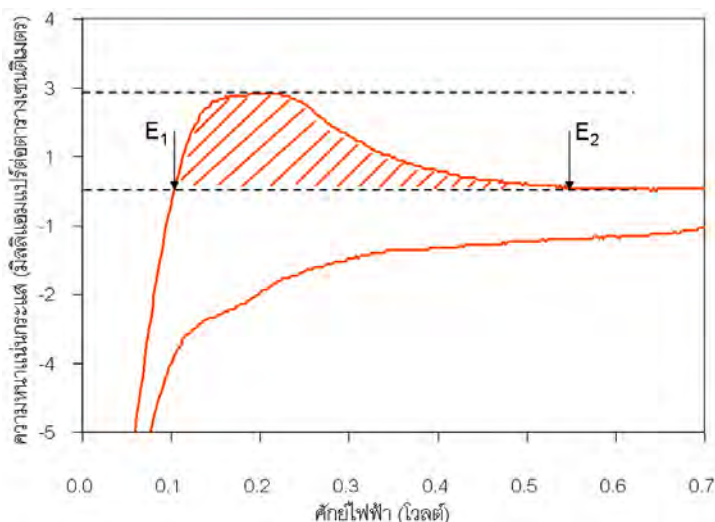
ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ข้อมูลการคำนวณขนาดอนุภาคผลึกแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วย X-rays diffraction

ข้อไฟฟ้า	Angle 2θ (องศา)	Angle θ (เรเดียน)	$\beta_{2\theta}$ (องศา)	$\beta_{2\theta}$ (เรเดียน)	ขนาดอนุภาคผลึก (nm)
10	39.88	0.347842222	0.855	0.014915000	10.33
11	40.04	0.349237778	0.755	0.013170556	11.70
12	40.00	0.348888889	0.735	0.012821667	12.02
13	39.98	0.348714444	0.780	0.013606667	11.32
14	-	-	-	-	-
15	40.00	0.348888889	0.665	0.011600556	13.28
16	40.08	0.349586667	0.685	0.011949444	12.90
17	40.00	0.348888889	0.730	0.012734444	12.10
18	40.10	0.349761111	0.810	0.014130000	10.91
19	-	-	-	-	-

ภาคผนวก จ

ผลการคำนวณหาพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry (CV)

การวิเคราะห์ Cyclic Voltammetry เป็นการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้า โดยทางด้านแอโนดทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจน ทางด้านแคโทดทำการป้อนแก๊สไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหลทั้งสองฝั่งเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ประจุไฟฟ้าหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีคที่เกิดการออกซิเดชัน ดังรูป จ.1 โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งคอมพิวเตอร์จะทำการอินทิเกรตได้ค่าประจุไฟฟ้า (Charge) หน่วยเป็นคูลอมป์ จากนั้นนำค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (Electrochemical active surface, EAS) ตามสมการที่ จ.1



รูปที่ จ.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนภายในเซลล์เชื้อเพลิง

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

ตัวอย่าง การคำนวณหาพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า 1

$$EAS(cm^2 Ptg^{-1} Pt) = \frac{46080\mu C cm^{-2}}{210(\mu C cm^{-2} Pt) \times 0.00046(gPt cm^{-2})} = 477018.63 cm^2 / g$$

$$= 47.7 m^2/g$$

โดยข้อมูลการคำนวณพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าจาก CV แสดงดังตาราง จ.1

ตารางที่ ๑.1 ข้อมูลการคำนวณพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ด้วย Cyclic voltammetry

ขั้วไฟฟ้า	พื้นที่ใต้กราฟจาก CV	ประจุไฟฟ้า (Q_H) (C/cm^2)	Pt loading (mg/cm^2)	พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (EAS) (m^2/g)
1	0.230400	0.0460800	0.46	47.7
2	0.183700	0.0367400	0.20	87.48
3	-	-	-	-
4	0.013050	0.0026100	0.68	1.83
5	0.031480	0.0062960	0.45	6.66
6	0.030590	0.0061180	0.20	14.57
7	0.028480	0.0056960	0.49	5.54
8	0.035380	0.0070760	0.45	7.49
9	0.084250	0.0168500	0.54	14.86

ตารางที่ ๑.1 (ต่อ) ข้อมูลการคำนวณพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ด้วย Cyclic voltammetry

ขั้วไฟฟ้า	พื้นที่ใต้กราฟจาก CV	ประจุไฟฟ้า (Q_H) (C/cm^2)	Pt loading (mg/cm^2)	พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (EAS) (m^2/g)
10	0.058410	0.0116820	0.90	6.54
11	0.069540	0.0139080	0.55	12.04
12	0.101600	0.0203200	0.83	11.66
13	0.017150	0.0034300	0.26	6.28
14	0.020050	0.0040100	0.59	3.24
15	0.033990	0.0067980	0.35	9.25
16	0.041540	0.0083080	0.39	10.14
17	0.011620	0.0023240	0.57	1.94
18	0.004353	0.0008706	0.61	0.68
19	0.048980	0.0097960	0.57	8.18

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศศิธร เลิศวิริยะไพศาล เกิดวันที่ 4 มิถุนายน 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสายปัญญาในพระบรมราชินูปถัมภ์ จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2548 ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549