

ผลของชั้นแพร์แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าสำหรับเซลล์
เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์



นางสาวชนากาญจน์ เรืองกิจ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF GAS DIFFUSION LAYER ON Pt CATALYST PREPARED BY
ELECTRODEPOSITION FOR PEM FUEL CELL

Miss Chanakan Ruengkit



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของชั้นแพร์แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียม
	โดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์
โดย	นางสาวชนากาญจน์ เรืองกิจ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิสิต ตัณฑวิเชษฐ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิสิต ตัณฑวิเชษฐ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. คุณากร ภูจินดา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. ปวีณา ประไพยนา)

ชานากาญจน์ เรื่องกิจ : ผลของชั้นแพร่แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (EFFECTS OF GAS DIFFUSION LAYER ON Pt CATALYST PREPARED BY ELECTRODEPOSITION FOR PEM FUEL CELL) อ.ที่
 ปรักษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. นิสิต ตัณพิวิษฐ, 125 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของชั้นแพร่แก๊สที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยชั้นแพร่แก๊สจากแหล่งที่มาต่างกันจะมีโครงสร้างและสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมเนื่องจากปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นแพร่แก๊ส จากการศึกษาพบว่า ประเภทและความหนาของชั้นแพร่แก๊ส ปริมาณ PTFE และชั้นไมโครพอร์สส่งผลต่อขนาดและลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงด้วย โดยพบว่าผิวหน้าของกระดาษคาร์บอนมีความเรียบมากกว่าผ้าคาร์บอนซึ่งมีการขึ้นรูปแบบกลุ่มมัดของเส้นใยคาร์บอนซึ่งเกิดจากการทอ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้จึงมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่า เมื่อความหนาและความหนาแน่นของชั้นแพร่แก๊สที่มีค่าต่ำจะส่งผลให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนสูงเสมือนรูพรุนมีขนาดใหญ่ ความแข็งแรงต่ำและเกิดการเสียสภาพในเชิงกายภาพในขั้นตอนการกดอัด นอกจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนได้มีการกระจายตัวลงไปตามช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านั้นจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนได้ยากกว่า เนื่องจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะต้องเป็นบริเวณที่มีการสัมผัสกันระหว่างบริเวณ 3 เฟส ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำ โดยปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร่แก๊สควรมีความสมดุลกันระหว่างการจัดการน้ำในระบบและสมบัติภาวะการเปียก โดยปริมาณ PTFE ที่เหมาะสมจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ชั้นแพร่แก๊สที่ผู้ผลิตได้ทำการเคลือบชั้นไมโครพอร์สไว้แล้วพบว่าผิวหน้าที่เรียบและสม่ำเสมอ และไม่จำเป็นจะต้องมีการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำเพิ่ม โดยมีการเตรียมเพียงชั้นชอบน้ำชั้นเดียวและจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอ ไม่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูงและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดี

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5471939823 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: GAS DIFFUSION LAYER / ELECTRODEPOSITION / PROTON EXCHANGE
MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)

CHANAKAN RUENGGIT: EFFECTS OF GAS DIFFUSION LAYER ON Pt CATALYST
PREPARED BY ELECTRODEPOSITION FOR PEM FUEL CELL. ADVISOR: ASST.
PROF. NISIT TANTAVICHET, Ph.D., 125 pp.

This research studies the effect of gas diffusion layers (GDL) on Pt catalysts prepared by electrodeposition. GDL from different sources have different structures and properties so that they are expected to affect electrodeposition process and catalyst properties. It was found that type and thickness of the GDL, PTFE content and micro-porous layer (MPL) affected the morphology and distribution of Pt catalysts deposited on the surface of the GDL which eventually affected the performance of fuel cells. The GDL made from carbon paper had a smoother surface than that made from carbon cloth which consists of bundles of carbon fibers fabricated from a woven process. As the result, the catalysts deposited on carbon paper had a more uniform distribution. The GDL with a thin layer possess wide gaps between carbon fiber or the large pore size. Then, some Pt was deposited in the inner layer of the GDL leading to a less accessibility of the Pt catalyst sites to the oxygen reduction reaction. PTFE content on the GDL was found to be important since it should be balanced between the effect on the water management during the fuel cell operation and the wettability during Pt electrodeposition. Some manufacturers prepared the MPL on the GDL so that it was unnecessary to add hydrophobic layer, and only hydrophilic layer should be prepared in order to obtain a Pt deposit with uniform distribution and high active surface area catalysts.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Fuel Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิสิต ตัณฑวิเชษฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และการช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุฒษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. คุณากร ภูจินดา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ปวีณา ประไพยนา กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ทางด้านเงินทุนในการทำวิจัย ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ งานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ คอยมอบความรักความเป็นห่วงเป็นใย ให้คำปรึกษา สนับสนุนและช่วยเหลือในทุกด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	3
บทที่ 2.....	5
2.1 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง	5
2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	6
2.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์	7
2.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็่ม.....	8
2.2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดป้อนสารเมทานอลโดยตรง	9
2.2.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก	9
2.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเตลอม.....	10
2.2.6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง.....	10
2.3 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็่ม	11
2.3.1 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า.....	11

2.3.2 ช่องทางการไหลของแก๊ส, แผ่นสองชั้นและแผ่นประกบ	11
2.3.3 ตัวประสาน.....	12
2.3.4 เมมเบรน	12
2.3.5 ชั้นแพร่แก๊ส.....	14
2.3.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา	17
2.4 การพอกพูนโดยใช้กระแสไฟฟ้า.....	18
2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน.....	22
2.6 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	24
2.6.1 การหาพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี.....	25
2.6.2 โพลาริเซชัน	27
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่อีเอ็ม	29
2.7.1 ปริมาณน้ำ.....	29
2.7.2 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	29
2.7.3 ความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	30
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3.....	34
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	34
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	34
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	35
3.5 ตัวแปรที่ศึกษา.....	35
3.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย	36
3.6.1 การวัดความหนาของชั้นแพร่แก๊ส	36

3.6.2 การวัดความหนาแน่นของชั้นแพร์แก๊ส	36
3.6.3 การวัดความต้านทานไฟฟ้าของชั้นแพร์แก๊ส.....	36
3.6.4 การเตรียมผงคาร์บอน	36
3.6.5 การเตรียมขั้วไฟฟ้า	37
3.6.5.1 การเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำลงบนขั้วไฟฟ้า	37
3.6.5.2 การเตรียมชั้นชอบน้ำลงบนขั้วไฟฟ้า	37
3.6.6 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	38
3.6.7 การวิเคราะห์แบบไซคลิกโวลแทมเมตรีในสารละลาย	39
3.6.8 การปรับปรุงคุณภาพของเมมเบรน	40
3.6.9 การประกอบแผ่นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า.....	40
3.6.10 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง	41
3.6.10.1 การประกอบเซลล์เดี่ยว	41
3.6.10.2 การเตรียมความพร้อมของเซลล์เชื้อเพลิงในหน่วยทดสอบก่อนทำการ ทดสอบ.....	42
3.6.10.3 การทดสอบสมรรถนะของเอ็มอีเอจากกราฟโพลาริเซชัน.....	42
3.6.10.4 การปิดระบบของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง	43
บทที่ 4.....	44
4.1 การเตรียมพื้นผิวขั้วไฟฟ้าก่อนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า	44
4.1.1 ผลของเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	45
4.1.2 ผลของปริมาณชั้นชอบน้ำต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม	48
4.2 ผลของชนิดและสมบัติของชั้นแพร์แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม	52
4.2.1 ผลของประเภทของชั้นแพร์แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม.....	54
4.2.2 ผลของความหนาแน่นของชั้นแพร์แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม.....	61

4.2.3 ผลของปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร่แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยา แพลทินัม	69
4.2.4 ผลของชั้นไมโครพอร์ต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม	74
4.2.5 ผลของชั้นย่อยบนชั้นไมโครพอร์ต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม	78
4.3 สรุปผลของชนิดและสมบัติของชั้นแพร่แก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง	93
4.3.1 ชั้นแพร่แก๊สที่ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะต่ำ	93
4.3.2 ชั้นแพร่แก๊สที่ให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูง	98
บทที่ 5.....	104
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ	106
รายการอ้างอิง	107
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก	113
ภาคผนวก ข	116
ภาคผนวก ค	117
ภาคผนวก ง.....	118
ภาคผนวก จ	120
ภาคผนวก ฉ	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	125

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ชนิดและลักษณะการนำไปใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	7
2.2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวส์ที่ภาวะมาตรฐาน	24
4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าที่เป็นผลจากเทคนิคในการเตรียมชั้นย่อย.....	45
4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าที่เป็นผลจากปริมาณชั้นขอบน้ำ.....	49
4.3 แสดงชื่อย่อที่ใช้แทนชั้นแพร์แก๊สในงานวิจัย.....	54
4.4 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-SWP และ ETEK-CP-SWP-B.....	55
4.5 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส ELT-CC-30 และ ELT-CP-30.....	59
4.6 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-SWP-B.....	63
4.7 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B.....	66
4.8 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-10, ETEK-CC-20 และ ETEK-CC-30.....	70
4.9 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5 และ SGL-CP-5-MPL-A.....	75
4.10 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A-2s, SGL-CP-5-MPL-A-1s, SGL-CP-5-MPL-B-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s.....	81
4.11 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-0-MPL-2s, ETEK-CC-0-MPL-1s, ETEK-CP-0-MPL-2s และ ETEK-CP-0-MPL-1s.....	88
4.12 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-A, ETEK-CP-30 และ SGL-CP-5.....	95

ตาราง	หน้า
4.13 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร่แก๊ส ELT-CC-30, ELT-CP-30, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s.....	100



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็่ม.....	11
2.2 โครงสร้างของเนฟิวออนเมมเบรน.....	13
2.3 เส้นทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	17
2.4 กระบวนการการพอกพูนโดยใช้กระแสไฟฟ้า.....	18
2.5 การถ่ายโอนมวลสารในสารละลาย.....	20
2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	21
2.7 ไซคลิกโวลแทมโม่แกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแบบพหุผลึกด้วยการใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรเจน	26
2.8 โพลาริเซชันโดยทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม.....	27
2.9 ผลกระทบของการเพิ่มความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	31
3.1 การต่อเซลล์ไฟฟ้าในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	39
3.2 การต่อเซลล์ไฟฟ้าในการวิเคราะห์แบบไซคลิกโวลแทมเมทรีในสารละลาย.....	40
4.1 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมด้วยไฟฟ้าด้วยเทคนิคต่างกัน.....	46
4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน.....	47
4.3 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยมีปริมาณชั้นขอบน้ำต่างกัน.....	51
4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้า ที่เตรียมชั้นย่อยโดยเทคนิคการสเปรย์โดยมีปริมาณชั้นขอบน้ำต่างกัน.....	52
4.5 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของชั้นแพร่และภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-SWP และ ETEK-CP-SWP-B.....	56
4.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากประเภทของชั้นแพร่แก๊สต่างกันของบริษัท E-tek.....	57

ภาพที่	หน้า
4.7 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ชั้นแพร่แก๊สและภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30 และ ELT- CP-30.....	60
4.8 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากประเภทของชั้นแพร่แก๊สต่างกัน ของบริษัท Electrochem.....	61
4.9 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-SWP-B.....	62
4.10 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมชั้นแพร่แก๊สและภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-SWP-B.....	64
4.11 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร่แก๊สบริษัท E-tek ที่มี ความหนาต่างกัน.....	65
4.12 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B.....	67
4.13 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ตัวเร่งปฏิกิริยาบนและภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5-MPL- A และ SGL-CP-5-MPL-B.....	68
4.14 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร่แก๊สบริษัท Sigracet ที่มี ความหนาต่างกัน.....	69
4.15 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ชั้นแพร่แก๊สที่มีปริมาณ PTFE เป็นองค์ประกอบต่างกัน.....	71
4.16 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CC-10, ETEK-CC-20 และ ETEK- CC-30.....	73
4.17 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร่แก๊สที่มีปริมาณ PTFE เป็นองค์ประกอบที่ต่างกัน.....	74
4.18 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 และ SGL-CP-5-MPL-A.....	76

ภาพที่	หน้า
4.19 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าและภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า SGL-CP- 5 และ SGL-CP-5-MPL-A.....	77
4.20 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊สบริษัท Sigracet ที่มี ความหนาต่างกัน.....	78
4.21 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A-2s, SGL-CP-5-MPL-B-2s, SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s.....	80
4.22 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A-2s, SGL-CP-5-MPL-B- 2s, SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s.....	82
4.23 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5-MPL-A-2s, SGL-CP-5- MPL-B-2s, SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s.....	83
4.24 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A- 1s และ SGL-CP-5-MPL-A-2s.....	85
4.25 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-B- 1s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s.....	85
4.26 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-0-MPL-2s, ETEK-CP-0-MPL-2s, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s.....	87
4.27 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของ ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-0-MPL-2s, ETEK-CP-0-MPL-2s, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s.....	89
4.28 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง แสดงสัญญาณของ ภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-0-MPL-2s, ETEK-CP-0- MPL-2s, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s.....	91
4.29 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-0-MPL- 1s และ ETEK-CC-0-MPL-2s.....	92

ภาพที่	หน้า
4.30 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-2s.....	92
4.31 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-A, ETEK-CP-30 และ SGL-CP-5.....	94
4.32 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-A, ETEK-CP-30 และ SGL-CP-5.....	96
4.33 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A, ETEK-CP-30 และ SGL-CP-5.....	97
4.34 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊สของบริษัท ETEK และ Sigracet.....	98
4.35 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของชั้นแพร์แก๊ส ELT-CC-30, ELT-CP-30, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s.....	99
4.36 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร์แก๊ส ELT-CC-30, ELT-CP-30, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s.....	101
4.37 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัญญาณของภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30, ELT-CP-30, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s.....	102
4.38 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊สของบริษัท Electrochem และ E-tek.....	103

บทที่ 1

บทนำ

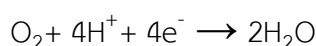
1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นของมนุษย์ในยุคปัจจุบันและทวีความสำคัญมากขึ้นเมื่อโลกมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาประเทศไทยมีอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วในทุกด้าน และกระจายไปยังทุกภาคส่วนทั้งในสาขาเกษตร การบริหารและพาณิชย์กรรม รวมถึงการพัฒนาขยายฐานอุตสาหกรรมที่ทันสมัย ส่งผลให้ความต้องการพลังงานทุกประเภทเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งทรัพยากรพลังงานจำกัดจึงต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ทั้งน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติและไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้เองบางครั้งวิกฤตการณ์ของโลกทำให้ประเทศไทยได้รับอิทธิพลอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ประกอบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลยังเป็นเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัดคือใช้แล้วหมดไป ส่งผลให้ในอนาคตอาจเกิดการขาดแคลน และมีปัญหาทางด้านราคาที่สูงขึ้นตามมา ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งการแสวงหาพลังงานทดแทนแหล่งใหม่ที่ประหยัดและมีความยั่งยืนจึงมีความสำคัญต่อพัฒนาประเทศ จากเหตุดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดพลังงานอีกทางหนึ่งคือ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงคืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนรูปพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยผลิตภัณฑ์พลอยได้คือน้ำและความร้อน เซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากการสูญเสียในกระบวนการน้อย เมื่อกระบวนการความร้อนถูกรวมเข้าด้วยกันกับกระบวนการกำเนิดกำลังงานสามารถให้ประสิทธิภาพถึง 80 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่า เซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนซ์เข้าสู่ระบบ เซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิดโดยที่แต่ละชนิดจะทำงานต่างกันไป เช่น เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cell) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cell) เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten carbonate fuel cell) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cell) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรง (Direct methanol fuel cell) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) โดยพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่มเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่กำลังได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง มีน้ำหนักและปริมาตรที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น จึงเหมาะสำหรับเป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก หรืออุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่หรือ

พกพาได้ เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์แบบพกพา รถยนต์ เป็นต้น อุณหภูมิในการทำงานต่ำ ประมาณ 80 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่นที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง

ปัญหาหลักของเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบันนี้คือราคาที่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล เนื่องจากเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้จลนศาสตร์ช้าโดยเฉพาะด้านแคโทด เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน ดังแสดงในสมการ :



มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ามากเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด จึงมีความจำเป็นต้องใช้โลหะชั้นสูงที่มีราคาแพงเช่นแพลทินัมจำนวนมากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น จึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลมีราคาสูง ดังนั้นในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริง จำเป็นต้องมีการพัฒนาการใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยทำการลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แต่ยังคงสมรรถนะที่ดี เพื่อเป็นการลดต้นทุนในเรื่องราคา เพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลสามารถแข่งขันกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้

การเตรียมขั้วไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายเทคนิค เช่นการพิมพ์หรือการระบาย (Printing or brushing) การสเปรย์ (Spray) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคนิคมีวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้นตอนที่แตกต่างกัน โดยปกติการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะผ่านหลายขั้นตอน เริ่มจากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนก่อนแล้วจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนมาเคลือบบนอิเล็กโทรด เพื่อที่จะลดขั้นตอนในกระบวนการของการเตรียมขั้วตัวเร่งปฏิกิริยา จึงได้มีการนำวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้ามาใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวหน้าตัวรองรับในขั้นตอนเดียว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนจะเรียบสม่ำเสมอ [1] กระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเลือกการพอกพูนของโลหะที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้ประโยชน์ได้จะเพิ่มขึ้นและสามารถลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลงได้ โดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีที่ง่ายและมีราคาต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ยิ่งไปกว่านั้นยังมีข้อดีคือ สามารถควบคุมปริมาณและสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพอกพูนบนขั้วไฟฟ้าโดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการพอกพูน

องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล ได้แก่ แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า ช่องทางการไหลของแก๊ส ตัวประสาน เมมเบรนและชั้นแพร่แก๊ส โดยชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion layer) ฝังแน่น

อยู่ระหว่างชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและช่องการไหลของแก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอม โดยที่ชั้นแพร่แก๊สมีหน้าที่หลักคือเป็น

- 1) ตัวกระจายแก๊ส (Gas diffuser)
- 2) ตัวสะสมกระแส (Current collector)
- 3) ตัวรองรับทางกายภาพ (Physical support)

ชั้นแพร่แก๊สที่แตกต่างกันจะมีโครงสร้างและสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถส่งผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อสัณฐานวิทยา โครงสร้างและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพอกพูนได้ และปัจจัยเหล่านี้ก็จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงเช่นกัน

โดยทั่วไปชั้นแพร่แก๊ส ที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอมมี 2 ประเภทคือ กระจกคาร์บอนและผ้าคาร์บอน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนทำมาจากเส้นใยคาร์บอน จากงานวิจัยในอดีตพบว่า การใช้ผ้าคาร์บอนเป็นชั้นแพร่แก๊สจะมีความแตกต่างจากการใช้กระจกคาร์บอนภายใต้การทำงานที่ความชื้นต่ำหรือสูงตามลำดับ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง [2]

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของชนิดและสมบัติของชั้นแพร่ของแก๊สต่อกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม โดยที่แพลทินัมที่พอกพูนได้จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยงานวิจัยนี้จะนำชั้นแพร่แก๊สที่มาจากแหล่งที่มาต่างกันซึ่งมีสมบัติที่แตกต่างกัน มาทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้ามาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพต่างๆ และนำมาทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้โดยสถานีทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง (Test station)

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของชั้นแพร่แก๊สต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ชั้นแพร่แก๊สที่มีความเหมาะสมต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัย
3. ศึกษาวิธีการเตรียมชั้นย่อยที่เหมาะสม ทั้งส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำโดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่

- เทคนิคการเตรียมชั้นขอบน้ำและชั้นไม่ขอบน้ำโดยวิธีการทาหรือการสเปรย์
 - ปริมาณของชั้นขอบน้ำ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร
4. นำการเตรียมชั้นย่อยที่เหมาะสมจากข้อ 3 มาใช้กับชั้นแพร์แก๊ส โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่
 - ผลของประเภทของชั้นแพร์แก๊ส (ผ้าคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอน)
 - ผลของความหนาของชั้นแพร์แก๊ส
 - ผลของปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร์แก๊ส
 - ผลของชั้นย่อยบนชั้นไมโครพอร์ส
 5. นำชั้นแพร์แก๊สรูปแบบต่างๆ ที่เตรียมได้จากข้อ 4 มาเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า
 6. วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนบนชั้นแพร์แก๊สแบบต่างๆ
 - ลักษณะทางสัณฐานและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ Scanning electron microscopy โดยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนผิวหน้าและภาคตัดขวางของขั้วไฟฟ้า
 - ศึกษาพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี
 7. นำตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนได้บนชั้นแพร์แก๊สต่างๆ มาอัดเป็นเมมเบรนประกอบขั้วอิเล็กโทรดเพื่อทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้โดยใช้สถานีทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง
 8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง [3-5]

เซลล์เชื้อเพลิงค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (Sir William Robert Grove) ผู้พิพากษาชาวเวลส์ โดยเขาทำการสังเกตว่าเมื่อเปิดวงจรไฟฟ้าในการทดลองกระบวนการแยกแก๊สจากน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางย้อนกลับ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนบนขั้วไฟฟ้าในกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า จากหลักการนี้ได้นำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้จริง ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแพลทินัม 2 แผ่น จุ่มอยู่ในกรดซัลฟิวริกเจือจาง ขั้วไฟฟ้าด้านหนึ่งมีแก๊สออกซิเจนในขณะที่อีกด้านมีแก๊สไฮโดรเจน เมื่อต่อปลายทั้งสองเข้ากับหลอดตัวนำจะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ให้ความต่างศักย์ประมาณ 1 โวลต์ เรียกอุปกรณ์นี้ว่า "แก๊สแบตเตอรี่" ต่อมาได้ทำการพัฒนาขั้วไฟฟ้าเป็นนิกเกิลซึ่งมีราคาถูก และใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นด่าง และมีการปรับปรุงเทคนิคบางอย่าง เช่น การเพิ่มอุณหภูมิและความดัน การใช้นิกเกิลพอร์นเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ต้นแบบของโกรฟได้ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1843 แต่ในขณะนั้นสิ่งประดิษฐ์นี้ยังไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้ามากพอที่จะนำไปใช้งานได้จริง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1959 วิศวกรชาวอังกฤษ (ฟรานซิส โทมัส เบคอน) Francis Thomas Bacon ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 กิโลวัตต์ ได้สำเร็จซึ่งนำไปสู่การจดสิทธิบัตร โดยหลักการเดียวกันนี้ถูกนำไปใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐด้วย เพื่อผลิตน้ำดื่มและพลังงาน ในช่วงปี ค.ศ. 1960 บริษัท United Technologies (UTX) ได้ผลิตเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในยานอวกาศให้กับองค์การนาซา โดยใช้ในยานอวกาศอะพอลโล ซึ่งได้มีการพัฒนานำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าร่วม ต่อมาได้มีการใช้ในเรือ ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกและทนทานกว่าเป็นอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเพื่อลดปริมาณการใช้แพลทินัม ทำให้อายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผู้บริโภค เช่นในรถยนต์มีความเป็นไปได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังได้มีความพยายามที่จะพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ การพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ในยานยนต์นั้น ปัญหาจะมีความซับซ้อนมากขึ้น โดย FCX ของ Honda เป็นเซลล์เชื้อเพลิงรุ่นแรกที่ใช้ในรถ แต่พบปัญหาในการติดเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -20°C โดยในปัจจุบันได้มีการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ขับเคลื่อนรถประจำทางในประเทศออสเตรเลีย ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงต้นนี้ยังสูงอยู่มากเพราะวัสดุที่ใช้มีราคาแพง อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงยังถูกมองว่าเป็นตัวเลือกที่ดี เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถหาง่ายและการใช้งานที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงมี

ประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งานในที่ห่างไกล เช่น ในยานอวกาศ สถานีตรวจอากาศที่ห่างไกล สวนสาธารณะขนาดใหญ่ ชนบท และการประยุกต์ใช้ทางการทหาร

ประเทศไทยได้เห็นความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง โดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ร่วมมือกับ New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) ในโครงการสาธิตการผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยทำการติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริกขนาด 50 กิโลวัตต์ ที่โรงไฟฟ้าบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อทดลองและศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ในอนาคต นอกจากนั้นกองทัพไทยโดยกรมการพลังงานทหารได้ร่วมมือกับมหาวิทยาลัยในปีพ.ศ. 2537 เพื่อศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ผลการศึกษาได้สร้างระบบทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลทำให้ทราบถึงกลไกการทำงาน ต่อมาในช่วงปีพ.ศ. 2546-2547 ได้ดำเนินการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงขนาดกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์และสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น วิทยุสื่อสารทหาร PRC-77 และในปีพ.ศ.2551 ได้ร่วมมือกับหน่วยงานจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (MTEC) ในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 1 กิโลวัตต์ โดยการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงในอนาคตอันใกล้นี้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าและพลังงานความร้อนสำหรับอาคารสำนักงานและโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น [6]

2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง [3-5]

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นกลุ่มของเทคโนโลยีที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี จัดเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่งซึ่งมีลักษณะคล้ายแบตเตอรี่ แตกต่างกันว่าแบตเตอรี่นั้นเมื่อนำไปใช้งานแล้วพลังงานภายในแบตเตอรี่หมดไป หากต้องการนำมาใช้ใหม่สามารถทำได้โดยอัดประจุในทางกลับกันเซลล์เชื้อเพลิงนั้นสามารถทำงานได้ต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบ ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อยู่หลายประเภทดังแสดงในตารางที่ 2.1 ประกอบไปด้วย เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cell, AFC), เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cell, PAFC), เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอนเนตหลอม (Molten carbonate fuel cell, MCFC), เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC), เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง (Direct methanol fuel cell, DMFC) เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภทมีลักษณะทางเคมีที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะ เช่น ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยใช้เกณฑ์การจำแนกหลายวิธีเช่น การจำแนกตามชนิดของสารตั้งต้น ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงหรือช่วงอุณหภูมิในการทำงาน เป็นต้น

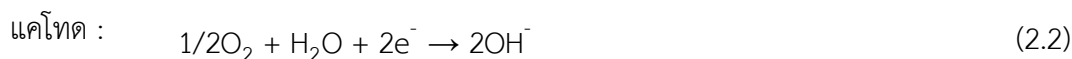
ตารางที่ 2.1 ชนิดและลักษณะการนำไปใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	อุณหภูมิในการทำงาน (°C)	อิเล็กโทรไลต์	ประจุเคลื่อนที่	การใช้งาน
แอลคาไลน์	60-80	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	OH ⁻	การทหาร งานอวกาศ
ฟီเอ็ม	60-80	เมมเบรนพอลิเมอร์	H ⁺	พลังงานสำรอง พลังงานพกพา การขนส่ง
เมทานอลโดยตรง	90	เมมเบรนพอลิเมอร์	H ⁺	ยานพาหนะและอุปกรณ์เคลื่อนที่
กรดฟอสฟอริก	150-200	กรดฟอสฟอริก	H ⁺	แหล่งพลังงานไฟฟ้าในสถานที่ขนาดเล็ก
คาร์บอนเนตหลอม	500-700	คาร์บอนเนตในเซรามิก LiHO ₂	CO ₃ ⁻	สาธารณูปโภคที่ใช้ไฟฟ้าระบบกระจายไฟฟ้า
ออกไซด์ของแข็ง	800-1000	เซรามิกแข็ง	O ²⁻	สาธารณูปโภคที่ใช้ไฟฟ้ะโรงผลิตไฟฟ้า

2.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (Alkaline fuel cell, AFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแรกที่สามารถนำมาใช้งานได้จริง จัดเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงประมาณ 50-70% อุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ไวต่อการปนเปื้อนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงจำเป็นต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง ทำให้ระบบโดยรวมมีราคาสูงมาก โดยองค์การนาซา (NASA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้กับยานอวกาศในปี 1960 เพื่อที่จะผลิตทั้งกระแสไฟฟ้าและน้ำดื่ม โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถเริ่มทำงานได้อย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพสูง แต่ต้นทุนการผลิตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีราคาแพง ทำให้การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จำกัดอยู่เฉพาะงานในด้านอวกาศเท่านั้น

ปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์



2.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพื้อเอเอ็ม (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือพื้อเอเอ็มนี้กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาผลิตพลังงาน เนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา อุณหภูมิในการทำงานต่ำและมีความหนาแน่นกำลังสูง รวมถึงมีประสิทธิภาพที่สูงด้วย (35–60%) มีขนาดตั้งแต่วัตต์จนถึงหลายกิโลวัตต์ และสามารถใช้งานได้ในระบบใหญ่ มีการใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติในการนำโปรตอนสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากคือแพลทินัมหรือแพลทินัมผสมโลหะบางชนิด เชื้อเพลิงที่ใช้คือแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ (99.99%) และแก๊สออกซิเจนหรืออากาศ พบว่าการปนเปื้อนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไฮโดรเจนจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยพันธะที่แข็งแรงและขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของแก๊สไฮโดรเจน ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลงนั่นเอง หลักการทำงานคือแก๊สไฮโดรเจนถูกป้อนเข้าที่ขั้วแอโนด ขณะที่แก๊สออกซิเจนหรืออากาศถูกป้อนเข้าที่ขั้วแคโทด แก๊สไฮโดรเจนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโปรตอนซึ่งมีประจุบวกและอิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบ โปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังเมมเบรนซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแคโทดในรูปของไฮโดรเนียมไอออน ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานสำหรับอุปกรณ์ และเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ที่ขั้วแคโทดแก๊สออกซิเจนถูกรีดิวส์โดยอิเล็กตรอนและรวมตัวกับโปรตอน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและมีความร้อนเกิดขึ้น ปัจจุบันนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการนำมาเป็นแหล่งพลังงานขับเคลื่อนสำหรับรถยนต์หรือรถโดยสารสาธารณะ เนื่องจากมีขนาดกะทัดรัดและให้พลังงานสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก สามารถเริ่มทำงานได้อย่างรวดเร็ว ทำงานที่อุณหภูมิต่ำและอายุการทำงานยาวกว่าเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่น หากแต่มีข้อเสียคือต้นทุนการผลิตสูงเนื่องจากชิ้นส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงมีราคาสูง เช่น เมมเบรน แผ่นสองขั้ว รวมถึงการใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และต้องการเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง กลไกการเกิดปฏิกิริยา รวมถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

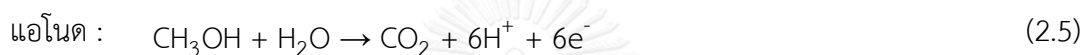
ปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพื้อเอเอ็ม



2.2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct methanol fuel cell, DMFC)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ถูกพัฒนามาจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็่ม โดยใช้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติในการนำโปรตอนสูงเป็นอิเล็กโทรไลต์เช่นกัน ซึ่งแตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่นคือ ใช้เมทานอลซึ่งเป็นของเหลวเป็นเชื้อเพลิง จึงถือว่าเป็นข้อดีในเรื่องของการจัดการเชื้อเพลิงที่สะดวกกว่า หากแต่ให้แรงดันไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำทำให้จำเป็นต้องใช้เซลล์เป็นจำนวนมากมาต่ออนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันสูง ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด (ประมาณ 35–40%) เมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่น เหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา เป็นต้น

ปฏิกิริยาเคมีของเซลล์ชนิดป้อนสารเมทานอลโดยตรง



2.2.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid fuel cell, PAFC)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการผลิตออกจำหน่ายทางการค้าแล้วในปัจจุบัน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้ตัวนำไฟฟ้าที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นเป็นอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการทำงานอยู่ในช่วง 150-200 องศาเซลเซียส ถึงแม้อุณหภูมิจะไม่สูงมากนักแต่เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์มีฤทธิ์เป็นกรด อุปกรณ์ภายในเซลล์จึงต้องสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ประสิทธิภาพของเซลล์มีประมาณร้อยละ 40-80% มักนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าในสถานที่ขนาดเล็ก เช่น โรงแรมและสำนักงาน เป็นต้น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกลุ่มเซลล์มีตั้งแต่ 200 กิโลวัตต์ จนถึง 11 เมกะวัตต์ สามารถทำงานได้แม้มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 1.5 นอกจากนี้แก๊สไฮโดรเจนแล้ว ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงอื่นได้อีกหลายชนิด เช่น แก๊สธรรมชาติ เมทานอล หรือแวนฟา แต่จำเป็นต้องทำการกำจัดกำมะถันในสารตั้งต้นออกให้เหลือน้อยที่สุดก่อน เซลล์มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์ชนิดอื่น

ปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก



2.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอม (Molten carbonate fuel cell, MCFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีอุณหภูมิการทำงานในช่วง 600-700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของอิเล็กโทรไลต์ แก๊สคาร์บอนเนตที่นิยมใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ โซเดียมคาร์บอนเนต โพแทสเซียมคาร์บอนเนตและแมกนีเซียมคาร์บอนเนต ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามักใช้โลหะ निकเกิลเป็นส่วนใหญ่ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 2 เมกะวัตต์และให้อุณหภูมิความดันสูงออกมา ซึ่งสามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะความร้อนร่วมได้ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมสูงขึ้นถึง 80-85 เปอร์เซ็นต์ และเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ทำให้ไม่ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ จึงทำให้ระบบโดยรวมมีราคาต่ำกว่า และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิสูงจึงสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซโพรเพน เป็นต้น แต่ที่ภาวะอุณหภูมิสูงจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างมาก

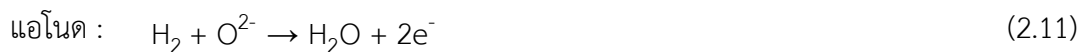
ปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอมเหลว



2.2.6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC)

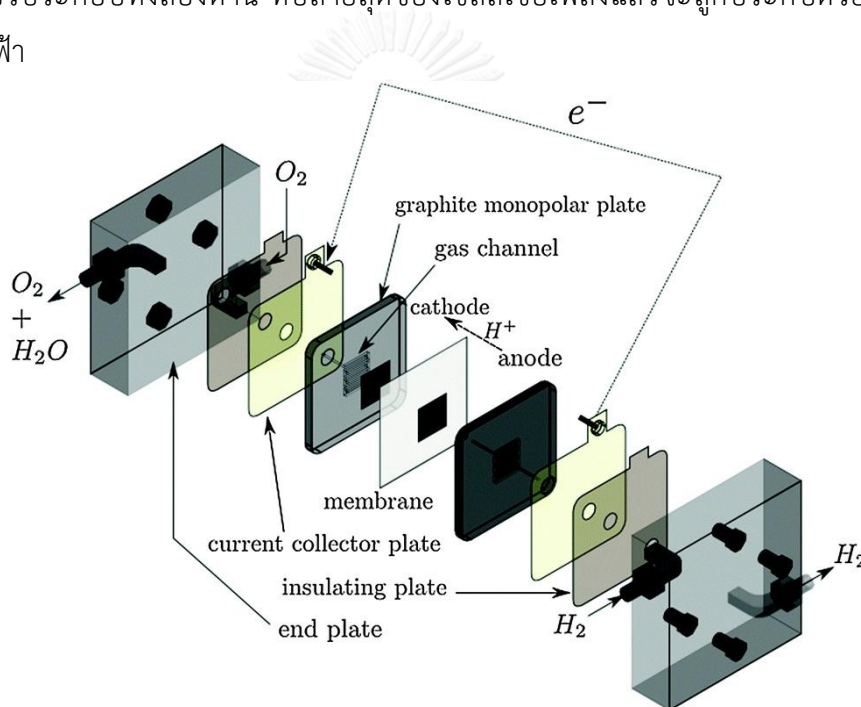
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีอุณหภูมิในการทำงานที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่น อุณหภูมิในการทำงานอยู่ในช่วง 800-1000 องศาเซลเซียส ใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นเซรามิกของแข็งที่มีความพรุน ทำจากสารประกอบโลหะออกไซด์ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) หรือ เซอร์โคเนียออกไซด์ (Zirconium oxide) โดยขั้วแคโทดทำด้วยโลหะแลนทานัมแมงกานีส (Lanthanum manganate) ส่วนขั้วแอโนดทำด้วยโลหะ นิกเกิล-เซอร์โคเนีย (Nickel-zirconia) เหมาะสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูง นอกจากนั้นยังมีอุณหภูมิสูงเป็นผลผลิตจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะความร้อนร่วมได้เช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบแก๊สคาร์บอนเนตหลอม ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นสูงถึงประมาณ 60-85 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ต้องใช้ระบบรีฟอร์มเมอร์ในการเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาเริ่มต้นในการทำงานนาน และอาจมีการชำรุดหรือการกัดกร่อนของส่วนประกอบ

ปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง



2.3 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอม [4, 5]

องค์ประกอบหลักของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอมแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยในเซลล์เชื้อเพลิงแกวประกอบด้วยเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวหลายเซลล์ต่อกัน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวประกอบด้วยเมมเบรนประกบกับชั้นแพร่แก๊สหรือเมมเบรนประกบขั้วไฟฟ้าอยู่ตรงกลาง โดยมีตัวประสานและแผ่นสองขั้วประกบทั้งสองด้าน ที่ปลายสุดของเซลล์เชื้อเพลิงแกวจะถูกประกบด้วยแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอม [7]

2.3.1 แผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Current collector plates) เป็นส่วนที่รับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าไปยังวงจรไฟฟ้าภายนอก โดยทั่วไปแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทำจากโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดี อีกทั้งต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดีอีกด้วย

2.3.2 ช่องทางการไหลของแก๊ส, แผ่นสองขั้วและแผ่นประกบ (Gas flow channels, bipolar plates and end plates) เป็นส่วนที่มีความสำคัญส่วนหนึ่งเนื่องจากทำหน้าที่เป็นตัวกระจายแก๊สเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนท์ภายในเซลล์ รวมทั้งเป็นช่องทางสำหรับการกำจัดน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าออกจากเซลล์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ในการนำอิเล็กตรอนออกไปยัง

แผ่นสะสมกระแสเพื่อไปยังวงจรไฟฟ้าภายนอก สมบัติทั่วไปของส่วนประกอบนี้ต้องมีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนและสามารถทนต่อภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ดี มีความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical properties) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และช่วยนำความร้อน (Heat removal) ที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ดี ส่วนใหญ่ขึ้นรูปจากโลหะ เช่น สแตนเลส หรือวัสดุผสมคาร์บอน (Carbon composite) เช่น แกร์ไฟต์ ผงคาร์บอน เป็นต้น วัสดุที่นิยมนำมาใช้ผลิตเป็นแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าคือแกร์ไฟต์ เนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนสูง แต่มีข้อเสียคือราคาแพงและเปราะ การออกแบบรูปร่างของช่องทางการไหลของแก๊สต้องคำนึงถึงทิศทางและอัตราการไหลที่เหมาะสมกับเซลล์เชื้อเพลิง โดยรูปร่างที่นิยมใช้ได้แก่ แผ่นช่องทางการไหลแบบเซอร์เพนไทน์ (Serpentine) แผ่นช่องทางการไหลแบบขนาน (Parallel) แผ่นช่องทางการไหลแบบช่องระหว่างนิ้ว (Interdigitated) เป็นต้น

2.3.3 ตัวประสาน (Seal) เนื่องจากขั้วไฟฟ้ามีความพรุนเพื่อให้เกิดสามารถไหลผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยา ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการรั่วของแก๊สเชื้อเพลิงไปด้านนอกเซลล์ซึ่งจะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ตัวประสานที่ดีนั้นต้องทนทานต่อภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี มีความสามารถในการป้องกันการรั่วซึม ทนต่อการกระแทกและเป็นฉนวนไฟฟ้า มีความยืดหยุ่นพอสมควร โดยทั่วไปตัวประสานทำขึ้นจากยางซิลิโคนมีหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สให้ยึดติดกับเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งด้านแอโนดและแคโทด

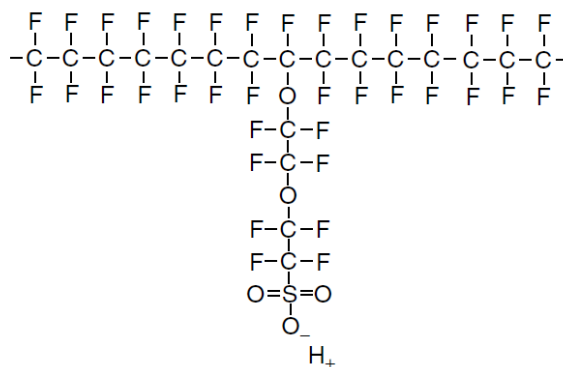
2.3.4 เมมเบรน (Membrane) [4, 8] เมมเบรนทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์และยอมให้โปรตอนเคลื่อนที่จากฝั่งแอโนดไปยังฝั่งแคโทดเท่านั้น เมมเบรนที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้คือ

- ต้องมีความสามารถในการนำประจุไฟฟ้าได้ดีแต่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า คือยอมให้ไอออนผ่านแต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน ยอมให้น้ำแพร่ผ่านแต่ไม่ยอมให้แก๊สแพร่ผ่าน มีความต้านทานต่อความร้อน ตลอดจนมีผิวหน้าที่สามารถยึดเกาะกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี
- มีมวลโมเลกุลสูงหรือเป็นพอลิเมอร์สายยาวทำให้ละลายน้ำได้ยาก ทนต่อสารเคมีได้ดี และทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของเมมเบรนได้
- ดูดซับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะและยอมให้น้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้ดี เพื่อป้องกันไม่ให้เมมเบรนแห้ง ซึ่งจะส่งผลทำให้การนำโปรตอนลดลงหรืออาจเกิดการเปลี่ยนรูป

จนทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเมมเบรนกับขั้วไฟฟ้าลดลง ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงด้วย

- ผิวหน้าที่เป็นบริเวณแลกเปลี่ยนประจุต้องเรียบเพื่อให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเมมเบรนกับขั้วไฟฟ้ามีค่าสูง

การจัดการน้ำเป็นปัญหาสำคัญในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็มซึ่งใช้เมมเบรนเป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยที่เมมเบรนต้องชุ่มน้ำอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ดังนั้นอัตราของน้ำที่ระเหยออกไปต้องเท่ากับอัตราน้ำที่ผลิตขึ้น ในกรณีที่น้ำระเหยมากเกินไป เมมเบรนเกิดการแห้งทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ด้วยสาเหตุนี้อาจทำให้เมมเบรนเกิดการแตกและเกิดรูรั่ว ส่งผลให้เกิดการรั่วของแก๊ส ทำให้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนรวมตัวกันโดยตรงจึงเกิดความร้อนสูง ซึ่งสามารถทำลายเซลล์ได้ แต่ถ้าน้ำระเหยออกน้อยเกินไป ขั้วไฟฟ้าจะถูกน้ำท่วมทำให้สารตั้งต้นไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้และทำให้ปฏิกิริยาลิ้นสุด เมมเบรนที่นิยมใช้สำหรับในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มคือ เมมเบรนเปอร์ฟลูออโรซัลโฟนิค (Perfluorosulfonic membrane) ถูกคิดค้นและพัฒนาโดยบริษัทดูปองท์ (Dupont) ซึ่งมีชื่อทางการค้าคือเนฟิออน (Nafion) เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนหรือเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) กับเปอร์ฟลูออโรซัลโฟเนต (Perfluorosulfonate) มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มใส โดยโครงสร้างของซัลโฟเนตฟลูออโรเอทิลีนประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเนฟิออนเมมเบรน [4]

- สารพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนเป็นแกนหลักของโครงสร้าง โดยมีสมบัติเป็นพื้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอนซึ่งเป็นพันธะที่มี

ความแข็งแรงสูง จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรงทนทานต่อสารเคมีและ
ภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

- สายโซ่ $-O-CF_2-O-CF-O-CF_2-O-CF_2-$ ทำหน้าที่เชื่อมระหว่างแกนหลักกับส่วน
ซัลโฟนิกไอออน
- กรดซัลโฟนิกที่สร้างพันธะที่ปลายของพอลิเมอร์กลายเป็นหมู่ SO_3^- ในส่วนปลายเป็น
ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีความสามารถในการดูดซึมโมเลกุลของน้ำไว้ โดยที่
บริเวณนี้แรงยึดเหนี่ยวพันธะระหว่างหมู่ SO_3^- กับโปรตอนค่อนข้างอ่อน ทำให้
โปรตอนในเมมเบรนสามารถเคลื่อนที่ได้

เนฟออนเมมเบรนมีขนาดและความหนาแตกต่างกันโดยระบุด้วยตัวอักษร N ตามด้วยเลข 3
หรือ 4 ตัว โดยตัวเลข 2 ตัวแรกแทนค่าของน้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) คูณด้วย 100 และ
ตัวเลขสุดท้ายหรือรองสุดท้ายแทนค่าของความหนาของเนฟออนเมมเบรนในหน่วยมิลล์ (mills) โดย
1 มิลล์มีค่าเท่ากับ $1/1000$ นิ้วหรือเท่ากับ 0.0254 มิลลิเมตร โดยความหนาของเมมเบรนมีค่าตั้งแต่
2, 3.5, 5, 7 และ 10 มิลล์ เช่น Nafion 117 มีน้ำหนักสมมูลเท่ากับ 1100 และมีความหนา 7 มิลล์
หรือ 178 ไมโครเมตร เป็นต้น

2.3.5 ชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion layer, GDL)

ชั้นแพร่แก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็มเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและช่องทาง
การไหลของแก๊ส โครงสร้างของชั้นแพร่แก๊สทำหน้าที่กระจายแก๊สเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยแก๊ส
ไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับทางกายภาพ
สำหรับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา และช่วยให้ไอน้ำที่มาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิงผ่านไปยังเมมเบรนส่งผลให้
ความนำไอออนเพิ่มขึ้น ในขณะที่น้ำที่เกิดขึ้นที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกำจัดออกจากชั้นแพร่แก๊สไปยัง
ช่องทางไหลของแก๊ส โดยทั่วไปชั้นแพร่แก๊สจะถูกปรับสภาพเพื่อให้ผิวหน้าและรูพรุนในชั้นแพร่
แก๊สไม่เกิดการอุดตันของน้ำ ซึ่งสามารถกีดขวางการเคลื่อนที่ของแก๊สไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ชั้นแพร่
แก๊สโดยทั่วไปคือผลิตภัณฑ์ที่ทำจากคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ผ้าย่านคาร์บอนและกระดาษ
คาร์บอน สาเหตุที่นิยมใช้เนื่องจาก

- มีการนำไฟฟ้าที่ดี
- มีความเสถียรในภาวะกรด
- ยอมให้แก๊สแพร่ผ่านสูง

- มีความยืดหยุ่นในกระบวนการกดอัด
- สามารถควบคุมโครงสร้างของรูพรุนของชั้นแพร์แก๊สแบบชั้นคู่ได้

ชั้นแพร์แก๊สที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็มในปัจจุบันคือ ฝ้ายคาร์บอนและกระดาษคาร์บอน โดยทั่วไปเส้นใยคาร์บอนจะถูก graphitize ที่อุณหภูมิสูงกว่า 2000 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า (Electronic conductivity) และความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) และแช่ด้วย thermoset resin เพื่อผลิตเป็นกระดาษคาร์บอน ส่วนฝ้ายคาร์บอนนั้นถูกผลิตโดยการสานของเส้นใยคาร์บอน จากนั้นทำการ carbonization หรือ graphitization ซึ่งจากกระบวนการผลิตที่ต่างกันทำให้มีโครงสร้างและสมบัติที่ต่างกันด้วย จากงานวิจัยพบว่าในกรณีที่ทำการป้อนแก๊สที่มีความชื้นสูงเข้าสู่ระบบพบว่าการใช้ฝ้ายคาร์บอนในด้านแคโทดนั้น มีการกำจัดน้ำออกที่ง่ายกว่าเนื่องจากโครงสร้างของฝ้ายคาร์บอนมีความคดเคี้ยวของโครงสร้างรูพรุนที่ต่ำกว่าและมีผิวหน้าที่มีความขรุขระ ในกรณีที่ทำการป้อนแก๊สที่มีความชื้นต่ำเข้าสู่ระบบพบว่าการใช้กระดาษคาร์บอนจะมีสมรรถนะที่ดีกว่า เนื่องจากโครงสร้างของกระดาษมีความคดเคี้ยวที่มากกว่า จึงช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ไปกับแก๊สที่ป้อนเข้ามา ช่วยป้องกันไม่ให้เมมเบรนสูญเสียน้ำจึงช่วยลดความต้านทานในระบบได้ นอกจากการใช้ฝ้ายคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอนเป็นชั้นแพร์แก๊สแล้ว ยังได้มีการพัฒนาการใช้กระดาษคาร์บอนที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ซึ่งพบว่ามีสภาพการนำไฟฟ้าที่สูง นอกจากชั้นแพร์แก๊สที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังมีการพัฒนาการใช้โลหะเป็นองค์ประกอบในชั้นแพร์แก๊สด้วยเช่น ตาข่ายเหล็ก (Stainless steel mesh), ตาข่ายไทเทเนียม (Titanium mesh), ตาข่ายนิกเกิล (nickel mesh) เป็นต้น

โดยทั่วไปชั้นแพร์แก๊สจะถูกปรับสภาพโดยสารที่ไม่ชอบน้ำ เพื่อช่วยในการกำจัดน้ำออกจากขั้วแคโทดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสารไม่ชอบน้ำที่ถูกนำมาใช้กับฝ้ายคาร์บอนและกระดาษคาร์บอนมีหลายชนิดเช่น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนหรือเทฟลอน พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) และฟลูออรีเนตเอทิลีนโพรพิลีน (Fluorinated ethylene propylene, FEP) การเตรียมสารไม่ชอบน้ำเหล่านี้กับชั้นแพร์แก๊สสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การจุ่ม การสเปรย์และการทา เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่นการจุ่ม สามารถทำได้โดยจุ่มชั้นแพร์แก๊สลงในสารแขวนลอยที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ตามด้วยการทำให้แห้งและเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิวและเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่มีความสม่ำเสมอ ปริมาณของสารไม่ชอบน้ำที่ต้องการสำหรับชั้นแพร์แก๊สสามารถทำได้โดยการควบคุมเวลาในการจุ่มและความเข้มข้นของสารแขวนลอย โดยปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบในชั้นแพร์แก๊สส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง จากงานวิจัยพบว่ากระดาษคาร์บอนที่มี PTFE เป็นองค์ประกอบสูงสามารถช่วยลดปริมาณ

น้ำในชั้นแพร์แก๊สได้ แต่ปริมาณ PTFE ที่มากเกินไปจะทำให้ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูง ความเป็นรูพรุนและการถ่ายโอนแก๊สต่ำ [9] ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง แต่ในทางกลับกันเมื่อปริมาณ PTFE ในชั้นแพร์แก๊สมีปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น เนื่องจากทำให้การแพร่ของแก๊สออกซิเจนดีขึ้นและการถ่ายโอนน้ำในระบบอย่างมีประสิทธิภาพ [10, 11]

นอกจากนั้นเพื่อเป็นการลดขีดจำกัดในการถ่ายโอนมวล (Mass transfer limitation) ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม พบว่าวิธีที่มีประสิทธิภาพคือการใช้ชั้นแพร์แก๊สแบบชั้นคู่ (Dual-layer gas diffusion layer) โดยประกอบด้วย

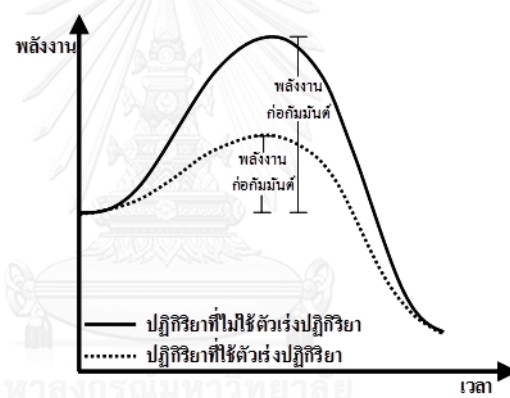
- ผ้าคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอนทำหน้าที่เป็นตัวกระจายแก๊สและเป็นตัวรองรับทางกายภาพสำหรับขั้วไฟฟ้า
- ชั้นไมโครพอร์สที่บางซึ่งประกอบด้วย ผงคาร์บอนและสารไม่ชอบน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ PTFE

โดยชั้นไมโครพอร์สนี้ช่วยลดความต้านทานในการสัมผัสระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับผ้าคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอนโดยการจัดตัวเป็นชั้นที่มีความเรียบและมีความสม่ำเสมอ ซึ่งไม่ยอมให้อุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ระบุว่าชั้นไมโครพอร์สช่วยในเรื่องการจัดการน้ำในเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ของระบบและยังมีน้ำอีกส่วนหนึ่งมาจากความชื้นที่ป้อนเข้ามา กับแก๊สที่เป็นสารตั้งต้น ดังนั้นภาวะการอึดตัวของน้ำที่เป็นของเหลวที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นไมโครพอร์สกับผ้าคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอน และรอยต่อระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับชั้นไมโครพอร์สนี้สามารถทำให้เกิดน้ำท่วมที่ด้านแคโทดได้ [12] โดยชั้นไมโครพอร์สทำหน้าที่คล้ายวาล์วที่ผลักน้ำออกจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องทางการไหลของแก๊ส เพื่อควบคุมระดับความอึดตัวของน้ำในระบบ โดยหากความไม่ชอบน้ำของชั้นไมโครพอร์สที่มากนั้นจะทำให้สามารถกำจัดน้ำออกจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดได้เร็ว [13] โดยทั่วไปผงคาร์บอนจะถูกผสมกับ PTFE และตัวทำละลายออร์แกนิก เพื่อทำการเตรียมหมึกคาร์บอน (Carbon ink) สำหรับชั้นไมโครพอร์ส จากนั้นทำการพอกพูนหมึกคาร์บอนลงบนผ้าคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอนเพียงด้านเดียวและทำการเผาด้วยความร้อนเพื่อระเหยสารลดแรงตึงผิวออกทั้งหมดและทำให้เกิดการกระจายตัวของ PTFE ที่มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งชั้นแพร์แก๊ส โดยการเผาด้วยความร้อนสูงนี้จะทำให้ชั้นไมโครพอร์สมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้การกำจัดน้ำออกจากขั้วแคโทดได้ดีขึ้น [14, 15] โดยโครงสร้างของผงคาร์บอนที่มีรูพรุนที่เหมาะสมต่อการเตรียมชั้นไมโครพอร์สพบว่าควรมีปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ที่สูงและขนาดรูพรุนที่เล็ก ซึ่งง่ายต่อการแพร่ของแก๊สและยังช่วยลดการสะสมของน้ำภายในชั้นไมโครพอร์สอีกด้วย โดยพบว่าในกรณีที่มีพื้นที่ผิวของผงคาร์บอนมากเกินไปนั้น จะทำให้มีการเก็บน้ำในชั้นไมโครพอร์ส

เป็นส่วนใหญ่ ทำให้เมมเบรนขาดน้ำส่งผลให้การนำโปรตอนในเมมเบรนลดลง นอกจากนั้นยังพบว่า ความหนาของชั้นไมโครพอร์สควรมีค่าที่พอดี ในกรณีที่ชั้นไมโครพอร์สบางมากจะทำให้ผิวหน้าของชั้นไมโครพอร์สไม่เรียบส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น ในขณะที่ความหนาของชั้นไมโครพอร์สที่มากเกินไปจะทำให้เกิดขีดจำกัดของการถ่ายโอนมวล (Mass transfer limitation) เนื่องจากระยะทางที่แก๊สต้องแพร่ผ่านมากขึ้นนั่นเอง ด้วยปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง [16]

2.3.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [17-19]

หน้าที่หลักของตัวเร่งปฏิกิริยาคือทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นง่าย ซึ่งในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมักเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณพื้นผิว (Surface reaction) ของขั้วไฟฟ้า โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาโดยทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงเส้นทางการดำเนินไปของปฏิกิริยาไปในทิศทางที่มีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยที่สุดที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ และเมื่อเส้นทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยามีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



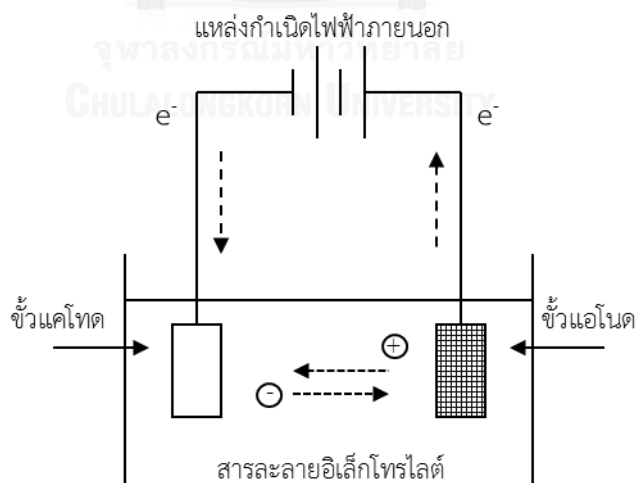
รูปที่ 2.3 เส้นทางการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [18]

ตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงจัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) ที่มีสารตั้งต้นเป็นแก๊ส และตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็งที่มีสมบัติทางเคมีของผิว จึงเกิดปฏิกิริยาจำเพาะตามธรรมชาติทางเคมี โดยทั่วไปประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับขนาดและลักษณะของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นผิวมากจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากด้วย นอกจากนั้นการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อความว่องไว (Activity) ในการเกิดปฏิกิริยา กล่าวคือถ้าตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ไม่เพียงแต่จำนวนพื้นที่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ยังมีผลทำให้อะตอมที่ส่วนมุม (Corner) และขอบ (Edge) ของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนั้นยังอาจเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาและค่าการเลือก (Selectivity) ของปฏิกิริยา โดยหน้าที่หลักของตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์

เชื้อเพลิงคือทำหน้าที่ดูดซับแก๊ส (Gas adsorption) ส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transfer) และเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Surface reaction) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีความสามารถในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนได้ดีมาก ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนแตกออกเป็นอะตอมเกาะอยู่ที่ผิวของโลหะ ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนนี้จะว่องไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยามากกว่าโมเลกุลของไฮโดรเจน และการใช้แพลทินัมแบบผงละเอียดนั้นจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ส่งผลให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วเซลล์เชื้อเพลิงแบบพีอีเอ็มจะทำงานที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าการใช้โลหะชนิดอื่น ดังนั้นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกเทคนิคนี้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูกและประสิทธิภาพในการเลือกโลหะที่มาพอกพูนที่บริเวณผิวหน้าของชั้นแพร่แก๊ส ทำให้การใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดสูงทำให้เป็นการลดปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาลง [20]

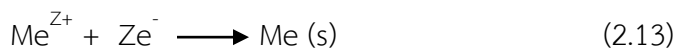
2.4 การพอกพูนโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrodeposition) [21]

หลักการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้าคือ เป็นกระบวนการที่ใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่ต่อกับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกแสดงดังรูปที่ 2.4



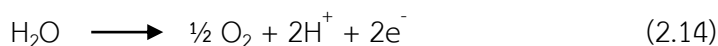
รูปที่ 2.4 กระบวนการการพอกพูนโดยใช้กระแสไฟฟ้า

ระหว่างการพอกพูนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปผ่านขั้วไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของไอออนที่แต่ละขั้ว โดยที่ขั้วลบไอออนที่ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดส์จะเคลื่อนที่มาเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นโลหะเกาะที่ขั้วแคโทดดังสมการที่ (2.13)



โดยที่ Me คือ โลหะ และ Z คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ร่วมในการเกิดปฏิกิริยา

ขั้วบวกหรือขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนโมเลกุลหรือไอออนของสารรีดิวซ์ในสารละลายจะเกิดออกซิไดส์ ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนออกสู่ระบบที่ขั้วบวกหรือขั้วแอโนด โดยถ้าใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุเฉื่อย เช่น โลหะมีตระกูล ได้แก่ แพลทินัมจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการผลิตก๊าซออกซิเจนขึ้น แสดงดังสมการที่ (2.14)

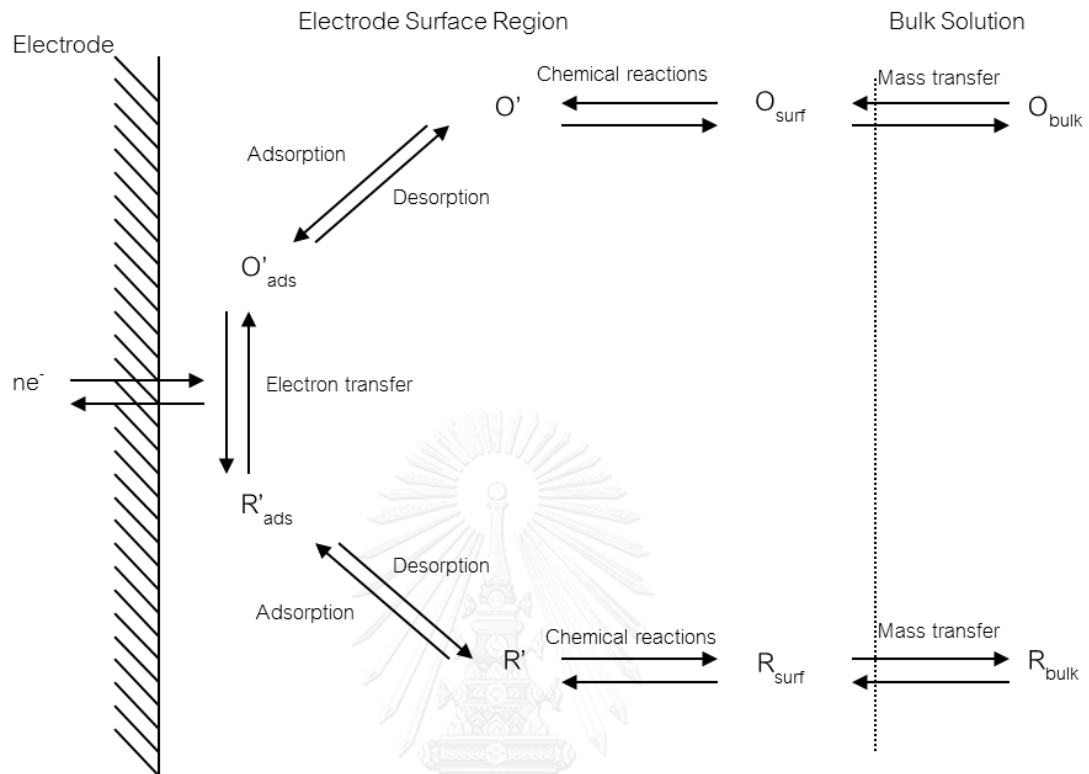


โดยทั่วไปการควบคุมกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าสามารถทำได้ 2 แบบคือการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าและการทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าทั้ง 2 แบบสามารถนำไปใช้ในการพอกพูนโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าได้หลายรูปแบบ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ตลอดการพอกพูน โดยตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการพอกพูนแบบกระแสคงที่นั้นมีเพียงตัวแปรเดียว คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) ซึ่งคือปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ใช้ในการพอกพูน โดยปัจจัยอื่นที่สามารถมีผลต่อการพอกพูนด้วยไฟฟ้าประกอบด้วย

- สมบัติของสารที่ใช้ในการพอกพูนโดยทั่วไปคือโลหะ โดยไอออนของโลหะเหล่านี้จะมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนไม่เท่ากัน ทำให้ผิวของโลหะที่พอกพูนด้วยไฟฟ้ามีลักษณะต่างกัน
- การกวน (Agitation) ทำให้ไอออนในสารละลายเคลื่อนที่ไปยังผิวของชิ้นงานได้ดีขึ้นและทำให้เกิดการพอกพูนที่ดี เนื่องจากเป็นการช่วยการถ่ายเทมวลสารของไอออนโลหะจากสารละลายไปยังผิวของขั้วอิเล็กโทรด
- อุณหภูมิ (Temperature) มีผลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลาย ทำให้ไอออนในสารละลายสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วและมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา
- สารเติมแต่ง (Additives) เป็นสารที่ใช้เติมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพและโครงสร้างของการพอกพูนสาร สารเติมแต่งมีอิทธิพลต่อจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีของสารที่เกิดการพอกพูนและขบวนการเกิดผลึกของโลหะที่พอกพูน
- เวลา (Time) เวลาที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานและปริมาณของสารที่พอกพูนได้

การเกิดปฏิกิริยาโดยรวมของการพอกพูนโลหะด้วยไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การถ่ายโอนมวลสารจากสารละลาย (Bulk solution) ไปยังพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การถ่ายโอนมวลสารในสารละลาย [22]

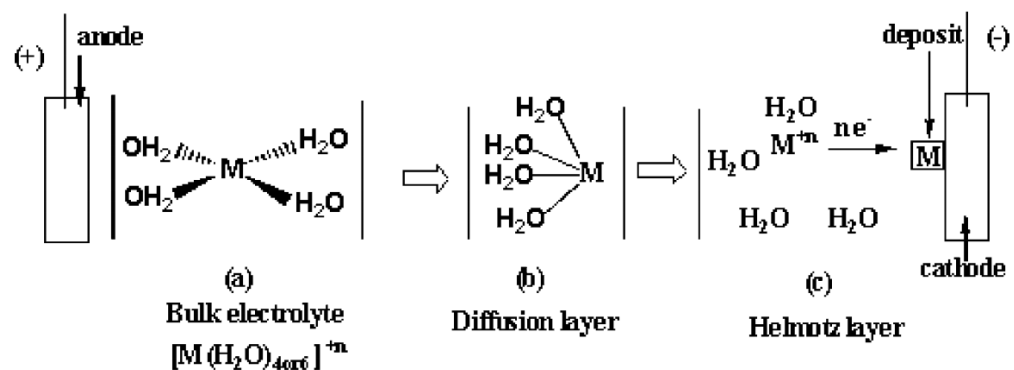
การถ่ายโอนมวลสารเป็นการถ่ายโอนตัวออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์ในสารละลายสู่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าการถ่ายโอนมวลสารในสารละลายประกอบไปด้วย 3 กลไกด้วยกันคือ การแพร่ (diffusion) การพา (convection) และไมเกรชัน (migration) โดยสามารถอธิบายแต่ละกระบวนการได้ดังนี้

- การแพร่ (Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ จนกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลาย อัตราเร็วในการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (concentration gradient)
- การพา (Convection) ของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของสารละลายภายในระบบ
- ไมเกรชัน (Migration) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสารละลายนั้นซึ่งแตกต่างจากระบบอื่นที่อนุภาคไม่มีประจุ (ไม่เป็นไอออน) โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าขั้วแคโทดและไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าหาหรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า

อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่เกรดเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีผลให้การไหลของกระแสในวงจรนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนที่มีประจุเท่ากันจำนวนมากอยู่รวมกันจะเกิดการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้มีการสูญเสียกระแสส่วนหนึ่งไปในการเคลื่อนที่ของไอออนที่ไม่ต้องการในการเกิดปฏิกิริยา

2. การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

- ไอออนของโลหะที่ถูกล้อมรอบด้วยน้ำในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดินทางมาถึงขั้วแคโทดภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า การแพร่และการพา
- ไอออนของโลหะเดินทางเข้ามายังบริเวณ diffusion layer ของขั้วแคโทด ที่บริเวณ diffusion layer นี้ สนามไฟฟ้ายังไม่แรงพอที่จะทำให้ไอออนของโลหะหลุดเป็นอิสระจากน้ำที่ล้อมรอบ แต่โมเลกุลของน้ำจะจัดตัวภาพใต้สนามไฟฟ้า (รูปที่ 2.6 (b))
- ไอออนของโลหะผ่านมายัง diffusion part ของ double layer โมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบถูกกำจัดออกและปล่อยเป็นไอออนอิสระ จากนั้นไอออนโลหะจะถูกรีดิวซ์และพอกพูนบนขั้วแคโทดผ่านกลไก ad-atom



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี [23]

3. การสร้างผลึก (Electrocrystallization) การเกิดผลึกประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการคือ

- การเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation) เป็นขั้นตอนการเกิดนิวคลีโอ (Nuclei) เมื่อความหนาแน่นกระแสและความเข้มข้นของไอออนโลหะเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดนิวคลีโอเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของโลหะที่พอกพูนมีขนาดลดลง
- การเติบโตของผลึก (Crystal growth) เมื่อนิวคลีโอเกิดขึ้นในระบบ นิวคลีโอจะเริ่มเติบโตเป็นผลึก

2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน [21, 24]

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็ลสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ขั้วแคโทดเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดถึงหนึ่งแสนเท่า ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกควบคุมโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ขั้วแคโทด

จลนพลศาสตร์และกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและชนิดของสารพาประจุ การรีดักชันของออกซิเจนสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีทางคือ

1. วิธีทางการใช้ 4 อิเล็กตรอนโดยตรง (Direct 4-electron pathway) การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนโดยใช้วิธีทางนี้จะป็นขั้นตอนที่แก๊สออกซิเจนถูกรีดิวซ์กลายเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) หรือน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (2.15) และ (2.16) ซึ่งขั้นตอนการเกิดการรีดิวซ์นี้อาจปรากฏสารตัวกลางเปอร์ออกไซด์ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว แต่สารตัวกลางนี้จะไม่เปลี่ยนเป็นเปอร์ออกไซด์อยู่ในสารละลาย

ในสารละลายแอลคาไลน์



ในสารละลายกรด



สำหรับวิธีทางนี้จะปรากฏขึ้นมากบนตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจำพวกโลหะมีตระกูล เช่น แพลทินัม แพลลาเดียมหรือเงิน ออกไซด์ของโลหะ รวมไปถึงกลุ่มวงขนาดใหญ่ของโลหะทรานซิชันบางชนิดด้วย

2. วิธีทางเปอร์ออกไซด์ (Peroxide pathway) หรือวิธีทางสองอิเล็กตรอน (2-electron pathway) โดยจะเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ในสารละลาย ซึ่งแสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้

ในสารละลายแอลคาไลน์



ในสารละลายกรด



โดยจะเริ่มจากการเปลี่ยนแก๊สออกซิเจนให้กลายเป็นเปอร์ออกไซด์ในสารละลายดังสมการที่ (2.17) และ (2.20) จากนั้นเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์ดังสมการที่ (2.18) และ (2.21) เมื่อรวมสมการข้างต้นจะได้สมการการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ดังสมการที่ (2.19) และ (2.22) และวิธีทางนี้จะปรากฏขึ้นมากบนวัสดุที่เป็นคาร์บอนเกือบทุกชนิด ทอง พรอท ออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน นอกจากนี้ยังรวมไปถึงกลุ่มวงขนาดใหญ่ของโลหะทรานซิชันบางชนิด ทั้งนี้สารตัวกลางซึ่งเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนมีอยู่หลายชนิด จึงสามารถมีหลายกลไกในการเกิดปฏิกิริยา

เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ทำงานที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำประมาณ 60-80 องศาเซลเซียส ดังนั้นปัญหาหลักคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิแดนซ์ค่อนข้างช้า ในปัจจุบันนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมในการเร่งปฏิกิริยาทั้งทางฝั่งแคโทดและแอโนด โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนดังสมการที่ (2.23)

$$i = i_0 \left(\exp \left[-\frac{\alpha_{Red} n F \eta}{RT} \right] - \exp \left[\frac{\alpha_{Ox} n F \eta}{RT} \right] \right) \quad (2.23)$$

- เมื่อ
- i คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเมตร)
 - i_0 คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
 - α คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ
 - n คือ จำนวนอิเล็กตรอน
 - F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 คูลอมบ์ต่อโมล)
 - η คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (โวลต์)
 - R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.3145 จูลต่อโมลเคลวิน)
 - T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

จะเห็นว่าถ้าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์สูงขึ้นด้วย จากตารางที่ 2.2 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของโลหะชนิด

เดียวกันสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน ซึ่งส่งผลให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนประมาณ 10^5 เท่า [25] การที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนมีค่าต่ำนั้นส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าโดยรวมของระบบต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนระหว่างโลหะผสมแพลทินัมและแพลทินัมบริสุทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของโลหะผสมมีค่าสูงกว่าค่าดังกล่าวของแพลทินัมบริสุทธิ์เล็กน้อย ดังนั้นการใช้โลหะผสมในการเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงจึงได้รับความสนใจมากขึ้น นอกจากนี้การใช้โลหะผสมจะส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีต้นทุนในการผลิตต่ำลง

ตารางที่ 2.2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนในเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็มที่ภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 300 เคลวิน ความดัน 1 บรรยากาศ) [26]

ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า			
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$		$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	
โลหะ	$\log i_0$	โลหะ	$\log i_0$
Pd	1	Pt	-7
Pt	0.9	Ni	-7.45
Ir	0.3	Co	-6.62
Ni	-1.2	Fe	-9.68
Au	-1.4	Ir	-10
W	-1.9	Pt-Cr	-6.01
Nb	-2.8	Pt-Fe	-6.16
Ti	-4.2	Pt-Mn	-6.2
Cd	-6.6	Pt-Co	-6.23
Pb	-8	Pt-Ni	-6.31

2.6 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

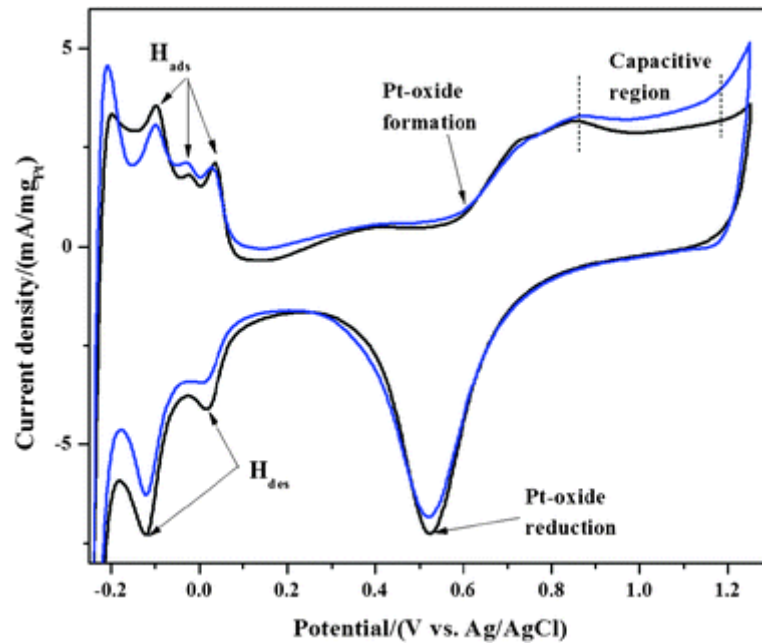
เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี อีกทั้งในการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีความซับซ้อน ด้วยเหตุนี้ทำให้ในการที่จะเข้าใจถึงปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นจำเป็นต้องมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการช่วยในการ

วิเคราะห์เพื่อที่จะช่วยในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงให้มีสมรรถนะที่สูงและมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเทคนิคที่ใช้ในการหาพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical surface area; ESA) ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry; CV) และทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

2.6.1 การหาพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี [5, 19, 27]

ในการหาพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งเป็นพื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยาจริงโดยอาศัยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เป็นกระบวนการวัดค่ากระแสไฟฟ้าแบบฟาราเดย์ (Faradaic current) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดอกซ์ในช่วงความต่างศักย์ที่กำหนด โดยการวัดค่าจะเริ่มจากที่ค่าความต่างศักย์เริ่มต้น จากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าความต่างศักย์จำกัดที่กำหนดไว้ และที่จุดนี้การวัดค่าจะเริ่มไปในทางย้อนกลับ โดยค่ากระแสที่ได้จะเหมือนกับในช่วงแรกแต่อยู่ในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากขึ้นแสดงถึงสารตั้งต้นถูกออกซิไดซ์ทำให้ได้กระแสที่มากขึ้นซึ่งเรียกว่า กระแสไฟฟ้าแอโนดิก (Anodic current) พีคสูงสุดของกระแสไฟฟ้าจะปรากฏเมื่อสารตั้งต้นถูกใช้ในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเกิดที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าจะลดลงเนื่องจากความหนาของชั้นคู่ (Double-layer) ที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งในช่วงของศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับ (Reverse voltage) ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบมากขึ้น ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะเรียกว่า กระแสไฟฟ้าแคโทดิก (Cathodic current) ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อที่จะวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของกระบวนการรีดอกซ์ เนื่องจากสามารถทำได้โดยง่าย นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของระบบนั้นๆได้ด้วย

ไซคลิกโวลแทมโมแกรมในการดูดซับด้วยไฮโดรเจนกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแบบพหุผลึก (Polycrystalline platinum) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 พบพีคที่บ่งบอกถึงการคายซับ (ในช่วงกระแสไฟฟ้าแอโนดิก) และดูดซับ (ในช่วงกระแสไฟฟ้าแคโทดิก) ของอะตอมของไฮโดรเจนบนระนาบ 110 และ 100 ที่กระแสไฟฟ้าประมาณ 125 และ 275 มิลลิแอมแปร์ตามลำดับ อีกทั้งพบพีคที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.8 ถึง 1.0 โวลต์ ซึ่งหมายถึงการดูดซับของไฮดรอกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (Pt-OH) และเมื่อพิจารณาในช่วงกระแสไฟฟ้าแคโทดิก ยังพบพีคที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.8 ซึ่งเป็นพีคที่บ่งบอกถึงการดูดซับของออกซิเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (Pt-O) ด้วย



รูปที่ 2.7 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแบบพหุผลึกด้วยการใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรเจน [28]

ในการคำนวณหาพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical active surface area; ESA) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมโมแกรมเมธีสามารถทำได้โดยการดูดซับด้วยไฮโดรเจน ซึ่งเป็นวิธีในการหาประจุในการคายซับของไฮโดรเจน ซึ่งจะได้ข้อมูลในรูปโวลแทมโมแกรม สำหรับการหาพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาด้วยการดูดซับด้วยไฮโดรเจน มาคำนวณประจุที่ใช้ในการคายซับไฮโดรเจนจากสมการที่ 2.24 ดังแสดง

$$Q_H = A \cdot v \quad 2.24$$

- เมื่อ Q_H คือ ปริมาณประจุในการคายซับของไฮโดรเจน (คูลอมบ์)
 A คือ พื้นที่ใต้กราฟไซคลิกโวลแทมโมแกรม (แอมแปร์โวลต์ต่อตารางเซนติเมตร)
 v คือ อัตราการส่องกราด (scan rate) ในหน่วยโวลต์ต่อวินาที

เมื่อทราบถึงประจุที่ใช้ในการคายซับแล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าโดยแทนค่าในสมการที่ 2.25

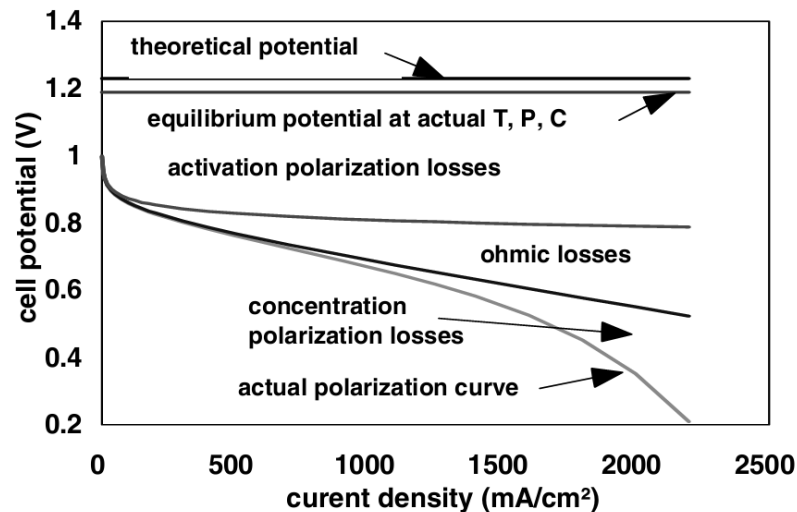
$$ESA_H = \frac{A}{C_{Pt,H} \times CL} \quad 2.25$$

- เมื่อ ESA_H คือ พื้นที่การเกิดปฏิกิริยาในการคายซับด้วยไฮโดรเจน (ตารางเซนติเมตรของแพลทินัมต่อมิลลิกรัมของแพลทินัม)

- $C_{Pt,H}$ คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในการคายซับไฮโดรเจนของแพลทินัม
 CL คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

2.6.2 โพลาริเซชัน (Polarization) [5, 8]

ในการหาสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น โดยทั่วไปนิยมนำเสนอในรูปแบบของโพลาริเซชัน (Polarization curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (Voltage) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) เป็นเทคนิคพื้นฐานที่ใช้ในการบอกถึงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งเซลล์เดี่ยว (Single cell) และเซลล์แบบลำดับชั้น (Stack cells) อีกทั้งข้อมูลดังกล่าวสามารถบ่งบอกถึงศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด (Open circuit voltage) และศักย์ไฟฟ้าทำงาน (Working voltage)



รูปที่ 2.8 โพลาริเซชันโดยทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ [8]

เซลล์เชื้อเพลิงเมื่อต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าภายนอกและมีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบ จะผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าต่ำกว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎี (1.229 โวลต์) หรือความต่างศักย์ที่สภาวะสมดุลหรือสภาวะการผันกลับได้ ซึ่งผลต่างระหว่างค่าความต่างศักย์จริงที่จ่ายให้กับวงจรภายนอกกับความต่างศักย์ที่สภาวะสมดุลตามหลักอุณหพลศาสตร์เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Overpotential) การลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากค่าจริงเกิดในกระบวนการที่เรียกว่า โพลาริเซชัน (Polarization) โดยการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.14)

$$E_{cell} = E_{cell,rev} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$E_{\text{cell,rev}}$	คือ ศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้ของเซลล์เมื่อเทียบขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (โวลต์)
	η_{act}	คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินจากปฏิกิริยาทางเคมีของทั้งขั้วแคโทดและแอโนด (โวลต์)
	η_{ohm}	คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากความต้านทานที่ขั้วแอโนด (โวลต์)
	η_{conc}	คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินเนื่องจากความเข้มข้น (โวลต์)

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลมาเขียนกราฟ โพลาริเซชัน พบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่า ศักย์ไฟฟ้าผันกลับได้ตามทฤษฎี โดยเรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open-circuit potential) แต่จะมีค่าน้อยกว่าค่าทางทฤษฎีเนื่องจากเกิดการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (Reactant cross over) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเมมเบรน เมื่อแก๊สข้ามไปยังอีกฝั่งของขั้วไฟฟ้า จะทำให้เกิดปฏิกิริยาภายในขั้วไฟฟ้านั้น ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าภายใน (Internal current) ทำให้เกิด ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินขึ้น จึงทำให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลง การเกิดโพลาริเซชันขณะที่มีการทำงานเซลล์ เชื้อเพลิงเกิดจากการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพลาริ เซชันได้ 3 ช่วง

1. โพลาริเซชันทางเคมี (Chemical polarization) หรือการสูญเสียจากการเกิดปฏิกิริยา (Activation losses) เป็นโพลาริเซชันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของแก๊สเชื้อเพลิงบน พื้นผิวของขั้วไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ ส่งผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น อุณหภูมิ ตัวเร่งปฏิกิริยา และความดัน ทั้งนี้ปัจจัยต่างๆ ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า หากอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะส่งผลให้เกิดโพลาริ เซชันในทางเคมีที่สูงและได้กระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่ำลง การลดค่าโพลาริเซชันทางเคมี สามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี ประสิทธิภาพสูง หรือการเพิ่มความดัน

2. โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization) หรือความต้านทาน โหห์มมิก (Ohmic resistance) เกิดจากการต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนภายใน เซลล์เชื้อเพลิงซึ่งส่งผลให้การนำไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง เช่น ความต้านทานการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่บริเวณขั้วไฟฟ้าและที่บริเวณแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า และความ ต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนประจุ การลดโพลาริเซชันเนื่องจาก ความต้านทาน ทำได้โดยการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวสะสมกระแสไฟฟ้า ชั้นการแพร่และขั้วไฟฟ้าที่

มีความต้านทานต่ำ นอกจากนี้การลดความหนาของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนประจุ และขั้วไฟฟ้าเพื่อลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอนและอิเล็กตรอน ก็เป็นอีกหนทางในการลดความต้านทานโอห์มมิกได้เช่นกัน

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

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [3]

สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.7.1 ปริมาณน้ำ

ประสิทธิภาพในการนำโปรตอนของเมมเบรนขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในเมมเบรน โดยปกติเมมเบรนต้องชุ่มน้ำตลอดเวลาเพื่อให้เกิดการพาโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด แต่ถ้าปริมาณน้ำมากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง โดยปริมาณของน้ำมากเกินไปที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้ากับเมมเบรนจะส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าถูกน้ำท่วม (Flooding) โดยน้ำเข้าไปอุดตันรูพรุนบนขั้วไฟฟ้า ทำให้แก๊สแพร่ผ่านเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก ส่งผลให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง ในกรณีที่ปริมาณของน้ำน้อยเกินไป จะส่งผลทำให้เมมเบรนแห้ง เกิดความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและอาจเกิดการแตกออกของเมมเบรน ทำให้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากันโดยตรงจึงเกิดความร้อนสูง ส่งผลให้เซลล์ถูกทำลายได้ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการน้ำในระบบให้เหมาะสมเพื่อให้มีความสามารถในการนำโปรตอนได้ดี

2.7.2 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ค่าโพลาริเซชันทางเคมีลดลง เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับค่าคงที่ค่าหนึ่งของปฏิกิริยานั้นๆ ตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.15

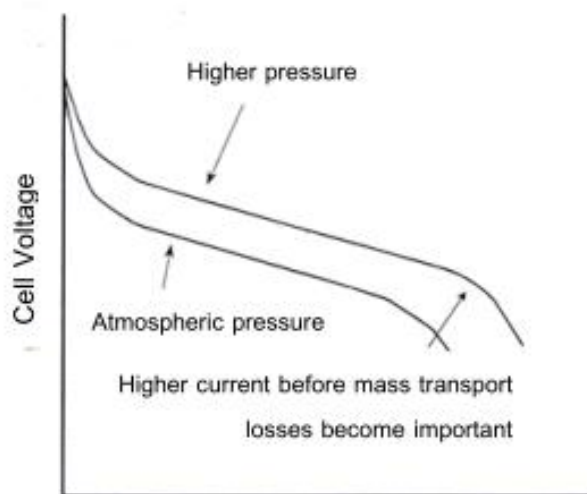
$$k = A e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2.15)$$

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

จากสมการที่ 2.4 พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูง จะทำให้แก๊สเชื้อเพลิงมีพลังงานจลน์ (Kinetic energy) สูงเกิดการชนกันของโมเลกุลทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูงกว่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิทำให้สมรรถนะในการทำงานของเซลล์ดีขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงมากเกินไป จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำของเมมเบรน ทำให้ขาดความสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง การนำไฟฟ้าในเมมเบรนต่ำส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงควรใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมกับความสามารถในการทำงานสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็มสามารถทำได้

2.7.3 ความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

จากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงพื้อเอ็มขนาดเล็กสามารถทำงานที่ความดันบรรยากาศจึงมีผลต่อสมรรถนะน้อย แต่ในกรณีที่เป็นเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 10 กิโลวัตต์หรือใหญ่กว่าอาจต้องใช้ความดันสูงในการทำงาน เนื่องจากการใช้ความดันสูงทำให้เกิดการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินในการก่อกัมมันต์ (Activation overpotential) ที่ขั้วแคโทด ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าแรงดันวงจรเปิดสูงขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานอิสระกิบส์ นอกจากนี้ยังทำให้ค่าโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลกระทบของการเพิ่มความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า [3]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Maheshwari และคณะ [29] ศึกษาผลของความหนาของขั้วไฟฟ้ากระดาษคาร์บอนต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยผู้วิจัยได้ทำการเตรียมกระดาษคาร์บอนขึ้นเองโดยมีความหนาที่แตกต่างกัน แต่มีองค์ประกอบที่เหมือนกันและมีความหนาแน่นคงที่คือ 0.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งผลของความหนาต่อสมบัติของกระดาษคาร์บอนนั้นส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยที่ความหนาแน่นกำลังมีค่าสูงถึง 805 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งได้รับจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้กระดาษคาร์บอนที่มีความหนา 0.028 เซนติเมตร โดยเพิ่มมากกว่า 55 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับการใช้กระดาษคาร์บอนที่มีความหนา 0.046 เซนติเมตรซึ่งได้ความหนาแน่นกำลัง 510 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Frey และคณะ [30] พัฒนาเทคนิคการเตรียมเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (membrane electrode assembly, MEA) ร่วมกับการสเปรย์และการประกอบด้วยการอัดความร้อน โดยเลือกเทคนิคการเตรียมนี้เนื่องจากวิธีการเตรียมไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดค่าใช้จ่าย โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าเช่น การอัดขั้วไฟฟ้าหรือการเผาขั้วไฟฟ้าต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบกระดาษคาร์บอนและผ้าคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นชั้นแพร่แก๊สและองค์ประกอบของ electrode ink เพื่อให้มีสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีที่สุด ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าของบริษัท E-TEX โดยมีปริมาณแพลทินัมคือ 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีการดำเนินการที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิของเซลล์ 65 องศาเซลเซียส ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด 80 องศาเซลเซียสที่มีความดันบรรยากาศ มีค่าประมาณ 0.58 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้าหรือการใช้วัสดุที่แตกต่างกันแต่มีหน้าที่เหมือนกัน

(เช่น การใช้ชั้นแพร์แก๊สที่แตกต่างกัน) จะส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมากกว่าการเปลี่ยนตัวแพร์เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าเช่น การอัดร้อนหรือภาวะการสเปรย์

Park และคณะ [31] ศึกษาผลของชั้นแพร์แก๊ส โดยได้ทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆและการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าของชั้นแพร์แก๊สทางการค้าที่เป็นกระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอน เช่น การวัดรูพรุน การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพื้นที่ผิว การวัดมุมสัมผัส การวัดสมบัติที่ยอมให้น้ำผ่าน เทคนิคโพลาไรเซชัน โดยที่กระดาษคาร์บอน SGL 10BB นั้นแสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนเป็นสองส่วนและความต้านทานการไหลของน้ำสูงนั้นเนื่องจากการมี macroporous substrate ที่น้อย มีความไม่ชอบน้ำสูงและชั้นไมโครพอร์สที่แน่นกว่าเมื่อเทียบกับผ้าคาร์บอน ELAT-LT-1400 W การใช้กระดาษคาร์บอน SGL 10BB เป็นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีขึ้นเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิแดนต์ การวัดค่าอิมพีแดนซ์บ่งบอกว่าชั้นไมโครพอร์สที่มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กสูงและสมบัติความไม่ชอบน้ำที่มากกว่าจะทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านไปยังชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า เนื่องจากการกำจัดน้ำที่เกิดขึ้นจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องการไหลของแก๊สนั้นมีสมรรถนะที่ดีกว่า

Prasanna และคณะ [11] ทำการศึกษากระดาษคาร์บอนเชิงการค้า (Commercial carbon paper) โดยมีปริมาณ PTFE ที่ต่างกัน (10-40% โดยน้ำหนัก) พบว่าชั้นแพร์แก๊สด้านแคโทดที่มีปริมาณ PTFE เป็นองค์ประกอบ 30% โดยน้ำหนักหรือมากกว่าจะทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลง จากการศึกษาโดยวัดความสามารถในการแพร่ผ่านของแก๊ส (Gas permeability) พบว่าเมื่อปริมาณ PTFE ที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ความเป็นรูพรุนต่ำลง และจากการศึกษาอิมพีแดนซ์ในงานวิจัยนี้ระบุว่าปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบในชั้นแพร์แก๊สที่ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีที่สุดนั้นคือ 20% โดยน้ำหนัก เนื่องจากทำให้การแพร่ของแก๊สออกซิเจนดีขึ้นและการถ่ายโอนน้ำในระบบที่ดี รวมถึงช่วยลดความต้านทานในการถ่ายโอนประจุในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย

Ralph และคณะ [32] ทำการศึกษาผลของชั้นแพร์แก๊สประเภทผ้าคาร์บอนเปรียบเทียบกับกระดาษคาร์บอน ผลการทดลองที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงพบว่าเมื่อใช้ผ้าคาร์บอนเป็นชั้นแพร์แก๊สจะมีสมรรถนะที่ดีกว่า เนื่องจากในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงการแพร่ของแก๊สออกซิเจนไปยังขั้วแคโทดที่ดีกว่าเนื่องจากผ้าคาร์บอนมีความเป็นรูพรุนสูงและมีอัตราการกำจัดน้ำออกที่สูงด้วย

Bever และคณะ [9] ทำการทดลองโดยเติมสาร PTFE ลงในกระดาษคาร์บอนในปริมาณที่ต่างกันและทำการเผาที่อุณหภูมิต่างกันและทำการทดสอบสมบัติของกระดาษคาร์บอนที่เตรียมได้จากผลการทดลองพบว่ากระดาษคาร์บอนที่มี PTFE เป็นองค์ประกอบสูงสามารถช่วยลดปริมาณน้ำในชั้นแพร์แก๊สได้ แต่ปริมาณ PTFE ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การส่งผ่านแก๊สได้ต่ำลงและทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย

Wang และคณะ [2] ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของ 2 เฟส (two-phase transport) ผ่านผ้าคาร์บอนและกระดาษคาร์บอนซึ่งใช้เป็นชั้นแพร่แก๊สในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์ โดยทำการป้อนแก๊สที่อัดตัวด้วยไอน้ำพบว่าการใช้ผ้าคาร์บอนในด้านแคโทดนั้น การกำจัดน้ำออกทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากโครงสร้างของผ้าคาร์บอนมีความคดเคี้ยว (Tortuosity) ของโครงสร้างรูพรุนที่ต่ำกว่ากระดาษคาร์บอนและมีผิวหน้าที่มีความขรุขระ และยังช่วยลดขีดจำกัดในการถ่ายโอนออกซิเจน (Oxygen transport limitation) อีกด้วย อย่างไรก็ตามในกรณีที่ทำการป้อนแก๊สที่มีความชื้นต่ำเข้าสู่ระบบพบว่าการใช้กระดาษคาร์บอนจะมีสมรรถนะที่ดีกว่า เนื่องจากโครงสร้างของกระดาษมีความคดเคี้ยวที่มากกว่า จึงช่วยป้องกันการสูญเสียไอน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ไปกับแก๊สที่ป้อนเข้ามา จึงช่วยป้องกันไม่ให้เมมเบรนสูญเสียไอน้ำ จึงช่วยลดความต้านทานในระบบได้และการพัฒนาการใช้กระดาษคาร์บอนที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ซึ่งพบว่ามีสภาพการนำไฟฟ้าที่สูง

Rajalakshmi และคณะ [33] ศึกษาชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคขนาดเล็กกับการกระจายตัวของอนุภาคแพลทินัมบนชั้นแพร่ของแก๊สสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยกระบวนการการพอกพูนไฟฟ้าแบบกระแสเป็นช่วง พบว่าแพลทินัมที่พอกพูนอยู่บนขั้วไฟฟ้าในปริมาณต่ำ (3.5% Pt/C) โดยที่ไม่ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูญเสียไปเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีการทา กระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้าสามารถทำให้มีสมรรถนะที่ดีที่สุดโดยการเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) และความหนาแน่นกระแส พบว่าสามารถให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีที่สุดคือ 350 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้าทำงานที่ 0.6 โวลต์ ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่ามีมีความต้านทานที่ต่ำมากคือ 0.00076 มิลลิโอมต่อตารางเซนติเมตร

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ชื่อสาร	บริษัท
กรดเฮกซะคลอโรแพลตินิก (Hexachloroplatinic acid hydrate, 98%, $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$)	Fluka
สารละลายเนฟิออน (Nafion117, 5%wt)	Fluka
ไอโซโพรพานอล (Isopropanol)	Fluka
พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, 60%wt)	Aldrich
กลีเซอรอล (Glycerol)	Fluka
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide, 30%)	Carlo Erba
กรดไนตริก (Nitric acid, 98%)	Lab-scan
กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, 98%)	Lab-scan
แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen 99.999%)	Praxair
แก๊สออกซิเจน (Oxygen 99.999%)	Praxair
แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen 99.99%)	Praxair

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อสาร	บริษัท
ผงคาร์บอน	Gigantic
ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth)	Electrochem
กระดาษคาร์บอน (Carbon paper)	E-tek
	Electrochem
	E-tek
	Sigracet
ขั้วไฟฟ้าทางการค้า รุ่น A-6 ELAT	E-tek
เนฟิออนเมมเบรน (Nafion 115)	Ion power
เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว (Fuel cell hardware, working area 5 cm^2)	Electrochem

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ตู้อบ (Oven) ของบริษัท MEMMERT รุ่น Electronic Microprocessor PID Control
2. เตาเผา (Furnace) ของบริษัท CARBOLITE รุ่น ELF 11/14/201
3. อ่างอ่างไอน้ำชนิดเขย่า ของบริษัท Heto รุ่น SBD-50
4. เครื่องอัดร้อน-เย็น (Compression mould) รุ่น LP20 ของบริษัท LABTECH
5. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic water bath) ของบริษัท CREST
6. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ของบริษัท Metrohm
7. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) รุ่น HY3002 ของบริษัท COMMUE
8. มัลติมิเตอร์ (Multimeter) รุ่น RM-15 ของบริษัท Richtmass
9. ปากกาหนีบชิ้นงาน
10. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
11. ไมโครปิเปต
12. โถดูดความชื้น
13. เครื่องปั่นกวน (Stirrer)
14. ตะแกรงไทเทเนียม
15. ตะแกรงแพลทินัม
16. เครื่องแก้วอื่น ๆ ในห้องปฏิบัติการ

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่อง Micrometer ของบริษัท INSIZE
2. เครื่อง Standard contact angle goniometer ของบริษัท Ramé-hart รุ่น 200-U1
3. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ของบริษัท Autolab รุ่น PG STATO 30
4. เครื่อง Scanning Electron Microscope ของบริษัท Jeol รุ่น JSM-6510LV
5. เครื่อง Electronic load รุ่น PLZ-30F ของบริษัท KIKUSUI

3.5 ตัวแปรที่ศึกษา

1. ผลของประเภทของชั้นแพรร่แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม
2. ผลของความหนาของชั้นแพรร่แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม
3. ผลของปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพรร่แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม
4. ผลของชั้นไมโครพอร์สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

3.6 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.6.1 การวัดความหนาของชั้นแพร่แก๊ส

1. หมุนปุ่มปรับหยาบของไมโครมิเตอร์ให้แทนวัดห่างกันพอสมควร
2. วางชั้นแพร่แก๊สระหว่างแทนวัด จากนั้นหมุนปุ่มปรับหยาบให้แทนวัดเลื่อนเข้ามาชิดชิ้นงานในระยะหนึ่ง
3. จากนั้นหมุนปุ่มปรับละเอียดเข้าหาชั้นแพร่แก๊สและอ่านค่าความหนาที่ได้

3.6.2 การวัดความหนาแน่นของชั้นแพร่แก๊ส

1. นำชั้นแพร่แก๊สไปชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
2. วัดความกว้างและความยาวของชั้นแพร่แก๊ส นำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่น

3.6.3 การวัดความต้านทานไฟฟ้าของชั้นแพร่แก๊ส

1. นำชั้นแพร่แก๊สวางบนแผ่นนำกระแสไฟฟ้าและหมุนแทนวัดให้สัมผัสกับชิ้นงาน โดยใช้ความดัน 20 นิวตันต่อตารางเมตร
2. จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าและอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้
3. เปลี่ยนความดันที่ใช้ในการหมุนแทนวัดเป็น 20, 30, 40... นิวตันต่อตารางเมตร จนกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าคงที่

3.6.4 การเตรียมผงคาร์บอน

1. เตรียมสารละลายกรดผสมระหว่างกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 12 โมลาร์ในขวดรูปชมพู่ (กรดไนตริกต่อกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วน 1:1)
2. ผสมผงคาร์บอนลงในสารละลายกรดผสมในขวดรูปชมพู่ (ผงคาร์บอนต่อสารละลายกรดผสมในอัตราส่วน 7:3 โดยปริมาตร) ปิดฝาขวดด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ที่เจาะรู
3. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
4. นำขวดรูปชมพู่ดังกล่าวตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูด โดยตั้งทิ้งไว้ข้ามคืน
5. นำผงคาร์บอนมาล้างน้ำ DI จนสารละลายมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับน้ำ DI
6. กรองสารละลายเพื่อแยกผงคาร์บอนออกและนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งผงคาร์บอนมีน้ำหนักคงที่
7. นำผงคาร์บอนที่อบแห้งแล้วมาบดโดยใช้ mortar จนผงคาร์บอนละเอียด
8. นำผงคาร์บอนที่บดละเอียดแล้วเก็บในเดสิเคเตอร์

3.6.5 การเตรียมขั้วไฟฟ้า

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเตรียมพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าก่อนการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชั้นย่อยคือ ชั้นไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer) และชั้นชอบน้ำ (Hydrophilic layer)

3.6.5.1 การเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำลงบนขั้วไฟฟ้า

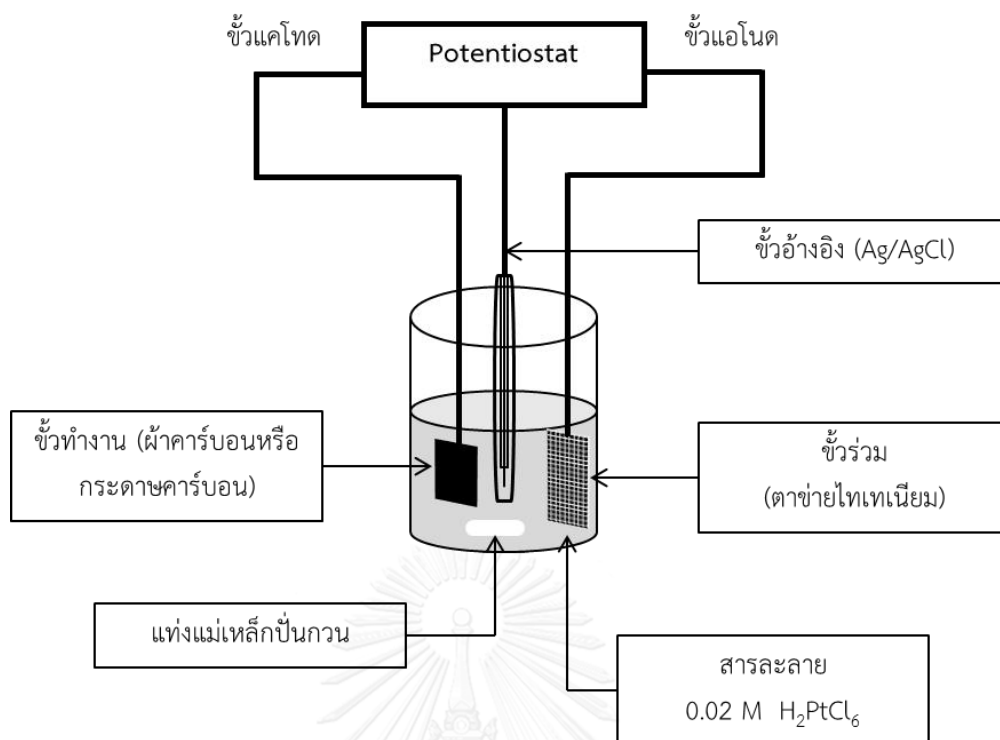
1. ปิเปต PTFE ปริมาตร 8.74 ไมโครลิตรผสมกับน้ำ DI ปริมาตร 690 ไมโครลิตรลงใน vial จากนั้นนำไป sonicate เป็นเวลา 30 นาที
2. ปิเปตไอโซโพรพานอลปริมาตร 1380 ไมโครลิตร นำไป sonicate เป็นเวลา 30 นาที
3. ชั่งผงคาร์บอนน้ำหนัก 0.0184 กรัม ใส่ลงในสารละลาย จากนั้นนำไป sonicate เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ตัดขั้วไฟฟ้า (ผ้าคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอน) ขนาด 2.3X3 ตารางเซนติเมตร นำขั้วไฟฟ้าจุ่มในอะซิโตนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำขั้วไฟฟ้าไปชั่งน้ำหนัก
5. สเปรย์สารละลายที่เตรียมลงบนขั้วไฟฟ้าจนได้น้ำหนักของชั้นไม่ชอบน้ำเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร
6. นำขั้วไฟฟ้าไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเก็บขั้วไฟฟ้าไว้ในโถดูดความชื้น

3.6.5.2 การเตรียมชั้นชอบน้ำลงบนขั้วไฟฟ้า

1. ปิเปตกลีเซอรอลปริมาตร 2.19 ไมโครลิตรผสมกับสารละลายเนฟิออน ปริมาตร 63.45 ไมโครลิตรลงใน vial จากนั้นนำไป sonicate เป็นเวลา 30 นาที
2. นำขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการเผามาชั่งน้ำหนักและสเปรย์สารละลายที่เตรียมลงบนขั้วไฟฟ้าจนได้น้ำหนักที่ต้องการ
3. นำขั้วไฟฟ้าไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้เพื่อคำนวณหาปริมาณของชั้นชอบน้ำ และเก็บขั้วไฟฟ้าไว้ในโถดูดความชื้น

3.6.6 การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า

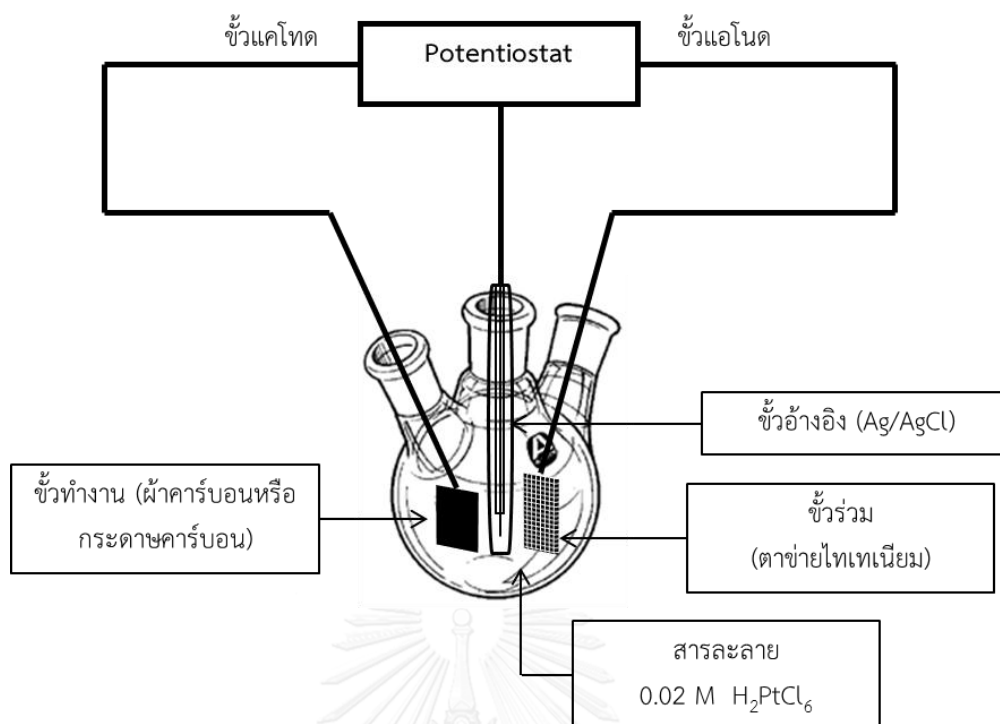
1. เตรียมสารละลาย 0.02 โมลาร์กรดเฮกซะคลอโรแพลตินิกในสารละลาย 0.5 โมลาร์กรดซัลฟิวริก
2. จัดอุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 3.1 โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมชั้นย่อยทั้ง 2 ชั้น (จากหัวข้อ 3.6.5.2) เป็นขั้วทำงาน (Working electrode) ขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode) และตะแกรงไทเทเนียมเป็นขั้วร่วม (Counter electrode) จุ่มอยู่ในสารละลาย 0.02 โมลาร์กรดเฮกซะคลอโรแพลตินิกในสารละลาย 0.5 โมลาร์กรดซัลฟิวริก (ยกเว้นขั้วทำงาน)
3. กวนสารละลายที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าตลอดระยะเวลาการพอกพูน
4. เปิดสวิตช์เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาที ก่อนทำการทดลอง โดยปุ่ม Cell Enable อยู่ในตำแหน่งปิด
5. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยใช้โปรแกรม GPES ซึ่งทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ (Direct current)
6. เลือกการตั้งค่า Chrono methods (Interval time > 0.1 sec) และเลือกวิธีแบบ Potentiometry (galvanostatic)
7. ทำการตั้งค่ากระแสไฟฟ้า (-0.069 แอมแปร์) และเวลาที่ใช้ในการพอกพูน (200 วินาที)
8. ก่อนเริ่มทำการทดลองให้จุ่มขั้วทำงานลงในสารละลายตามรูปที่ 3.1 จากนั้นกด Cell Enable ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat และกด Start ที่โปรแกรมเพื่อเริ่มทำการพอกพูนโลหะ
9. เมื่อกระบวนการพอกพูนเสร็จสิ้น ให้ปิด Cell Enable ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่อหยุดการทำงานของเซลล์
10. จากนั้นถอดขั้วทำงานออกจากระบบและฉีบน้ำ DI ลงบนขั้วไฟฟ้าเพื่อกำจัดสารละลายแพลตินัมที่ติดอยู่บนที่ผิวหน้า จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
11. ชั่งน้ำหนักผ้าคาร์บอนหรือกระดาษคาร์บอนที่ได้ เพื่อหาน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (ผลต่างระหว่างน้ำหนักก่อนและหลังการพอกพูน) เก็บขั้วไฟฟ้าไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอการใช้งานต่อไป



รูปที่ 3.1 การต่อเซลล์ไฟฟ้าในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

3.6.7 การวิเคราะห์แบบไซคลิกโวลแทมเมทรีในสารละลาย

1. เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในขวดก้นกลมสามคอ
2. ฟันก๊าซไนโตรเจนลงในสารละลายเป็นเวลา 30 นาที เพื่อเป็นการไล่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ในสารละลาย
3. เปิดเครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่อเตรียมความพร้อมของเครื่องก่อนทำการทดลองประมาณ 30 นาที
4. ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1 X 1 ตารางเซนติเมตร
5. ติดเส้นใยคาร์บอนลงบนด้านหลังของชิ้นงาน (ด้านที่ไม่ได้เตรียมชั้นย่อยและตัวเร่งปฏิกิริยา) นำไปประกบเข้ากับแผ่นอะคริลิกที่เจาะรูขนาด 1 X 1 ตารางเซนติเมตร
6. นำขั้วไฟฟ้าใช้งานที่เตรียมขึ้น ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าร่วม ประกอบเข้ากับขวดก้นกลม โดยขั้วไฟฟ้าทั้งสามห้ามสัมผัสกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2
7. จากโปรแกรม GPES เลือกการทดสอบแบบไซคลิกโวลแทมเมทรี
8. ตั้งค่าการทดสอบโดยวัดกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ตั้งแต่ -1.3 – 1.5 V vs SHE โดยทำการทดสอบจนกระทั่งกราฟที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลง นำผลการทดสอบที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.2 การต่อเซลล์ไฟฟ้าในการวิเคราะห์แบบไซคลิกโวลแทมเมตรีในสารละลาย

3.6.8 การปรับปรุงคุณภาพของเมมเบรน

1. ตัดเมมเบรนขนาด 5 X 5 ตารางเซนติเมตร
2. นำเมมเบรนไปแช่ในน้ำกลั่น จากนั้นนำไปเขย่าด้วยอ่างอ่างไอน้ำชนิดเขย่า ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำเมมเบรนที่ได้มาแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อ่างอ่างไอน้ำชนิดเขย่า
4. นำเมมเบรนที่ได้มาล้างสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำเมมเบรนแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อ่างอ่างไอน้ำชนิดเขย่า
5. นำเมมเบรนที่ได้มาล้างสารละลายกรดซัลฟูริกด้วยน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อ่างอ่างไอน้ำชนิดเขย่า ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง
6. เก็บเมมเบรนที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วในน้ำกลั่น ก่อนการใช้งานเมมเบรนต้องทำให้แห้งโดยการนำเมมเบรนผึ่งไว้ในโถดูดความชื้น

3.6.9 การประกอบแผ่นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า

1. นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้จากข้อ 3.6.6 ใช้เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าทางการค้าใช้เป็นขั้วแอโนด จากนั้นตัดขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขนาด 2.3 X 2.3 ตารางเซนติเมตร

2. ทาสารละลายเนฟิออน 5% ลงบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ด้านที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา แพลทินัมทั้งสองแผ่นปริมาตร 91.95 ไมโครลิตร จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3. นำแผ่นขั้วไฟฟ้าวางลงบนแม่พิมพ์ให้ตรงกับช่องสี่เหลี่ยม โดยหงายด้านที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้น

4. นำเมมเบรนที่ทำการปรับปรุงคุณภาพที่เตรียมไว้ วางลงบนขั้วไฟฟ้าโดยให้อยู่กึ่งกลาง

5. นำแผ่นขั้วไฟฟ้าอีกแผ่นโดยคว่ำด้านที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา วางลงบนเมมเบรนโดยให้อยู่กึ่งกลางเช่นเดียวกัน นำแผ่นแม่แบบอีกแผ่นมาประกบด้านบน

6. วางแผ่นแม่แบบทั้งสองบนแท่นอัดด้านบนของเครื่องอัดเพื่อทำการอัดร้อน โดยอุณหภูมิที่ใช้คือ 137 องศาเซลเซียส และความดัน 65 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร

7. กดปุ่มสีเขียวทั้งสองปุ่มพร้อมกันจนแท่นอัดดันขึ้นสูงสุดแล้วจึงปล่อยมือ จับเวลา 150 วินาที

เมื่อครบเวลาแล้วให้กดปุ่มสีแดง แท่นอัดจะเคลื่อนที่ลงด้านล่างจนสุด

8. นำแผ่นแม่แบบออกจากด้านบนนำมาใส่ด้านล่างเพื่อทำการอัดเย็น ใช้เวลา 150 นาทีเช่นเดียวกัน เมื่อครบตามเวลาแล้ว นำแผ่นแม่แบบออกมาจากเครื่อง

9. นำแผ่นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าหรือเอ็มอีเอ ออกจากแม่แบบและเก็บไว้ในถุงพลาสติกเพื่อไม่ให้อากาศเข้า นำไปเก็บในโถดูดความชื้นก่อนนำไปทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

3.6.10 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

3.6.10.1 การประกอบเซลล์เดี่ยว

1. ประกอบเอ็มอีเอเข้ากับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน

2. นำแผ่นยางซิลิโคนบางที่ตัดรองเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.3 x 2.3 ตารางเซนติเมตร วางคั่นระหว่างเอ็มอีเอกับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส

3. ประกบด้านบนนอกของแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าด้วยหน่วยให้ความร้อนอีกหนึ่งชั้น ก่อนหมุนน็อตยึดทุกส่วนเข้าด้วยกันโดยใช้ประแจปอนด์ที่โมเมนต์การหมุน 40 ปอนด์แรง-นิ้ว

4. นำเซลล์เดี่ยวที่ได้ไปติดตั้งในสถานีทดสอบ

3.6.10.2 การเตรียมความพร้อมของเซลล์เชื้อเพลิงในหน่วยทดสอบก่อนทำการทดสอบ

1. ตรวจสอบวาล์วต่างๆ ให้เปิดปิดในทิศทางที่ถูกต้องเพื่อป้องกันการไหลปนกันของแก๊สต่างๆ โดยให้แก๊สไฮโดรเจนเข้าทางขั้วแอโนดและแก๊สออกซิเจนเข้าทางขั้วแคโทด ปิดวาล์วขาออก
2. ตรวจสอบความแน่นของข้อต่อต่างๆ
3. ตรวจสอบระดับน้ำในหน่วยให้มีความชื้นให้มีระดับที่เหมาะสม
4. ต่อสายไฟระหว่างเครื่อง Electronic load เข้ากับขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ข้าง
5. เปิดอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงโดยให้อุณหภูมิเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส ตลอดจนหน่วยให้มีความชื้นทั้งสองข้างโดยที่ฝั่งแอโนดมีอุณหภูมิเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส และฝั่งแคโทดมีอุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส
6. เปิดเครื่อง electronic load
7. เปิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนโดยให้มีความดันก่อนเข้าเครื่องควบคุมอัตราการไหลเท่ากับ 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
8. เปิดเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยให้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์หรือที่มีการปนเปื้อนคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สออกซิเจนมีอัตราการไหลอยู่ที่ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีที่ภาวะมาตรฐาน (Standard cubic centimeter per minute, sccm)
9. เริ่มการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยตั้งค่าความต่างศักย์ไว้ที่ 0.4 โวลต์เป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อปรับภาวะของเซลล์เชื้อเพลิงให้เหมาะสม

3.6.10.3 การทดสอบสมรรถนะของเอ็มอีเอจากกราฟโพลาริเซชัน

1. กดปุ่มยกเลิกการติงกระแส จากนั้นสังเกตค่าความต่างศักย์ที่แสดงอยู่ รอจนกระทั่งค่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงบันทึกค่าความต่างศักย์ โดยเรียกค่านี้อาความต่างศักย์ขณะวงจรเปิด (Open circuit voltage)
2. ทำการทดสอบหากราฟโพลาริเซชัน โดยบันทึกข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการปรับความต่างศักย์ตั้งแต่ 0.1 โวลต์จนถึงค่าความต่างศักย์ขณะวงจรเปิดและจดค่ากระแสไฟฟ้า

3. จากนั้นทำการปรับความต่างศักย์ในทิศทางตรงข้ามคือ ค่าความต่างศักย์ขณะวงจรเปิดจนถึงความต่างศักย์ 0.1 โวลต์ และจดบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า ทำซ้ำ 3 รอบ
4. จากนั้นทำการคำนวณผลการทดสอบที่ได้เพื่อเขียนกราฟโพล่าไรเซชัน

3.6.10.4 การปิดระบบของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

1. กดปุ่มยกเลิกการตั้งกระแส จากนั้นปิดอุปกรณ์ให้ความร้อน และปลดระบบไฟฟ้าภายนอกที่จ่ายให้กับเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมด
2. ปิดอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สโดยกดปุ่ม VOR ค้างไว้และปิดแก๊สทั้งหมดในระบบ
3. ไล่แก๊สที่ค้างอยู่ในระบบโดยจุ่มสายยางลงในน้ำ DI และเปิดวาล์วขาออกเพื่อปล่อยแก๊สที่ละน้อยเพื่อความปลอดภัย
4. ปลดการติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิงออกจากหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของชนิดและสมบัติของชั้นแพร์แก๊สที่เหมาะสมต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยใช้กระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยเลือกศึกษาชั้นแพร์แก๊สจากแหล่งที่มาต่างกัน ซึ่งมีสมบัติที่ต่างกัน เช่น ความหนา ความหนาแน่น ความต้านทานไฟฟ้า ปริมาณสารพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่เป็นองค์ประกอบในชั้นแพร์แก๊ส เป็นต้น สมบัติของชั้นแพร์แก๊สเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของชั้นแพร์แก๊สและลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าได้นี้จะส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ในงานวิจัยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการปรับปรุงสมบัติของชั้นแพร์แก๊ส โดยทำการศึกษาเทคนิคที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าทั้งชั้นชอบน้ำและชั้นไม่ชอบน้ำ เทคนิคที่เลือกศึกษาคือเทคนิคการระบายและการสเปรย์ จากนั้นนำเทคนิคที่เหมาะสมมาใช้ในการเตรียมชั้นย่อยเพื่อใช้เป็นพื้นผิวสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของชั้นแพร์แก๊สโดยนำภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนแรกมาใช้ในการเตรียมพื้นผิวขั้วไฟฟ้า จากนั้นทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีไฟฟ้า และประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้เข้ากับเมมเบรนเพื่อทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงโดยสถานีทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง

4.1 การเตรียมพื้นผิวขั้วไฟฟ้าก่อนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ภูมิภาคคือ แก๊ส อิเล็กโทรไลต์ และตัวเร่งปฏิกิริยา ลักษณะโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าที่ดีควรมีความสามารถในการกระจายแก๊สตั้งต้นไปยังอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ มีการจัดการน้ำที่ดีเพื่อป้องกันการเกิดน้ำท่วมเซลล์ โดยชั้นย่อยบนชั้นแพร์แก๊สช่วยปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากชั้นย่อยสามารถช่วยในด้านการจัดการแก๊สและน้ำในระบบ ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้นด้วย [34] ขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวขั้วไฟฟ้ามีความสำคัญต่อกระบวนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า เนื่องจากปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยึดเกาะบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า โดยตัวแปรที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้คือ เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าและปริมาณชั้นชอบน้ำ

4.1.1 ผลของเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า

เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้านั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกเทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้า 2 วิธีเพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบคือ เทคนิคการระบายและเทคนิคการสเปรย์ โดยที่เทคนิคทั้งสองนี้มีข้อดีข้อเสียที่ต่างกันคือ เทคนิคการระบายนั้นจำเป็นต้องมีทักษะในการปฏิบัติงานที่สูงกว่าเทคนิคการสเปรย์ เนื่องจากเทคนิคการระบายนั้นใช้ฟุ้งกันในการทาสารละลายลงบนชั้นแพร์แก๊ส จึงเกิดแรงกดบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า สารละลายสามารถซึมเข้าไปในขั้วไฟฟ้าได้มากกว่าเทคนิคการสเปรย์ นอกจากนั้นเทคนิคการระบายจะเป็นทักษะส่วนบุคคลซึ่งผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีความเชี่ยวชาญในการระบายเพื่อให้น้ำหนักของฟุ้งกันที่ตกลงบนชั้นแพร์แก๊สมีค่าเท่ากัน ในการระบายสารละลายบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าในแต่ละครั้ง และพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเทคนิคการสเปรย์มีความเรียบสม่ำเสมอมากกว่าเทคนิคการระบาย [3] ส่วนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการสเปรย์นั้น อุปกรณ์ที่ใช้มีมากกว่าเทคนิคการระบาย เช่น ปืนลม ปืนพ่น (spray gun) เป็นต้น

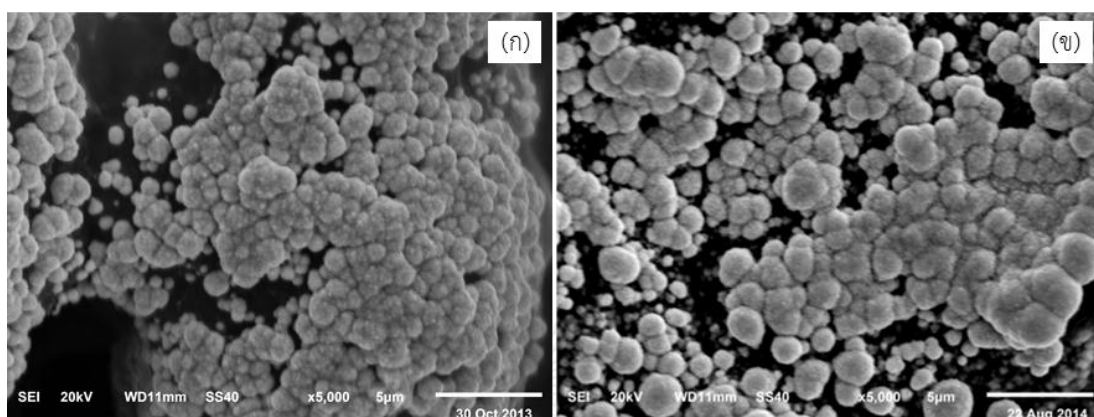
ในการศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า แบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกทำการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิคการระบาย กลุ่มที่สองทำการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิคการสเปรย์ ทำการเลือกชนิดชั้นแพร์แก๊สเพื่อนำมาศึกษาคือ ฝ้ายคาร์บอนของบริษัท Electrochem ปริมาณ PTFE เท่ากับ 30% จากนั้นทำการเตรียมชั้นย่อยทั้งสองชั้น ซึ่งประกอบด้วยชั้นไม่ชอบน้ำและชั้นชอบน้ำโดยมีปริมาณ 1.9 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ จากนั้นทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าลงบนขั้วไฟฟ้าทั้งสองกลุ่ม นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัมนาววิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงกายภาพและทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าที่เป็นผลจากเทคนิคในการเตรียมชั้นย่อย

เทคนิคในการเตรียมชั้นย่อย	เทคนิคการระบาย	เทคนิคการสเปรย์
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.33	0.28
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	78.7	177.4

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้เทคนิคที่ต่างกัมนั้น มีปริมาณแพลทินัมที่ต่างกันเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมชั้นย่อยโดยเทคนิคการระบายมีค่า 0.33 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมชั้นย่อยโดยเทคนิคการสเปรย์ที่มีค่า 0.28 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อพิจารณาจากภาพไมโครกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมชั้นย่อยโดยเทคนิคการระบายมีลักษณะ

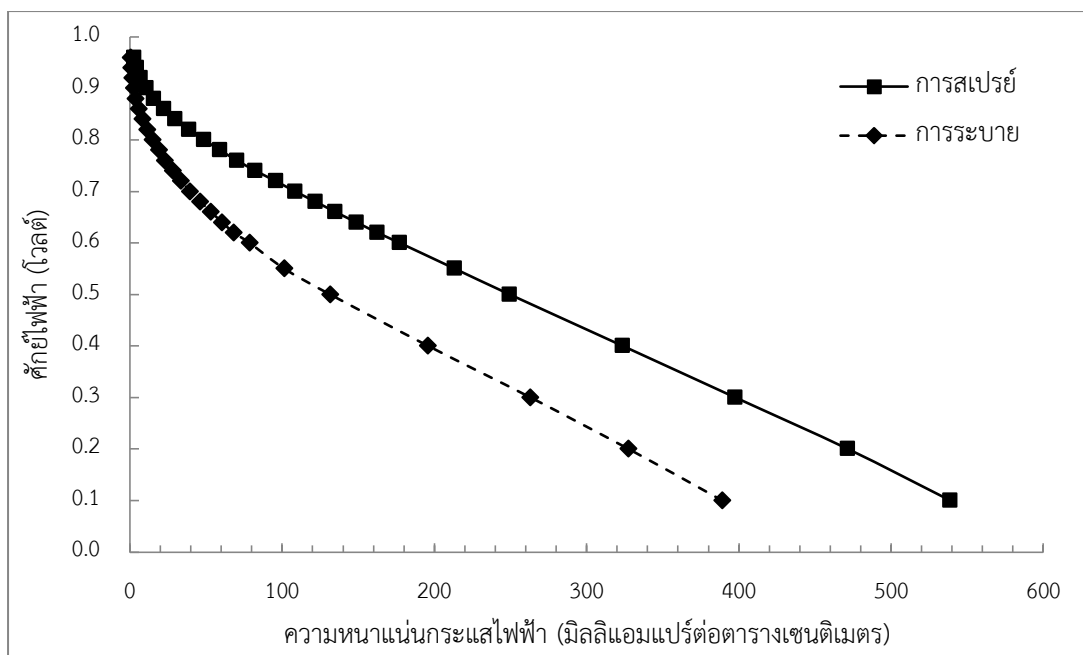
การจับตัวค่อนข้างเป็นกลุ่มก้อนและมีการซ้อนทับกันมากกว่าทำให้กลุ่มก้อนของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นย่อยโดยเทคนิคการสเปรย์มีการกระจายตัวมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการสเปรย์นั้น ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้มีลักษณะการกระจายตัวของผงคาร์บอนที่มีความสม่ำเสมอและผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามีความเรียบมากกว่า [35]



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 5000) แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคต่างกัน : (ก) เทคนิคการระบาย (ข) เทคนิคการสเปรย์

เนื่องจากการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการระบายนั้นไม่สามารถควบคุมปริมาณสารละลายให้มีปริมาณที่เท่ากันในการระบายสารละลายลงบนผ้าคาร์บอนในแต่ละครั้ง เนื่องจากการจุ่มพู่กันลงในสารละลายแต่ละครั้ง ปริมาณสารละลายที่ติดบนพู่กันมีปริมาณไม่เท่ากัน นอกจากนั้นการทำสารละลายลงบนขั้วไฟฟ้าแต่ละครั้ง แรงกดของพู่กันบนขั้วไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันทำให้แต่ละจุดบนขั้วไฟฟ้ามีปริมาณผงคาร์บอนที่แตกต่างกัน เป็นผลให้ขั้วไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอต่ำกว่าเทคนิคการสเปรย์ ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณสารละลายที่สเปรย์บนขั้วไฟฟ้าได้โดยใช้ปืนพ่น นอกจากนั้นยังไม่มีแรงกดระหว่างอุปกรณ์และผิวหน้าขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ทำให้ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเทคนิคการสเปรย์มีความสม่ำเสมอมากกว่าเทคนิคการระบาย ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเทคนิคการสเปรย์จึงมีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่า

เมื่อนำขั้วไฟฟ้ามาทำการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงกราฟโพลาริเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิคการระบายและเทคนิคการสเปรย์ พบว่าแตกต่างกันในช่วงการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากโพลาริเซชันทางเคมี โดยเอ็มอีเอที่เตรียมขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิคการสเปรย์มีการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากโพลาริเซชันทางเคมีที่น้อยกว่าเอ็มอีเอที่เตรียมขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิคการระบายอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์ พบว่าเอ็มอีเอทีเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิคการสเปรย์มีค่าเท่ากับ 177.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเทคนิคการระบายซึ่งมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์เท่ากับ 78.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาพร้อมกับภาพไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.1 จึงกล่าวได้ว่าการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิคการสเปรย์มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยเทคนิคการระบาย ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า ส่งผลให้มีความสูญเสียในช่วงโพลาริเซชันทางเคมีต่ำ จึงมีสมรรถนะที่สูงกว่า เนื่องจากการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิคการสเปรย์นั้น พื้นที่ผิวของตัวรองรับที่เตรียมได้จะมีความสม่ำเสมอมากกว่าเทคนิคการระบาย [36] ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนลงบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้านั้นมีลักษณะการกระจายตัวที่ดีกว่า ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงคือส่งผลให้มีความสูญเสียในช่วงโพลาริเซชันทางเคมีต่ำ ทำให้มีสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีกว่า ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยเทคนิคการระบายพบว่าการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนหนา ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาต่ำ ส่งผลให้มีสมรรถนะที่ต่ำด้วย ถึงแม้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้จะมีปริมาณมากกว่าก็ตาม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เทคนิคการสเปรย์ในการเตรียมขั้วขั้วสำหรับชั้นแพร่แก๊ส

4.1.2 ผลของปริมาณชั้นขอบน้ำต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ประกอบด้วยชั้นที่มีสมบัติต่างกัน 2 ชั้น [37] ชั้นแรกเป็นชั้นไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer) ประกอบด้วยผงคาร์บอนทำหน้าที่เป็นตัวรองรับทางกายภาพ อีกทั้งยังช่วยในการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา และสารพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ทำหน้าที่ช่วยป้องกันไม่ให้น้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงท่วมเซลล์ และชั้นที่สองเป็นชั้นชอบน้ำ (Hydrophilic layer) ประกอบด้วยเนฟิออน (Nafion) เป็นองค์ประกอบหลัก ทำหน้าที่ช่วยให้โปรตอนเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดผ่านเมมเบรนไปยังขั้วแคโทด

ในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าก่อนการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เริ่มจากการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำลงบนชั้นแพร์แก๊สก่อน จากนั้นจึงเตรียมชั้นชอบน้ำและทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าตามลำดับ งานวิจัยของ Lertviriyapaisan และคณะ [38] ระบุว่าปริมาณชั้นไม่ชอบน้ำที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าคือ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีสัดส่วนของผงคาร์บอนต่อ PTFE คือ 70 : 30 ปริมาณนี้ได้จากการชั่งน้ำหนักของชั้นแพร์แก๊สก่อนและหลังการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำ และทำการคำนวณปริมาณชั้นไม่ชอบน้ำจากผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการเตรียมชั้นย่อยนี้ ทำให้ค่าที่ได้เป็นค่าที่แท้จริง ส่วนปริมาณชั้นชอบน้ำที่เหมาะสมที่ทำการรายงานค่าไว้คือ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีสัดส่วนของเนฟิออนต่อกลีเซอรอลคือ 50 : 50 แต่ปริมาณที่ระบุไว้ไม่ใช่ปริมาณที่แท้จริง เนื่องจากในการทดลองทำโดยเตรียมสารละลายชั้นชอบน้ำให้มีปริมาตรเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยคำนวณจากพื้นที่ผิวของชั้นแพร์แก๊สที่ต้องการ จากนั้นหาสารละลายที่เตรียมได้ทั้งหมดโดยถือว่าปริมาณชั้นชอบน้ำเป็น 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามปริมาตรของสารละลายที่เตรียมไว้ แต่ในทางปฏิบัติขั้นตอนการระบายนสารละลายลงบนชั้นแพร์แก๊สนั้น จะมีสารละลายส่วนหนึ่งติดพู่กันที่ใช้ในการระบายและสารละลายบางส่วนติดที่บริเวณข้างภาชนะที่บรรจุสารละลาย ทำให้ปริมาณชั้นชอบน้ำบนชั้นแพร์แก๊สที่แท้จริงนั้นมิต่ำกว่า 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการหาปริมาณชั้นชอบน้ำที่แท้จริงโดยใช้เทคนิคการสเปรย์ในการเตรียมชั้นย่อยทั้งสองชั้น และทำการชั่งน้ำหนักของชั้นแพร์แก๊สก่อนและหลังการเตรียมชั้นย่อย จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาณชั้นชอบน้ำที่แท้จริงโดยการคำนวณจากผลต่างของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเตรียมชั้นย่อยนี้ โดยปริมาณชั้นชอบน้ำที่เลือกศึกษา คือ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ในขั้นตอนแรกทำการเลือกชนิดชั้นแพร์แก๊สเป็นผ้าคาร์บอนของบริษัท Electrochem ปริมาณ PTFE เท่ากับ 30% เพื่อใช้ในการศึกษา จากนั้นทำการเตรียมชั้นย่อยทั้งสองชั้น คือชั้นไม่ชอบน้ำปริมาณ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ผงคาร์บอนต่อ PTFE คือ 70 : 30) และชั้นชอบ

น้ำปริมาณ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และทำการเตรียมชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยวิธีไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 0.31, 0.22 และ 0.28 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

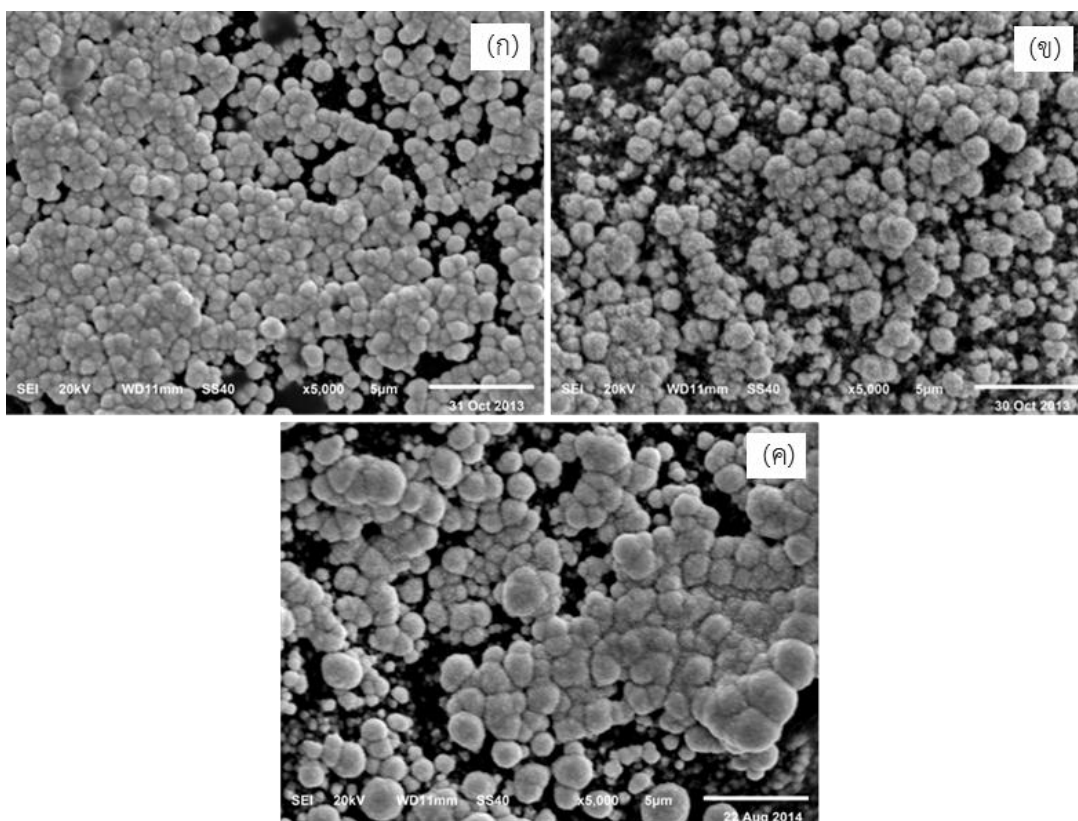
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าที่เป็นผลจากปริมาณชั้นขอบน้ำ

ปริมาณชั้นขอบน้ำ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.4	0.6	0.8
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.31	0.22	0.28
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	231.3	331.3	177.4

พิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นขอบน้ำในปริมาณที่ต่างกัน จากภาพไมโครกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณชั้นขอบน้ำส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้โดยกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยชั้นแพลร์แก๊สที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำเท่ากับ 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่อนข้างหนาแน่น ตัวเร่งปฏิกิริยาปกคลุมชั้นแพลร์แก๊สเกือบทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) ในขณะที่ชั้นแพลร์แก๊สที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำเท่ากับ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีลักษณะการกระจายตัวที่หนาแน่นน้อยกว่าและตัวเร่งปฏิกิริยาปกคลุมชั้นแพลร์แก๊สน้อยกว่า เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณ 0.22 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าชั้นแพลร์แก๊สที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำเท่ากับ 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.31 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) ในขณะที่ชั้นแพลร์แก๊สที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำเท่ากับ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีลักษณะการกระจายตัวที่หนาแน่นใกล้เคียงกับชั้นแพลร์แก๊สที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำเท่ากับ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่และตัวเร่งปฏิกิริยาปกคลุมชั้นแพลร์แก๊สน้อยที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณชั้นขอบน้ำมีผลต่อการพอกพูนของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม โดยชั้นขอบน้ำมีองค์ประกอบหลักคือเนฟิออน ซึ่งมีสมบัติความชอบน้ำจึงช่วยเพิ่มสมบัติภาวะการเปียก (wetting) ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลายแพลทินัมที่ใช้ในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้มีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มี

ขนาดใหญ่ เนื่องจากในขั้นตอนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมไอออนจะแพร่ผ่านชั้นของเนฟิออนและเกิดปฏิกิริยารีดักชันโลหะแพลทินัมที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนในบริเวณที่มีการนำไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันหากมีปริมาณชั้นขอบนน้ำมากเกินไป จะส่งผลให้ชั้นเนฟิออนมีความหนามากขึ้น โดยความหนาของขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณชั้นขอบนน้ำเท่ากับ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพิ่มขึ้นเป็น 0.361, 0.368 และ 0.376 มิลลิเมตรตามลำดับ ทำให้การแพร่ผ่านของแพลทินัมไอออนเข้าสู่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยาเป็นไปได้ยากขึ้น [39] ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่

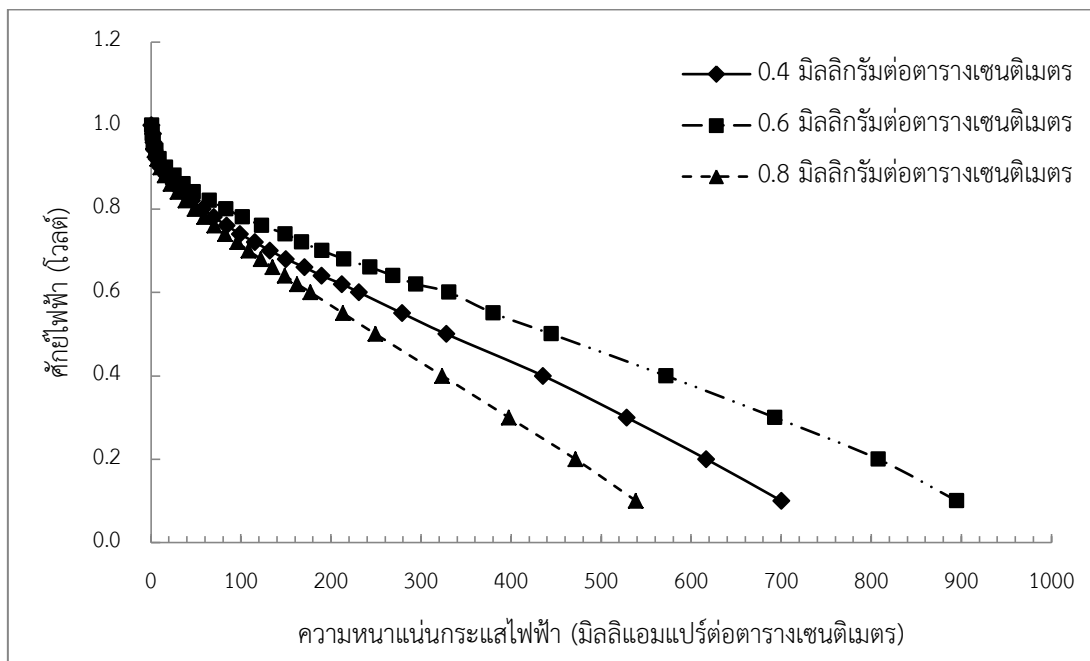
โดยผลการทดลองที่ได้นี้จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Taylor และคณะ [40] ซึ่งพบว่าปริมาณเนฟิออนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความหนาของขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้เมื่อปริมาณเนฟิออนเพิ่มขึ้นจะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของแก๊สเข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นไปได้ยากขึ้น โดยระบบจะถูกจำกัดด้วยการแพร่ของสารตั้งต้น (Mass transfer limitation) [41] นอกจากนี้การเติมเนฟิออนลงบนขั้วไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโปรตอนและไอออน ทำให้ขั้วไฟฟ้ามีสมบัติการนำโปรตอนที่ดีขึ้น แต่ในกรณีที่ทำกรเติมเนฟิออนในปริมาณที่มากเกินไป พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟาลดลงเนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณเนฟิออนมากเกินไปทำให้ความหนาของขั้วไฟฟ้ามีมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนเป็นไปได้ยากขึ้นจึงทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นนั่นเอง [39]



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 5000) แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยมีปริมาณชั้นขอบน้ำต่างกัน : (ก) 0.4; (ข) 0.6; (ค) 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อนำขี้ไฟฟ้าที่เตรียมจากขี้ไฟฟ้าที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำที่ต่างกันมาทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าขี้ไฟฟ้าทั้งสามต่างกันในช่วงโพลาริเซชันทางเคมี เมื่อพิจารณากราฟโพลาริเซชันจากรูปที่ 4.4 พบว่าเอมีเอที่เตรียมจากขี้ไฟฟ้าที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำเท่ากับ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงสุดมีค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์มีค่าเท่ากับ 331.3 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าขี้ไฟฟ้าที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำเท่ากับ 0.4 และ 0.8 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เท่ากับ 231.3 และ 177.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ เนื่องจากปริมาณชั้นขอบน้ำส่งผลต่อการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยไฟฟ้า เมื่อขี้ไฟฟ้าที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำที่ต่างกัน ทำให้ลักษณะการกระจายตัวและสัญญาณวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน (ดังแสดงในภาพไมโครกราฟรูปที่ 4.3) ซึ่งลักษณะที่ต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยานี้เองเป็นผลให้ความสูญเสียในช่วงโพลาริเซชันทางเคมีต่างกัน นอกจากนี้ขี้ไฟฟ้าที่มีปริมาณชั้นขอบน้ำน้อยเกินไปจะทำให้การสัมผัสกันของเนฟออน ผงคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยามีน้อย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล [25, 42]

ในทางกลับกันหากข้อไฟฟ้ามีปริมาณชั้นชอบน้ำที่มากเกินไป จะทำให้แก๊สเชื้อเพลิงเคลื่อนที่มายังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาได้ยากขึ้น และยังทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของข้อไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของข้อไฟฟ้า ที่เตรียมชั้นย่อยโดยเทคนิคการสเปรย์โดยมีปริมาณชั้นชอบน้ำต่างกัน

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าเทคนิคที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นย่อยคือเทคนิคการสเปรย์ เนื่องจากทำให้ผิวหน้าของข้อไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอและปริมาณชั้นชอบน้ำที่เหมาะสมคือ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนลงบนพื้นผิวข้อไฟฟ้ามีขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงคือส่งผลให้มีความสูญเสียในช่วงโพลาริเซชันทางเคมีต่ำ ค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์มีค่าสูงที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเตรียมข้อไฟฟ้าโดยเทคนิคการสเปรย์และปริมาณชั้นชอบน้ำคือ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อนำไปศึกษาถึงผลของชั้นแพร่แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมต่อไป

4.2 ผลของชนิดและสมบัติของชั้นแพร่แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

ชั้นแพร่แก๊สเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับแผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส เป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลและความสม่ำเสมอของแก๊สเชื้อเพลิงที่เข้าทำปฏิกิริยาที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเส้นทางผ่านของน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องทางการไหลของแก๊ส เป็นตัวนำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ครบวงจร ส่งผ่านความ

ร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไปยังช่องทางการไหลของแก๊สเพื่อกำจัดออกจากเซลล์ เป็นตัวรองรับเชิงกล เพื่อป้องกันการซ้อนทับกันระหว่างเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้ากับช่องทางการไหลของแก๊ส ดังนั้นชั้นแพร์แก๊สควรมีสสมบัติดังต่อไปนี้

- มีความพรุนเพียงพอที่จะทำให้เกิดการแพร่ของสารตั้งต้น ตัวออกซิแดนต์และน้ำ แต่ขนาดรูพรุนจะต้องไม่ใหญ่จนทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาฝังตัวในชั้นแพร์แก๊สซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ถูกใช้ประโยชน์เนื่องจากไม่มีการสัมผัสกันของบริเวณสามเฟส
- มีสภาพนำกระแสไฟฟ้าและความร้อนสูงทั้งในแนวระนาบ (In plane) และแนวตัดขวาง (Through plane)
- มีความแข็งแรง (Rigid) เพื่อค้ำจุนชั้นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า แต่ต้องมีความงอได้ (Flexibility) เพื่อรักษาการสัมผัสประจุไฟฟ้า (Electrical contact)

โดยทั่วไปชั้นแพร์แก๊สผลิตจากเส้นใยคาร์บอน เมื่อนำมาทำเป็นกระดาษเรียกว่ากระดาษคาร์บอน (Carbon paper) หรือนำมาทอเป็นผ้าเรียกว่าผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) [2] โดยงานวิจัยนี้เลือกชั้นแพร์แก๊สที่นำมาศึกษาจาก 3 บริษัท สามารถแบ่งประเภทของชั้นแพร์แก๊สเป็น 2 ประเภทคือ ผ้าคาร์บอนและกระดาษคาร์บอน รวมทั้งหมด 14 ตัวอย่าง ซึ่งมีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยจะทำการตั้งชื่อเพื่อใช้แทนชั้นแพร์แก๊สในงานวิจัยนี้ โดยมีหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- แต่ละชื่อที่ใช้เรียกชั้นแพร์แก๊สที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน เช่น XX-YY-ZZ
- ตัวอักษรส่วนแรก (XX) บอกถึงบริษัทที่ผลิตชั้นแพร์แก๊สนั้น มีทั้งหมด 3 บริษัทคือ บริษัท Electrochem ใช้ตัวย่อคือ ELT บริษัท E-tek ใช้ตัวย่อคือ ETEK และสุดท้ายคือบริษัท Sigracet ใช้ตัวย่อคือ SGL
- ตัวอักษรส่วนที่สอง (YY) บอกถึงประเภทของชั้นแพร์แก๊ส ในกรณีที่เป็นผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) ใช้ตัวย่อ CC และกระดาษคาร์บอน (Carbon paper) ใช้ตัวย่อ CP
- ตัวเลขและตัวอักษรในส่วนที่สาม (ZZ) บอกถึงปริมาณ PTFE ของชั้นแพร์แก๊สที่ผลิตโดยแต่ละบริษัท ตัวอักษรย่อ SWP (Standard wet-proof) คือปริมาณ PTFE 10-50%, 0 คือปริมาณ PTFE 0% หรือไม่มี PTFE เป็นองค์ประกอบ, 5 คือปริมาณ PTFE 5%, 10 คือปริมาณ PTFE 10%, 20 คือปริมาณ PTFE 20%, 30 คือปริมาณ PTFE 30%
- ชั้นแพร์แก๊สบางชนิดทางบริษัทได้เตรียมชั้นไมโครพอร์ส (Micro-porous layer) โดยจะใช้ตัวย่อเป็น MPL

การกำหนดชื่อย่อเพื่อใช้แทนชั้นแพร์แก๊สที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงชื่อย่อที่ใช้แทนชั้นแพร่แก๊สในงานวิจัย

บริษัทผู้ผลิต	ประเภทชั้นแพร่แก๊ส	ปริมาณ PTFE (%)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ชื่อที่ใช้
Electrochem	ผ้าคาร์บอน	30	0.33	ELT-CC-30
Electrochem	กระดาษคาร์บอน	30	0.19	ELT-CP-30
E-tek	ผ้าคาร์บอน	10-50	0.35	EOTEK-CC-SWP
E-tek	ผ้าคาร์บอน	10	0.35	EOTEK-CC-10
E-tek	ผ้าคาร์บอน	20	0.35	EOTEK-CC-20
E-tek	ผ้าคาร์บอน	30	0.35	EOTEK-CC-30
E-tek	กระดาษคาร์บอน	10-50	0.09	EOTEK-CP-SWP-A
E-tek	กระดาษคาร์บอน	30	0.09	EOTEK-CP-30
E-tek	กระดาษคาร์บอน	10-50	0.35	EOTEK-CP-SWP-B
E-tek	ผ้าคาร์บอน	0	0.32	EOTEK-CC-0-MPL
E-tek	กระดาษคาร์บอน	0	0.21	EOTEK-CP-0-MPL
Sigracet	กระดาษคาร์บอน	5	0.17	SGL-CP-5
Sigracet	กระดาษคาร์บอน	5	0.23	SGL-CP-5-MPL-A
Sigracet	กระดาษคาร์บอน	5	0.32	SGL-CP-5-MPL-B

4.2.1 ผลของประเภทของชั้นแพร่แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

โดยทั่วไปชั้นแพร่แก๊สที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภทคือ ผ้าคาร์บอนและกระดาษคาร์บอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของประเภทของชั้นแพร่แก๊สต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างของชั้นแพร่แก๊สที่นำมาศึกษาปัจจัยของประเภทชั้นแพร่แก๊สที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มตัวอย่างแรกคือชั้นแพร่แก๊สของบริษัท E-tek ประกอบด้วย EOTEK-CC-SWP และ EOTEK-CP-SWP-B และกลุ่มตัวอย่างที่ 2 คือชั้นแพร่แก๊สของบริษัท Electrochem ประกอบด้วย ELT-CC-30 และ ELT-CP-30

กลุ่มตัวอย่างที่ 1 คือชั้นแพร่แก๊สประเภทผ้าคาร์บอนและกระดาษคาร์บอนจากบริษัท E-tek มีความหนาและปริมาณ PTFE ใกล้เคียงกัน โดยบริษัทผู้ผลิตระบุเป็น standard wet-proof ที่มีปริมาณ PTFE อยู่ในช่วง 10-50% (ต่างกันเฉพาะวิธีการผลิตเท่านั้น) จากการวิเคราะห์สมบัติของชั้นแพร่แก๊สทั้ง 2 พบว่าผ้าคาร์บอน EOTEK-CC-SWP มีความหนาแน่น, ค่ามุมสัมผัสและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่น้อยกว่ากระดาษคาร์บอน EOTEK-CP-SWP-B ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณา

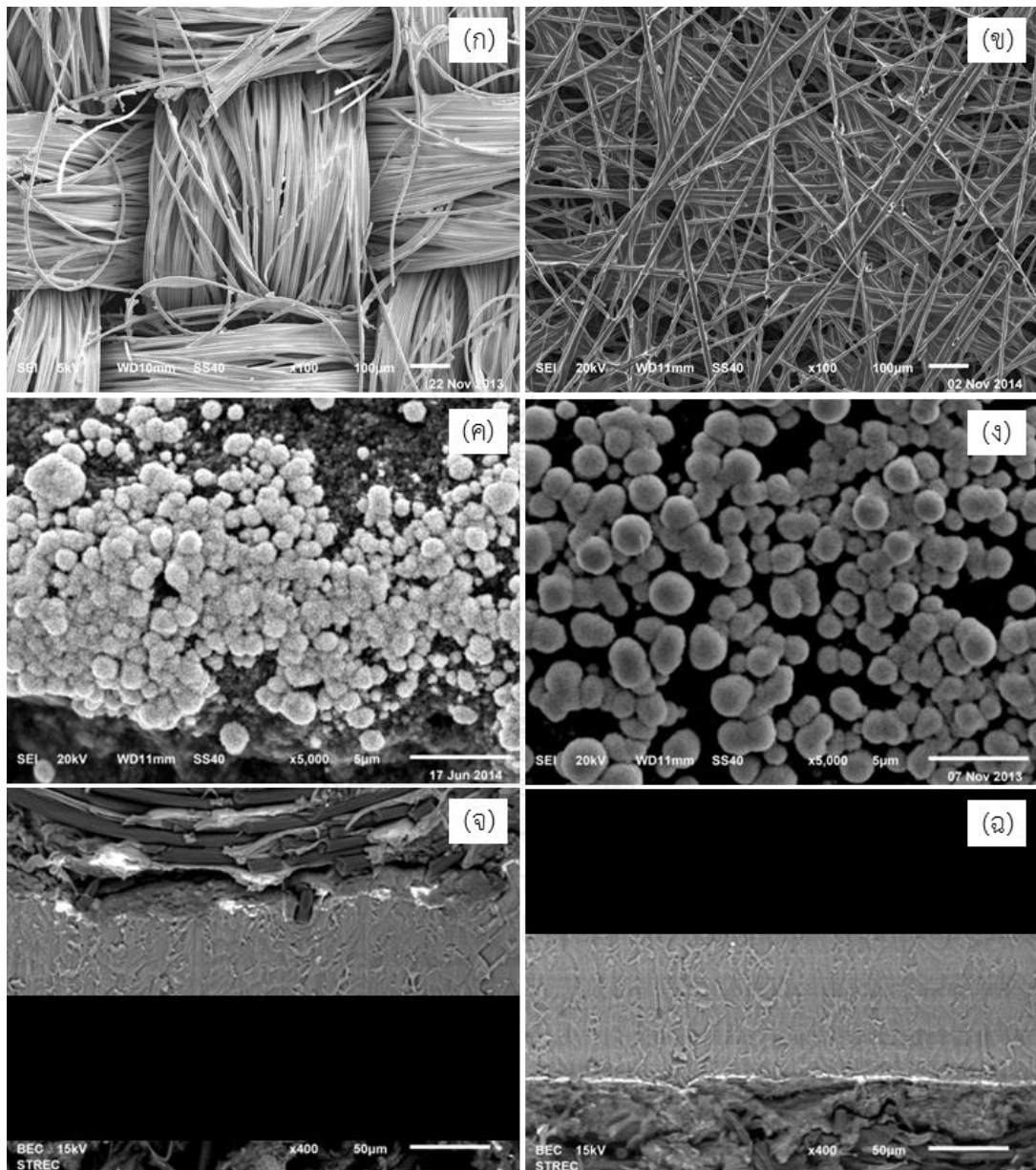
ภาพถ่ายไมโครกราฟพบว่าชั้นแพร์แก๊สประเภทผ้าคาร์บอน (รูปที่ 4.5 (ก)) มีโครงสร้างที่ต่างกับ กระจกคาร์บอน (รูปที่ 4.5 (ข)) เนื่องจากกระจกคาร์บอนผลิตจากเส้นใยคาร์บอน ผ่าน กระบวนการขึ้นรูปเพื่อให้เส้นใยยึดเกาะกันและทำให้เป็นแผ่นเรียบ ส่วนผ้าคาร์บอนเกิดจากการทอ ของเส้นใยคาร์บอน ด้วยวิธีการผลิตที่ต่างกันทำให้ชั้นแพร์แก๊สทั้งสองมีโครงสร้างที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังมีสมบัติที่ต่างกันด้วย

ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-SWP และ ETEK-CP-SWP-B

ชื่อย่อ	ETEK-CC-SWP	ETEK-CP-SWP-B
ประเภทของชั้นแพร์แก๊ส	ผ้าคาร์บอน	กระจกคาร์บอน
ปริมาณ PTFE (%)	10-50	10-50
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.35	0.35
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.59	0.69
มุมสัมผัส (องศา)	136.33	150.15
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	36.4	47.5
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.32	0.25
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	220.6	192.7
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	235.7	212.7

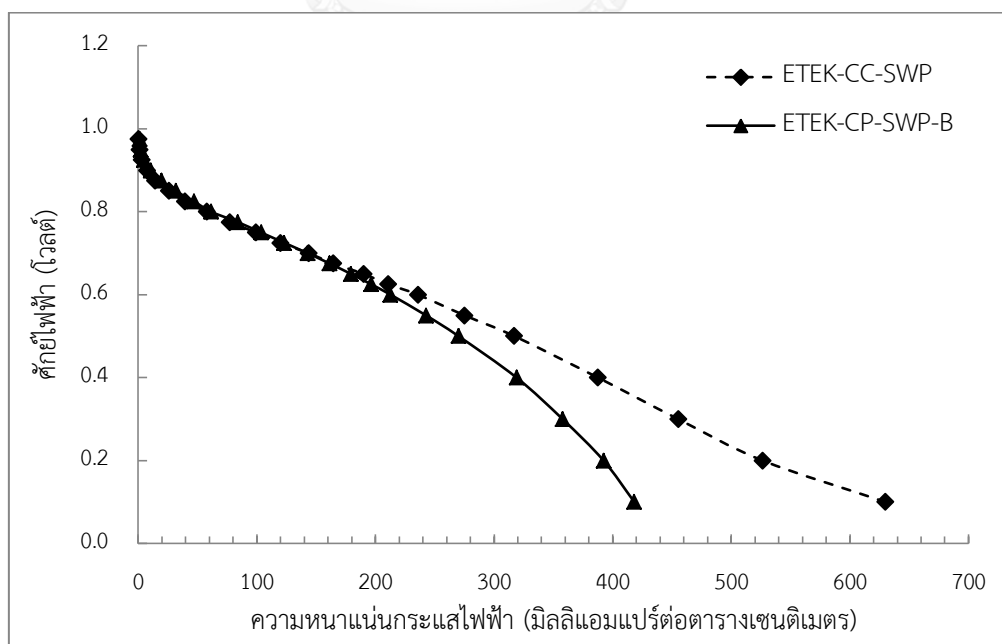
หลังจากทำการเตรียมชั้นย่อยลงบนขั้วไฟฟ้าและพอกพูนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแล้ว นำ ขั้วไฟฟ้ามาวิเคราะห์หาปริมาณแพลทินัมที่พอกพูนได้ พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนชั้น แพร์แก๊ส ETEK-CC-SWP ที่มากกว่า (0.32 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ บนขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-B (0.25 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อ พิจารณาจากภาพถ่ายไมโครกราฟพบว่าชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-B (รูปที่ 4.5 (ง)) มีอนุภาคที่ ใหญ่กว่าแต่ลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าชั้นแพร์ แก๊ส ETEK-CC-SWP (รูปที่ 4.5 (ค)) ที่มีการเกาะกลุ่มกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดการซ้อนทับ

กันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้มีปริมาณที่มากกว่า ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่นี้จะเกิดการพอกพูนบนมัด (Bundle) ของเส้นใยคาร์บอนที่เกิดจากการทอ



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสีฐานของ : (ก) ชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-SWP (X 100); (ข) ชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-B (X 100); (ค) ตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-SWP (X 5000); (ง) ตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-B (X 5000); (จ) ภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-SWP (X 400); (ฉ) ภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-B (X 400)

เมื่อพิจารณาพร้อมกับพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาพบว่าขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-SWP มีค่ามากกว่าขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-B เล็กน้อย โดยมีค่าพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา คือ 220.6 และ 192.7 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งน่าจะมาจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-SWP มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า แต่เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีการเกาะกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยจากชั้นแพล์แกส ETEK-CP-SWP-B เมื่อนำชั้นแพล์แกสทั้งสองมาทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกันในช่วงของการสูญเสียโพลาริเซชันทางเคมี โดยกระดาษคาร์บอนมีแนวโน้มในช่วงการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิกที่มากกว่า โดยความต้านทานไฟฟ้าของชั้นแพล์แกส ETEK-CP-SWP-B มีค่ามากกว่า (47.5 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร) ชั้นแพล์แกส ETEK-CC-SWP (36.4 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร) เนื่องจากในขั้นตอนการผลิตกระดาษคาร์บอนนั้นจำเป็นต้องมีการเติมเรซินเพื่อให้เส้นใยยึดเกาะกัน แต่ผ้าคาร์บอนไม่มีการเติมสารชนิดนี้เนื่องจากการยึดเกาะของเส้นใยเกิดจากการทอ [43] โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของชั้นแพล์แกส ETEK-CC-SWP และ ETEK-CP-SWP-B มีค่าเท่ากับ 235.7 และ 212.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ผ้าคาร์บอนมีสมรรถนะที่ดีกว่าเนื่องจากผ้าคาร์บอนมีความเป็นรูพรุนสูงกว่ากระดาษคาร์บอน ซึ่งน่าจะส่งผลให้มีการลำเลียงแก๊สออกซิเจนที่เป็นสารตั้งต้นไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า และน่าจะส่งผลให้มีอัตราการกำจัดน้ำที่ดีกว่ากระดาษคาร์บอน [2, 32]



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากประเภทของชั้นแพล์แกสต่างกันของบริษัท E-tek

พิจารณาภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-SWP (รูปที่ 4.5 (จ)) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนกระจายตัวลงตามรูพรุนและไม่ค่อยสม่ำเสมอของชั้นไมโครพอร์รัส เมื่อเปรียบเทียบกับภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-B (รูปที่ 4.5 (ฉ)) ซึ่งพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเท่านั้น ทำให้เกิดการใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-SWP จึงมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-SWP มีค่ามากกว่าก็ตาม

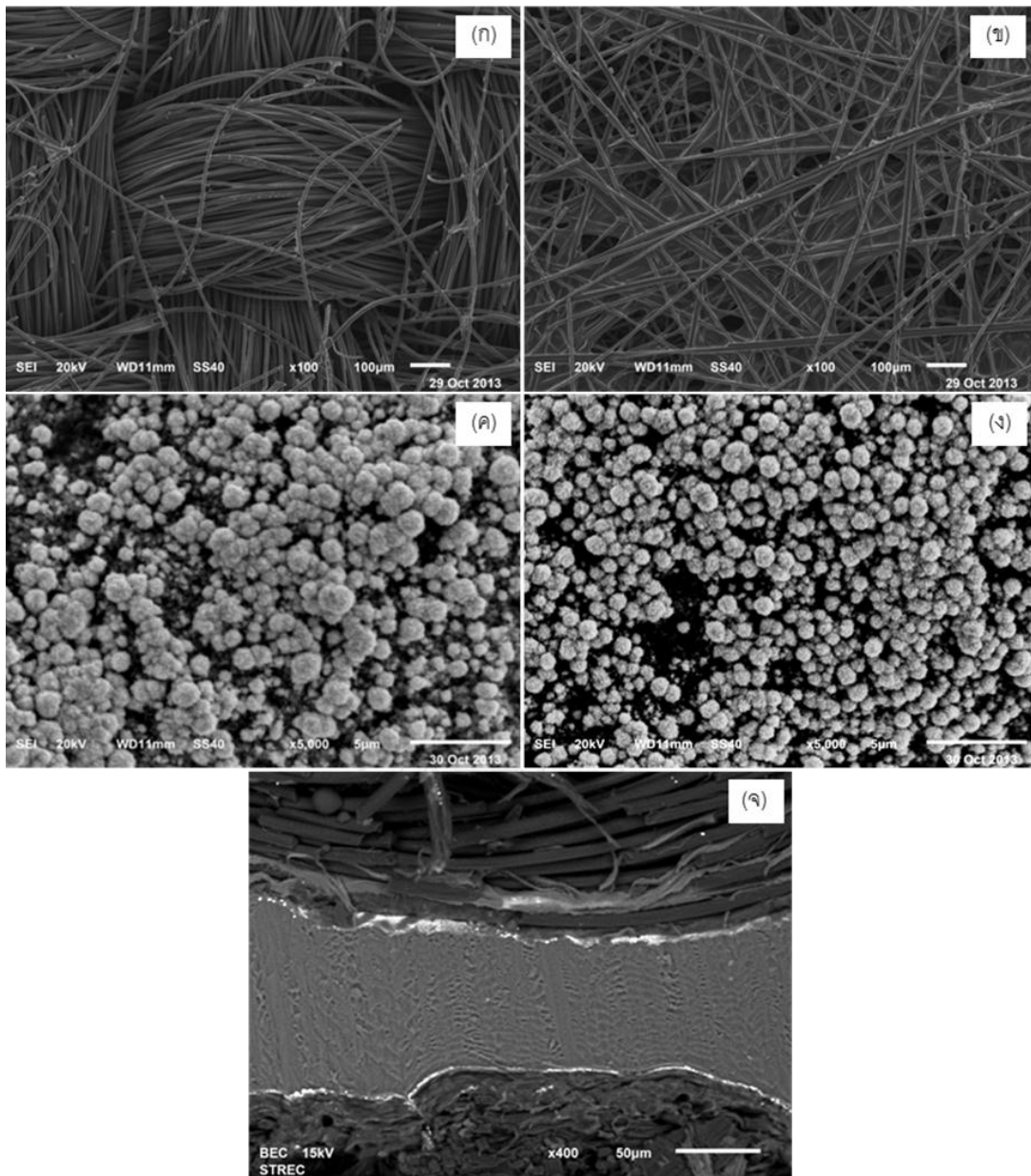
กลุ่มตัวอย่างที่ 2 ที่นำมาศึกษาถึงผลของประเภทของชั้นแพร่แก๊สที่มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าคือ ผ้าคาร์บอนและกระดาษคาร์บอนของบริษัท Electrochem โดยมีปริมาณ PTFE เท่ากันมีค่าเท่ากับ 30% โดยแตกต่างกันที่ความหนาและชนิดของชั้นแพร่แก๊ส (เนื่องจากไม่สามารถหากระดาษคาร์บอนและผ้าคาร์บอนที่มีความหนาที่เท่ากันได้ ซึ่งผลของความหนาที่ต่างกันอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้) จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชั้นแพร่แก๊สทั้งสองพบว่ากระดาษคาร์บอน ELT-CP-30 มีความหนาแน่นที่สูงกว่าผ้าคาร์บอน ELT-CC-30 แต่ ELT-CC-30 มีความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่า ELT-CP-30 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พิจารณาภาพถ่ายไมโคร กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าผ้าคาร์บอน (รูปที่ 4.7 (ก)) และกระดาษคาร์บอน (รูปที่ 4.7 (ข)) มีโครงสร้างที่ต่างกันเนื่องจากวัสดุและการผลิตที่ต่างกัน ทำให้มีสมบัติที่ต่างกันด้วย [43] โดยที่กระดาษคาร์บอนมีแนวโน้มที่บางกว่าและมีความเปราะมากกว่าผ้าคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีลักษณะแข็งทำให้มีความสามารถในการอัดตัว ในขณะที่ผ้าคาร์บอนมีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงอัดได้มากกว่ากระดาษคาร์บอน แต่ความหนาของผ้าคาร์บอนแนวโน้มที่มากกว่ากระดาษคาร์บอน

ทำการเตรียมชั้นย่อยซึ่งประกอบด้วยชั้นไมชอบน้ำและชั้นชอบน้ำลงบนชั้นแพร่แก๊สทั้งสองชนิด จากนั้นทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า นำขั้วไฟฟ้าที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนชั้นแพร่แก๊ส ELT-CC-30 และ ELT-CP-30 มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.22 และ 0.29 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ พิจารณาภาพถ่ายไมโครกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าขั้วไฟฟ้า ELT-CP-30 (รูปที่ 4.7 (ง)) มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กกว่าเพียงเล็กน้อยและลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีความสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน แต่ ELT-CC-30 มีแนวโน้มที่จะมีการซ้อนทับกันของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย (รูปที่ 4.7 (ค)) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของชั้นแพร่แก๊สทั้งสองประเภทพบว่าผิวหน้าของชั้นแพร่แก๊สประเภทกระดาษคาร์บอน (รูปที่ 4.7 (ข)) จะมีผิวหน้าที่สม่ำเสมอมากกว่าชั้นแพร่แก๊สประเภทผ้าคาร์บอน (รูปที่ 4.7 (ก)) ที่ผลิตโดยการทอเส้นใยคาร์บอนซึ่งทำให้เกิดส่วนนูนระหว่างมัดของเส้นใยคาร์บอน ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการซ้อนทับของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่าในบริเวณนี้นั่นเอง

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร่แก๊ส ELT-CC-30 และ ELT-CP-30

ชื่อย่อ	ELT-CC-30	ELT-CP-30
ประเภทของชั้นแพร่แก๊ส	ผ้าคาร์บอน	กระดาษคาร์บอน
ปริมาณ PTFE (%)	30	30
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.33	0.19
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.43	0.57
มุมสัมผัส (องศา)	142.13	137.27
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	57.5	42.6
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.22	0.29
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	288.7	324.1
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	327.2	352.0

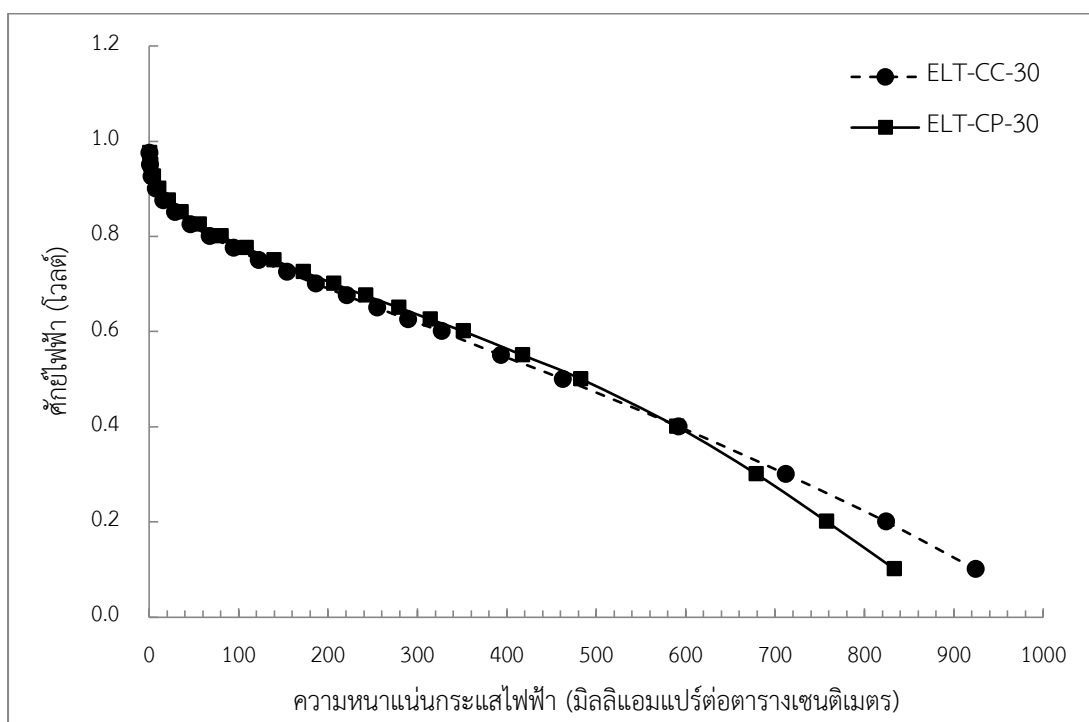
นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า ELT-CP-30 มีค่าเท่ากับ 324.1 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30 ที่มีค่าพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 288.7 ตารางเมตรต่อกรัม โดยเมื่อพิจารณาร่วมกับภาพตัดขวางดังแสดงในรูปที่ 4.7 (จ) ของขั้วไฟฟ้า ELT-CP-30 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีการกระจายตัวอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเท่านั้นและมีการซ้อนทับของตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อย ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30 ตัวเร่งปฏิกิริยามีการซ้อนทับและจับเป็นกลุ่มก้อนมากกว่า



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงสัณฐานของ : (ก) ชั้นแพร่แก๊ส ELT-CC-30 (X 100); (ข) ชั้นแพร่แก๊ส ELT-CP-30 (X 100); (ค) ตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30 (X 5000); (ง) ตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า ELT-CP-30 (X 5000); (จ) ภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30 (ด้านบน) และ ELT-CP-30 (ด้านล่าง) (X 400)

เมื่อนำขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30 และ ELT-CP-30 มาประกอบกับเมมเบรนและนำไปทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 327.2 และ 352.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากกราฟโพลาริเซชัน พบว่าที่ความ

หนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ผ้คาร์บอนมีสมรรถนะที่ดีกว่ากระดาษคาร์บอน โดยต่างกันในช่วงของการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากโพลาริเซชันของความเข้มข้นเล็กน้อย ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากกระดาษคาร์บอนมีความหนาแน่นมากกว่าผ้คาร์บอน น่าจะส่งผลให้การแพร่ของแก๊สที่เป็นสารตั้งต้นเพื่อเข้าไปเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณขั้วตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการแพร่ของแก๊สได้ช้ากว่าผ้คาร์บอนที่มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า [44] แต่เนื่องจากกระดาษคาร์บอนมีความหนาที่น้อยกว่าผ้คาร์บอน ซึ่งอาจจะชดเชยในส่วนนี้ จึงส่งผลให้ในช่วงของการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากโพลาริเซชันของความเข้มข้นของกระดาษคาร์บอนต่างกับผ้คาร์บอนเพียงเล็กน้อย

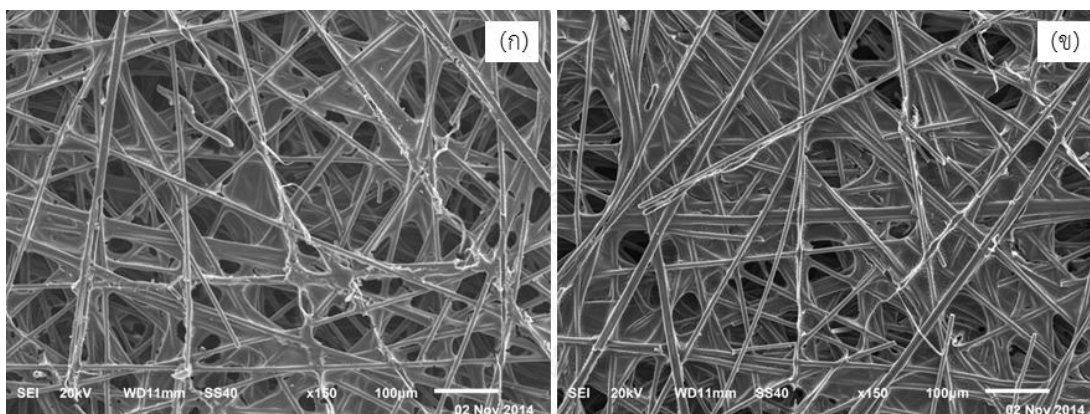


รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากประเภทของชั้นแพร่แก๊สต่างกันของบริษัท Electrochem

4.2.2 ผลของความหนาของชั้นแพร่แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

สมบัติของชั้นแพร่แก๊ส เช่น ความต้านทานไฟฟ้า ความแข็งแรง ความยืดหยุ่นและความหนาของชั้นแพร่แก๊สล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งสิ้น [29] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของความหนาของชั้นแพร่แก๊สที่มีต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยกลุ่มตัวอย่างของชั้นแพร่แก๊สที่นำมาศึกษาปัจจัยของความหนาของชั้นแพร่แก๊สที่มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม สามารถออกแบบได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มตัวอย่างที่ 1 คือชั้นแพร่แก๊สของบริษัท E-tek ประกอบด้วย ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-SWP-B และกลุ่มตัวอย่างที่ 2 คือชั้นแพร่แก๊สของบริษัท Sigracet ประกอบด้วย SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B

กลุ่มตัวอย่างแรกของการศึกษาคือชั้นแพร์แก๊สที่เป็นกระดาษคาร์บอนของบริษัท E-tek (E TEK-CP-SWP-A และ E TEK-CP-SWP-B) ซึ่งมีปริมาณ PTFE ใกล้เคียงกัน โดยบริษัทผู้ผลิตระบุว่า เป็น standard wet-proof ที่มีปริมาณ PTFE 10-50% แต่มีความหนาที่แตกต่างกันคือ 0.09 และ 0.35 มิลลิเมตรตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของชั้นแพร์แก๊สทั้งสอง แสดงดัง ภาพถ่ายไมโครกราฟในรูปที่ 4.9 พบว่าชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-A (รูปที่ 4.9 (ก)) ที่มีความหนา เท่ากับ 0.09 มิลลิเมตร มีรูพรุนขนาดใหญ่ในปริมาณที่มากกว่าชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-B (รูปที่ 4.9 (ข))



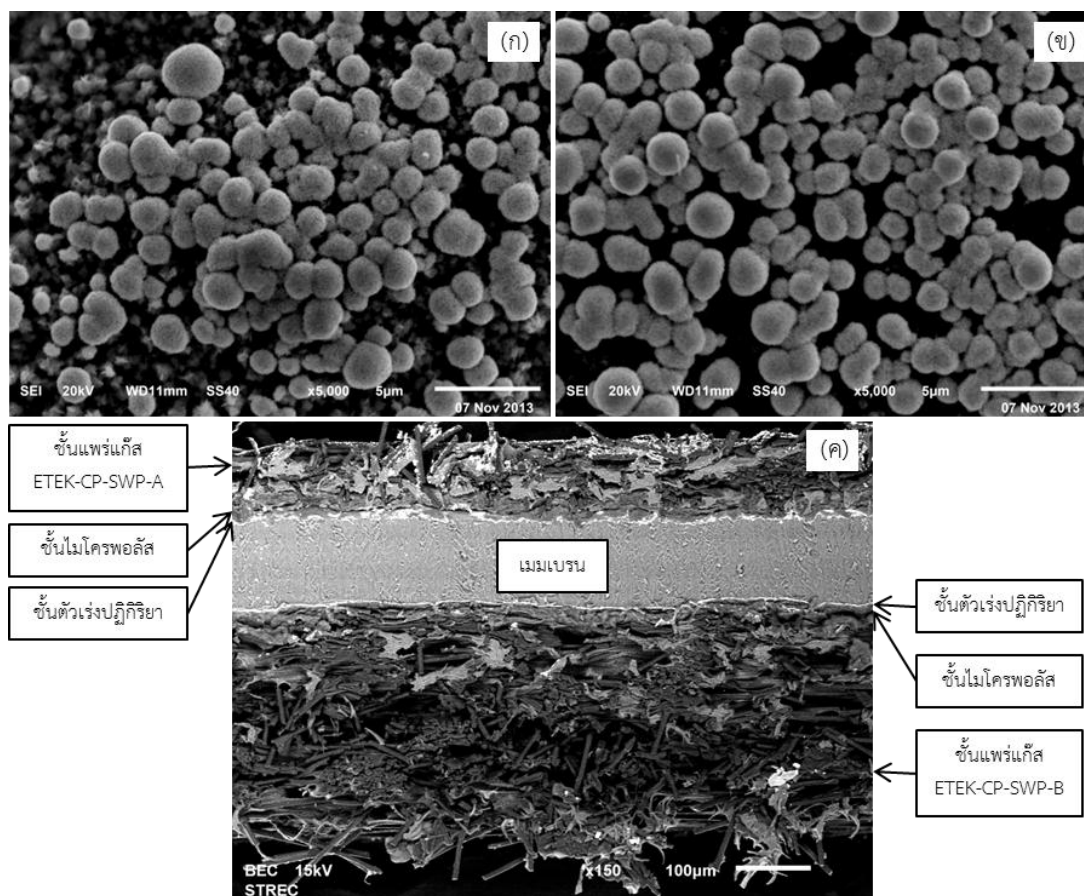
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 150) แสดงลักษณะ ของชั้นแพร์แก๊ส : (ก) ETEK-CP-SWP-A; (ข) ETEK-CP-SWP-B

จากนั้นทำการวัดสมบัติเชิงกายภาพของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-SWP-B พบว่าชั้นแพร์แก๊สทั้งสองมีค่ามอดุลัส (145.97 และ 150.15 องศาตามลำดับ) ที่ใกล้เคียง กัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่างกัน (15.9 และ 47.5 มิลลิโอมตารางเซนติเมตรตามลำดับ) เนื่องจาก ความหนาที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 หลังจากทำการเตรียมชั้นย่อยและตัวเร่งปฏิกิริยา แพลทินัมลงบนชั้นแพร์แก๊สแล้ว ทำการวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าเพื่อหาปริมาณแพลทินัม พบว่าปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-SWP-B มีค่าเป็น 0.17 และ 0.25 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายไมโครกราฟดังแสดงใน รูปที่ 4.10 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นแพร์แก๊สทั้งสองมีโครงสร้างลักษณะการกระจายตัวใกล้เคียงกัน แต่พบว่าขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-B มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A ในขณะที่ขนาดตัวเร่งแพลทินัมมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก สามารถอธิบายผลการทดลองได้จาก ภาพถ่ายไมโครกราฟรูปที่ 4.10 พบว่าขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A มีการเกาะกลุ่มและซ้อนทับกัน ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-B ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พื้นที่ผิวในการ เกิดปฏิกิริยามีค่าต่างกันในขณะที่ขนาดอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกันนั่นเอง

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-SWP-B

ชื่อย่อ	ETEK-CP-SWP-A	ETEK-CP-SWP-B
ปริมาณ PTFE (%)	10-50	10-50
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.09	0.35
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.79	0.69
มุมสัมผัส (องศา)	145.97	150.15
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	15.9	47.5
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.17	0.25
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	155.4	192.7
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	149.9	212.7

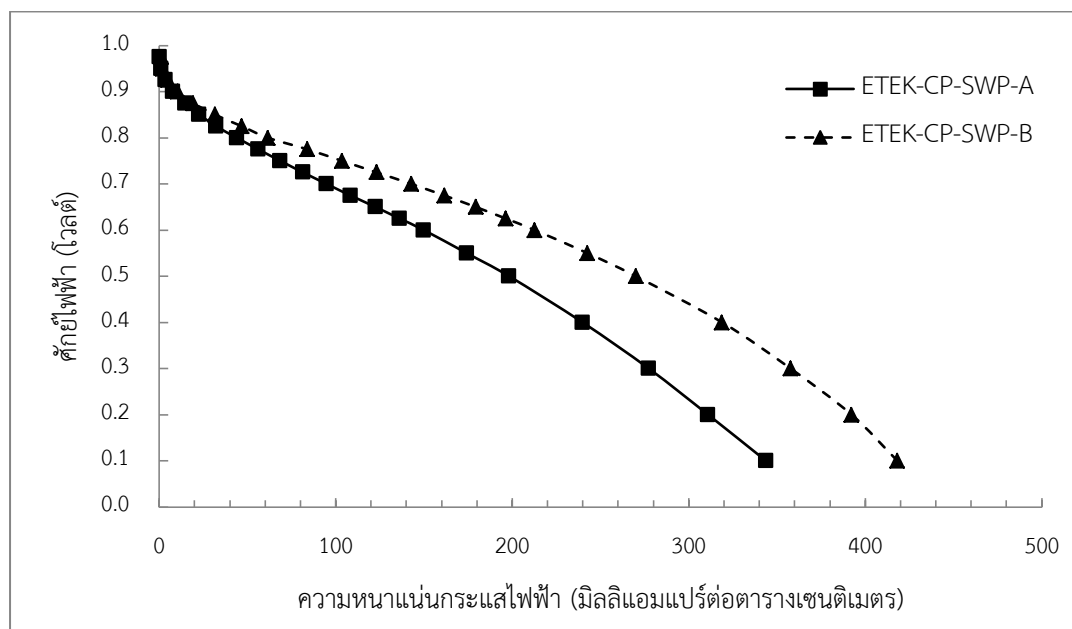
พิจารณาภาพถ่ายไมโครกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) พบว่าชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-A ที่มีความหนาเท่ากับ 0.09 มิลลิเมตร มีรูพรุนขนาดใหญ่ในปริมาณที่มากกว่าชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-B ดังแสดงในรูป 4.9 (ข) ถึงแม้ว่ากระดาษคาร์บอนทั้งสองชนิดจะมีลักษณะโครงสร้างของเส้นใยที่เหมือนกัน แต่เนื่องจากชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-A บางกว่าชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-B ประมาณ 4 เท่า ทำให้มีการซ้อนทับของเส้นใยน้อยกว่าทำให้เสมือนรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่า ทำให้ในขั้นตอนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมนอกจากจะเกิดการพอกพูนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า แล้วยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนที่สามารถกระจายตัวลงไปตามรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ของชั้นแพร่แก๊สและทะลุไปยังด้านในของขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A ดังแสดงในภาพถ่ายตัดขวางรูปที่ 4.10 (ค) และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนได้ยากกว่า เนื่องจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะต้องเป็นบริเวณที่มีการสัมผัสกันระหว่างขั้วไฟฟ้าหรือตัวเร่งปฏิกิริยา อิเล็กโทรไลต์และแก๊ส [42] ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงมีเพียงที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สัมผัสกับเมมเบรนเท่านั้น



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม: (ก) ชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-A (X 5000); (ข) ชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-B (X 5000); (ค) ภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-SWP-B (X 150)

เมื่อนำชั้นแพร่แก๊สทั้งสองมาทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงและพิจารณาจากกราฟโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ต่างกันในช่วงของโพลาริเซชันทางเคมี เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-B มีปริมาณมากกว่า (0.25 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เทียบกับ 0.17 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า (192.7 ตารางเมตรต่อกรัม เทียบกับ 155.4 ตารางเมตรต่อกรัม) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-A นั้นเอง พบว่าสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-B มีสมรรถนะที่ดีกว่าโดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์มีค่าเท่ากับ 212.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งมากกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A ที่มีค่า 149.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A มีการกระจายตัวลงไปบนชั้นแพร่แก๊ส ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ไม่สัมผัส

กับเมมเบรนทำให้เกิดการสูญเสียการใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้มีสมรรถนะที่ต่ำกว่านั่นเอง



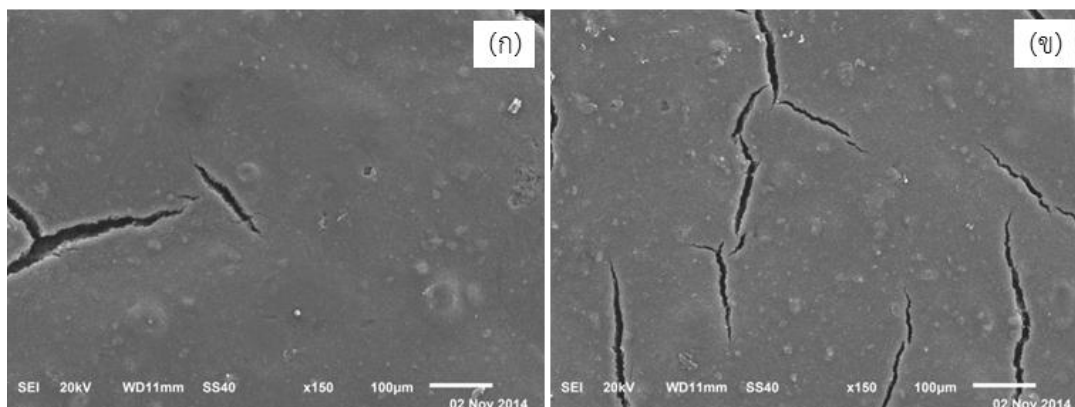
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊สบริษัท E-tek ที่มีความหนาต่างกัน

กลุ่มตัวอย่างที่ 2 ที่นำมาศึกษาถึงปัจจัยความหนาของชั้นแพร์แก๊สที่มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม คือชั้นแพร์แก๊สชนิดกระดาษคาร์บอนของบริษัท Sigracet (SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B) โดยชั้นแพร์แก๊สชนิดนี้ทางผู้ผลิตได้ทำการเคลือบชั้นไมโครพอร์สที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบไว้แล้ว โดยมีปริมาณ PTFE เท่ากันมีค่าเท่ากับ 5% แตกต่างกันที่ความหนา ความหนาของชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B เพิ่มขึ้นจาก 0.23 และ 0.32 มิลลิเมตร ค่าความต้านทานไฟฟ้ามี่ค่า 24.4 และ 36.4 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตรตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 หลังจากทำการเตรียมชั้นย่อยทั้งสองชั้น ประกอบด้วยชั้นไม่ชอบน้ำและชั้นชอบน้ำและทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ได้นำขั้วไฟฟ้าที่ได้มาวิเคราะห์พบว่าน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.23 และ 0.24 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B

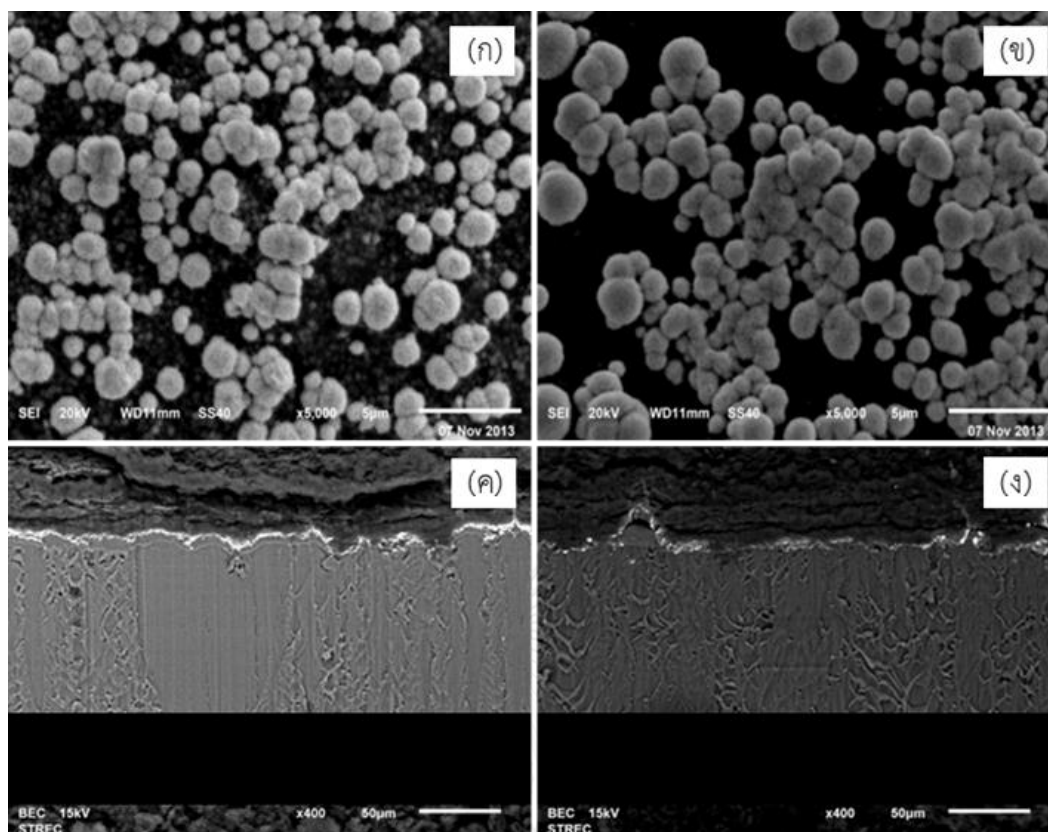
ชื่อย่อ	SGL-CP-5-MPL-A	SGL-CP-5-MPL-B
ปริมาณ PTFE (%)	5	5
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.23	0.32
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.43	0.44
มุมสัมผัส (องศา)	146.80	142.79
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	24.4	36.4
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.23	0.24
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	176.9	158.3
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	218.8	195.3

สัณฐานวิทยาของชั้นแพร์แก๊สแสดงด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากภาพถ่ายไมโครกราฟแสดงให้เห็นว่าชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B (รูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ) ทางผู้ผลิตได้ทำการเคลือบชั้นไมโครพอร์สบนผิวหน้ามาแล้ว จึงไม่เห็นโครงสร้างของเส้นใยคาร์บอนและพบว่าผิวหน้าของชั้นแพร์แก๊สทั้งสองมีความเรียบและมีลักษณะแน่น ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวน่าจะส่งผลต่อขั้นตอนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า



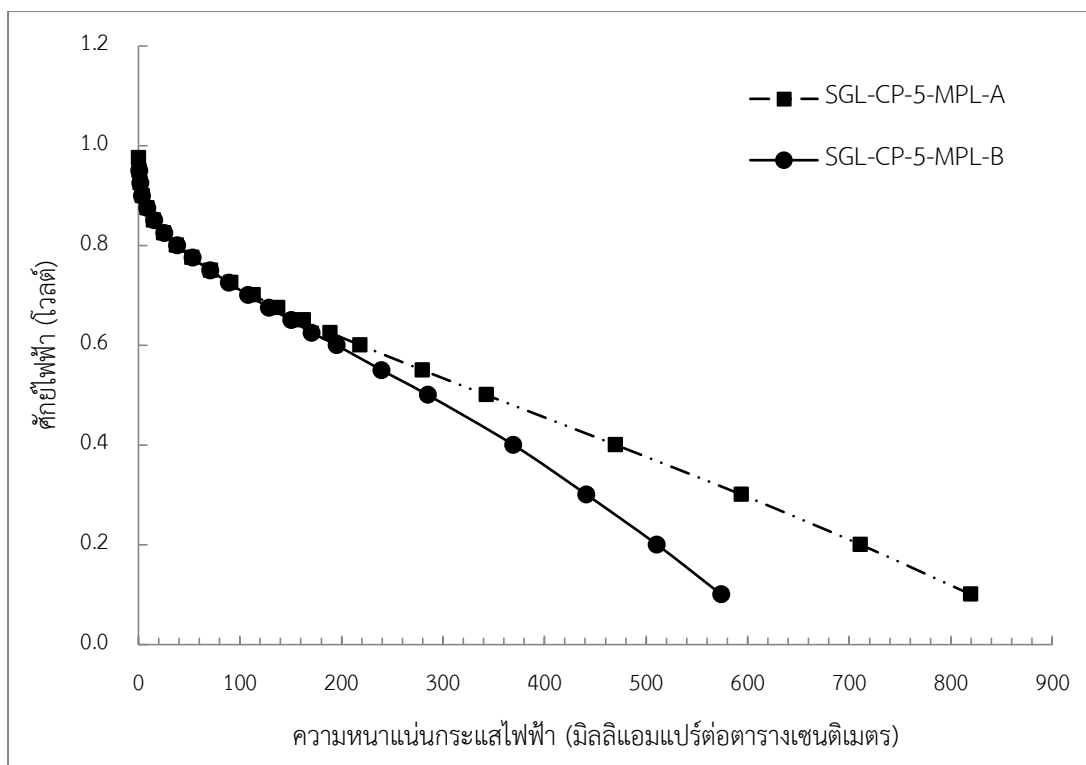
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 150) แสดงลักษณะของชั้นแพร์แก๊ส: (ก) SGL-CP-5-MPL-A; (ข) SGL-CP-5-MPL-B

ลักษณะวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าแสดงด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากภาพถ่ายไมโครกราฟแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนบนชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B (รูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) ตามลำดับ) ซึ่งเป็นชั้นแพร์แก๊สที่มีชั้นไมโครพอร์สอยู่แล้วนั้น มีลักษณะการกระจายตัวและความสม่ำเสมอที่ใกล้เคียงกัน โดยพบว่าอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนมีการซ้อนทับกัน โดยชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A มีการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เล็กกว่า SGL-CP-5-MPL-B เล็กน้อย และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5-MPL-B มีการซ้อนทับกันมากกว่า (รูปที่ 4.13 (ข)) ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาต่างกันคือ 176.9 และ 158.3 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า (X 5000): (ก) SGL-CP-5-MPL-A; (ข) SGL-CP-5-MPL-B; ภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (X 400): (ค) SGL-CP-5-MPL-A; (ง) SGL-CP-5-MPL-B

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าทั้งสองชนิดมาประกอบกับเมมเบรนและนำไปทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีสมรรถนะที่แตกต่างกันในช่วงการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก เนื่องจากชั้นแพร่แก๊สทั้งสองมีความหนาต่างกันโดยชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A มีความหนา 0.23 มิลลิเมตร และชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5-MPL-B มีความหนา 0.32 มิลลิเมตร ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าต่างกันด้วย โดยชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5-MPL-B มีความต้านทานไฟฟ้า 36.4 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A ที่มีความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 24.4 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และเป็นผลจากความไม่สม่ำเสมอของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย ทำให้เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5-MPL-A มีสมรรถนะที่ดีกว่า SGL-CP-5-MPL-B โดยค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์คือ 218.8 และ 195.3 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊สบริษัท Sigracet ที่มีความหนาแน่นต่างกัน

จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าความหนาแน่นของชั้นแพร์แก๊สจะส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อความหนาแน่นของชั้นแพร์แก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นแพร์แก๊สเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งปัจจัยนี้จะส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิก เมื่อความหนาแน่นของชั้นแพร์แก๊สมีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดจะทำให้การกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่น้อย และมีความแข็งแรงที่ต่ำ ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง นอกจากนั้นความหนาแน่นของชั้นแพร์แก๊สที่มีค่าน้อยมากนั้น ยังมีผลต่อความแข็งแรงเชิงกลที่จะทนต่อแรงกดอัดของน้ำหนักในขณะเซลล์เชื้อเพลิงประกอบกันหลายเซลล์ [29] โดยชั้นแพร์แก๊สที่มีความหนาน้อยมากหรือบางมากตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการกระจายตัวลงไปตามรูพรุนขนาดใหญ่แล้วเกิดการพอกพูนที่บริเวณนั้น แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว ถึงแม้บางครั้งจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงแต่ก็ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้เนื่องจากการสัมผัสกันของบริเวณสามเฟสที่น้อย ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

4.2.3 ผลของปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร์แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

โดยทั่วไปผู้ผลิตมักมีการเติมสาร PTFE ลงในโครงสร้างของเส้นใยของชั้นแพร์แก๊สมาอยู่แล้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร์แก๊สต่อการเตรียมตัวเร่ง

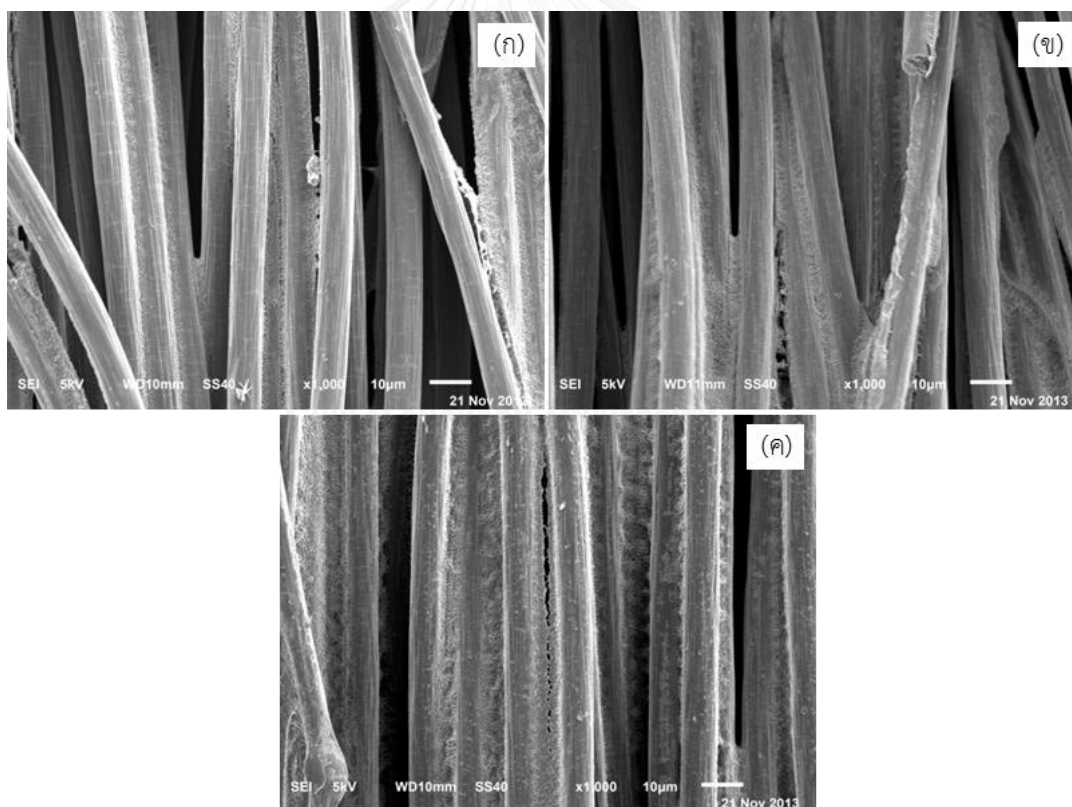
ปฏิกิริยาแพลทินัมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ชั้นแพร่แก๊สที่นำมาศึกษาเป็นของบริษัท E-tek โดยมีความหนาเท่ากันคือ 0.35 มิลลิเมตร แต่มีปริมาณ PTFE ต่างกัน โดยมีปริมาณ PTFE เป็นองค์ประกอบ 10, 20 และ 30% เป็นผลให้ความหนาแน่นต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CC-10, ETEK-CC-20 และ ETEK-CC-30

ชื่อย่อ	ETEK-CC-10	ETEK-CC-20	ETEK-CC-30
ปริมาณ PTFE (%)	10	20	30
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.35	0.35	0.35
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.38	0.43	0.50
มุมสัมผัส (องศา)	117.76	121.53	127.79
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร)	15.9	24.4	29.9
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.36	0.34	0.26
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	228.6	217.5	148.4
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)	307.3	295.4	218.3

ทำการวัดสมบัติทางกายภาพของชั้นแพร่แก๊สที่มีปริมาณ PTFE ต่างกัน ประกอบด้วยสมบัติความไม่ชอบน้ำ ซึ่งวัดโดยค่ามุมสัมผัส (Contact angle) และความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าปริมาณ PTFE มีความสัมพันธ์กับค่ามุมสัมผัสและค่าความต้านทานไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร่แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 10, 20 และ 30% ผิวหน้าของชั้นแพร่แก๊สจะมีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้น โดยดูได้จากค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 117.76, 121.53 และ 127.79 องศาตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของ PTFE พบว่าเป็นสารไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง เมื่อปริมาณ PTFE ของชั้นแพร่แก๊สเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติความไม่ชอบน้ำของชั้นแพร่แก๊สจะสูงขึ้นด้วย ทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าที่สูงขึ้น โดยโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ประกอบขึ้นด้วยสายโซ่ C-C ซึ่งเป็นแกนหลัก โดยมีอะตอมของฟลูออรีนสองอะตอมสร้างพันธะบนอะตอมคาร์บอนแต่ละตัว โดยหมู่ฟังก์ชันที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบจะ

ทำให้ผิวหน้ามีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นนั่นเอง [45] นอกจากนี้ PTFE ยังมีสมบัติความต้านทานไฟฟ้า [46] เมื่อปริมาณ PTFE เพิ่มขึ้นจาก 10, 20 และ 30% ส่งผลให้ค่าความต้านทานของชั้นแพร์แก๊สสูงขึ้นจาก 15.9, 24.4 และ 29.9 มิลลิโอม์ตารางเซนติเมตรตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายไมโครกราฟของชั้นแพร์แก๊สดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า ชั้นแพร์แก๊สที่มี PTFE เป็นองค์ประกอบในปริมาณที่ต่างกันจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ต่างกันด้วย โดยเส้นใยที่เกาะอยู่ระหว่างเส้นใยของผ้าคาร์บอนนั้นคือสาร PTFE พบว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนจะน้อยลงเมื่อปริมาณ PTFE เพิ่มขึ้น และชั้นแพร์แก๊สที่มีปริมาณ PTFE เป็นองค์ประกอบ 30% นั้นมีช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนน้อยที่สุด โดยทั่วไปชั้นแพร์แก๊สถูก wet-proof โดยสาร PTFE ในโครงสร้างของเส้นใย เพื่อป้องกันไม่ให้ชั้นแพร์แก๊สชุ่มในระหว่างการเตรียมชั้นไมโครพอร์สและลดการทะลุของผงคาร์บอนเข้าไปในเนื้อของชั้นแพร์แก๊ส นอกจากนี้ PTFE ยังช่วยในเรื่องของการจัดการน้ำและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างชั้นไมโครพอร์สและชั้นแพร์แก๊สอีกด้วย [47]



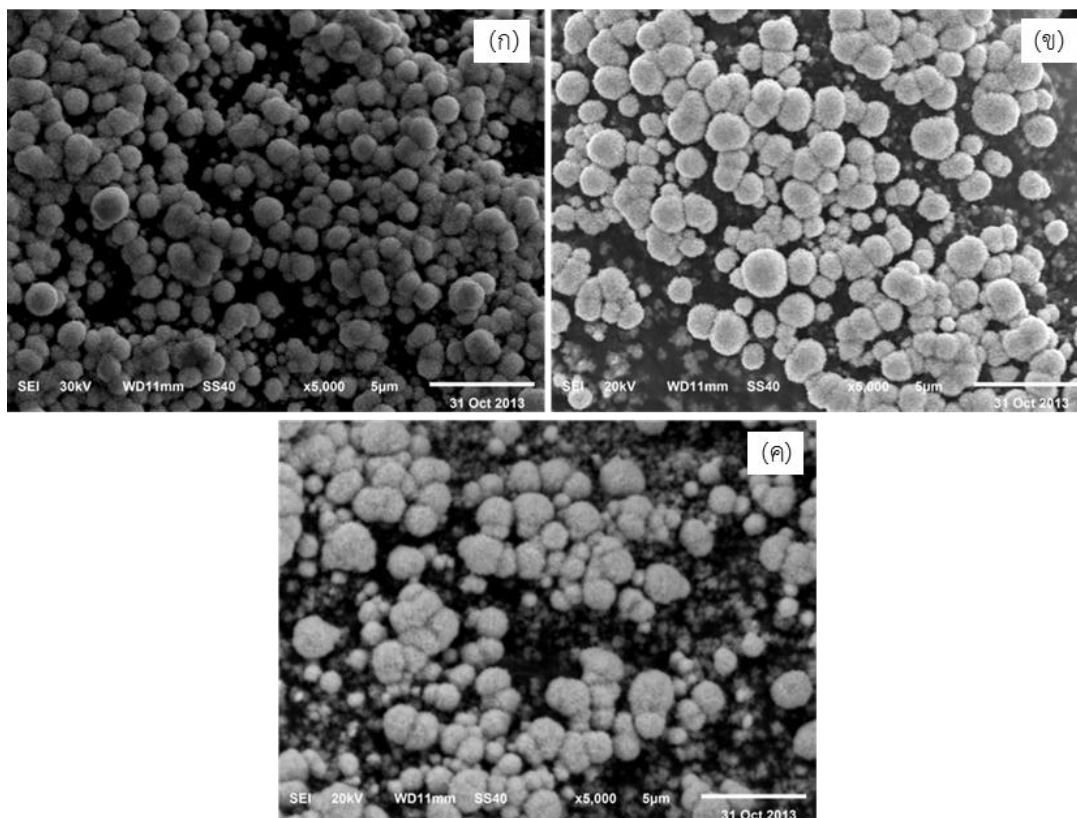
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 1000) แสดงสัณฐานของชั้นแพร์แก๊สที่มีปริมาณ PTFE เป็นองค์ประกอบ : (ก) 10; (ข) 20; (ค) 30%

เมื่อนำชั้นแพร์แก๊สที่มีปริมาณ PTFE ต่างกัน มาทำการเตรียมชั้นย่อยทั้งชั้นไม่ชอบน้ำและชั้นชอบน้ำ (ตามหัวข้อ 3.6.5) และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมลงบนชั้นแพร์แก๊สแล้ว พบว่าปริมาณ

PTFE ส่งผลต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้า โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนได้มีแนวโน้มลดลง (จาก 0.36 เป็น 0.26 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) เมื่อปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร่แก๊สสูงขึ้น เนื่องจาก PTFE เป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ซึ่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เมื่อปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร่แก๊สสูงขึ้นจาก 10, 20 และ 30% จึงไปลดสมบัติภาวะการเปียก (wetting property) ระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้าของชั้นแพร่แก๊สกับอิเล็กโทรไลต์ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่จะเกิดการพอกพูนบริเวณผิวหน้าของชั้นแพร่แก๊สยากขึ้น [39] จึงทำให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้มีปริมาณน้อยลง

สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าแสดงด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.16 จากภาพถ่ายไมโครกราฟแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนบนชั้นแพร่แก๊สที่มีปริมาณ PTFE เป็นองค์ประกอบ 10% (รูปที่ 4.16 (ก)) นั้นมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า การปกคลุมตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นแพร่แก๊สมากกว่าและมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นแพร่แก๊สที่มีปริมาณ PTFE เป็นองค์ประกอบ 20 (รูปที่ 4.16 (ข)) และ 30% (รูปที่ 4.16 (ค)) ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนบนชั้นแพร่แก๊สที่มีปริมาณ PTFE 20 และ 30% มีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นก้อนใหญ่ สัดส่วนการปกคลุมของตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นแพร่แก๊สมีสัดส่วนน้อยลงเมื่อปริมาณ PTFE ของชั้นแพร่แก๊สเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อปริมาณ PTFE เพิ่มมากขึ้นทำให้ลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นแยกตามไปด้วย นอกจากนั้นในขั้นตอนการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบในสารละลาย เมื่อทำการสเปรย์สารละลายลงบนชั้นแพร่แก๊สที่มี PTFE เป็นองค์ประกอบจะเกิดอันตรกิริยากับน้ำในสารละลาย ทำให้ผงคาร์บอนเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าไปเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้มีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและมีการรวมตัวเป็นก้อน

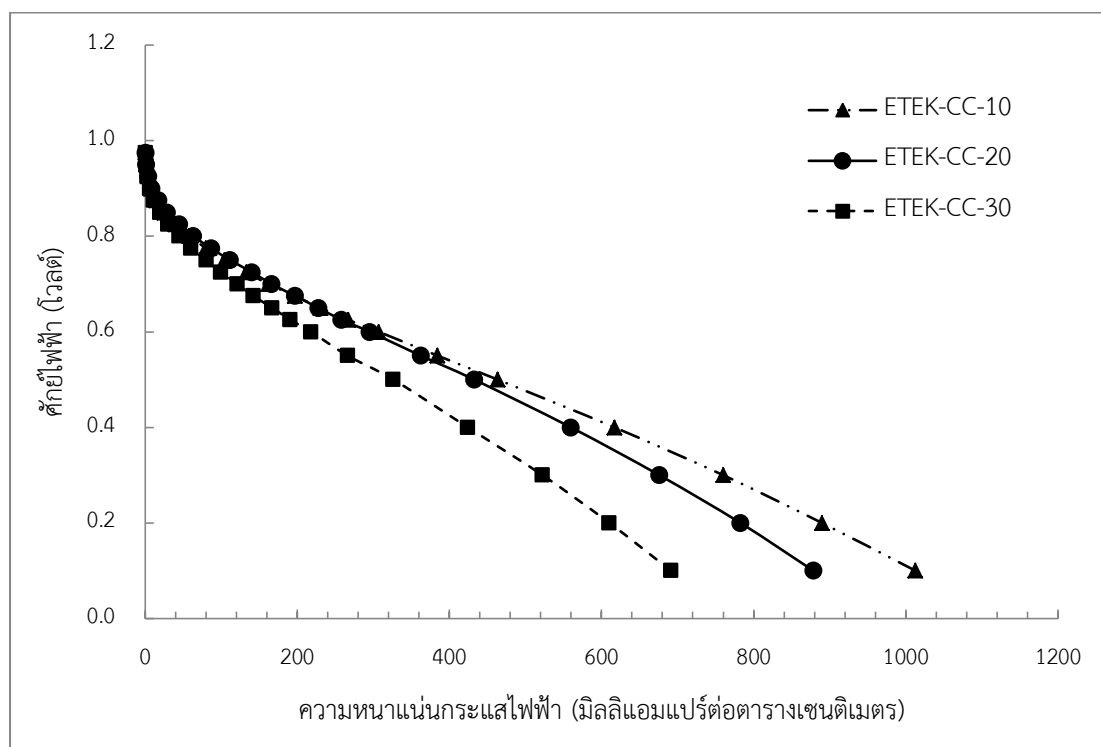
สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนชั้นแพร่แก๊สที่มีองค์ประกอบของ PTFE ในปริมาณที่ต่างกันนั้นมีผลต่อขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางที่ 4.8) พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง โดยชั้นแพร่แก๊สที่มี PTFE เป็นองค์ประกอบ 10% โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดและมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่มากที่สุดคือ 228.6 ตารางเมตรต่อกรัมตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อปริมาณ PTFE เพิ่มขึ้นจาก 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มที่ใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาลดลงเป็น 217.5 และ 148.4 ตารางเมตรต่อกรัมตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 5000) แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร์แก๊ส : (ก) ETEK-CC-10; (ข) ETEK-CC-20; (ค) ETEK-CC-30

ลักษณะวิทยาและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนบนชั้นแพร์แก๊สที่มีปริมาณ PTFE ที่ต่างกัน ยังส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าของชั้นแพร์แก๊สที่มีปริมาณ PTFE 30% ให้สมรรถนะที่ต่ำกว่าชั้นแพร์แก๊สชนิดอื่น โดยต่างกันในช่วงโพลาริเซชันทางเคมี ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการรวมตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาต่ำและมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนที่ต่ำ (8.35×10^{-8} แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ส่งผลให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำด้วย เมื่อพิจารณาชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-10 และ ETEK-CC-20 ที่มีปริมาณ PTFE 10 และ 20% ตามลำดับ พบว่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากโพลาริเซชันทางเคมีนั้นใกล้เคียงกัน แต่พบว่าความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่มี PTFE เป็นองค์ประกอบ 10% มากกว่าขั้วไฟฟ้าที่มี PTFE เป็นองค์ประกอบ 20% (ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนมีค่า 9.77×10^{-7} และ 2.86×10^{-7} แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ) และแตกต่างกันในช่วงของการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิกเล็กน้อย โดยที่เมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณ PTFE 20% นั้นมีสมรรถนะที่ต่ำกว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณ PTFE 10% ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานของชั้นแพร์แก๊ส

ETEK-CC-20 มีค่า 24.4 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-10 มีค่า 15.9 มิลลิโอมตารางเซนติเมตรนั่นเอง เนื่องจาก PTFE เป็นสารที่มีความต้านทานไฟฟ้า เมื่อปริมาณ PTFE เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นแพร์แก๊สมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊สที่มีปริมาณ PTFE เป็นองค์ประกอบที่ต่างกัน

4.2.4 ผลของชั้นไมโครพอร์สต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

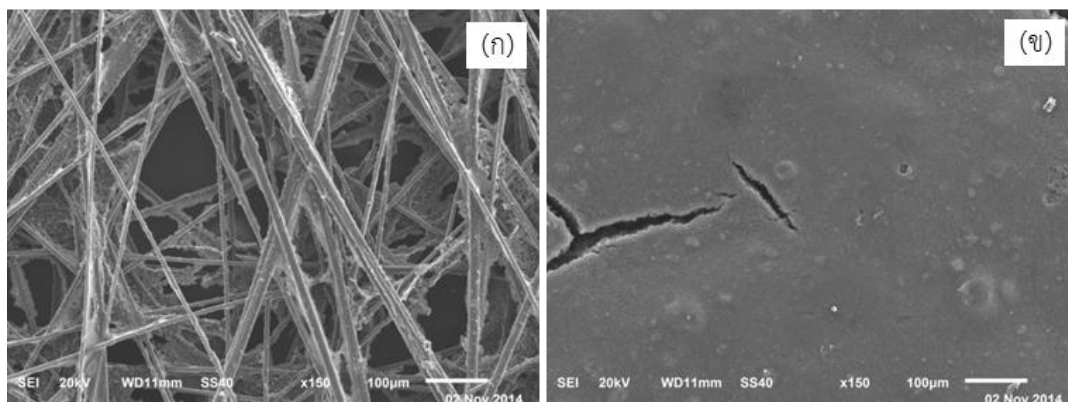
ชั้นแพร์แก๊สที่นำมาศึกษาถึงผลของชั้นไมโครพอร์สต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม คือ ชั้นแพร์แก๊สชนิดกระดาษคาร์บอนของบริษัท Sigracet ประกอบด้วย SGL-CP-5 และ SGL-CP-5-MPL-A โดยชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A ทางผู้ผลิตได้ทำการเคลือบชั้นไมโครพอร์สที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบไว้แล้ว โดยมีปริมาณ PTFE เท่ากันมีค่าเท่ากับ 5% พบว่าชั้นแพร์แก๊สทั้งสองมีความหนาที่แตกต่างกันโดยชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5 และ SGL-CP-5-MPL-A มีความหนาเท่ากับ 0.23 และ 0.32 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A นี้จะมาจากชั้นไมโครพอร์สนั่นเอง และทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของชั้นแพร์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 18.2 เป็น 24.4 มิลลิโอมตารางเซนติเมตรตามลำดับ หลังจากทำการเตรียมชั้นย่อยทั้งสองชั้น ประกอบด้วยชั้นไมโครพอร์สและชั้นขบน้ำและทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ได้นำขั้วไฟฟ้าที่ได้มาวิเคราะห์พบว่าน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A ที่มีชั้นไมโครพอร์สแล้วนั้นมีค่าเท่ากับ 0.23 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5 มี

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดคือ 0.10 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 และ SGL-CP-5-MPL-A

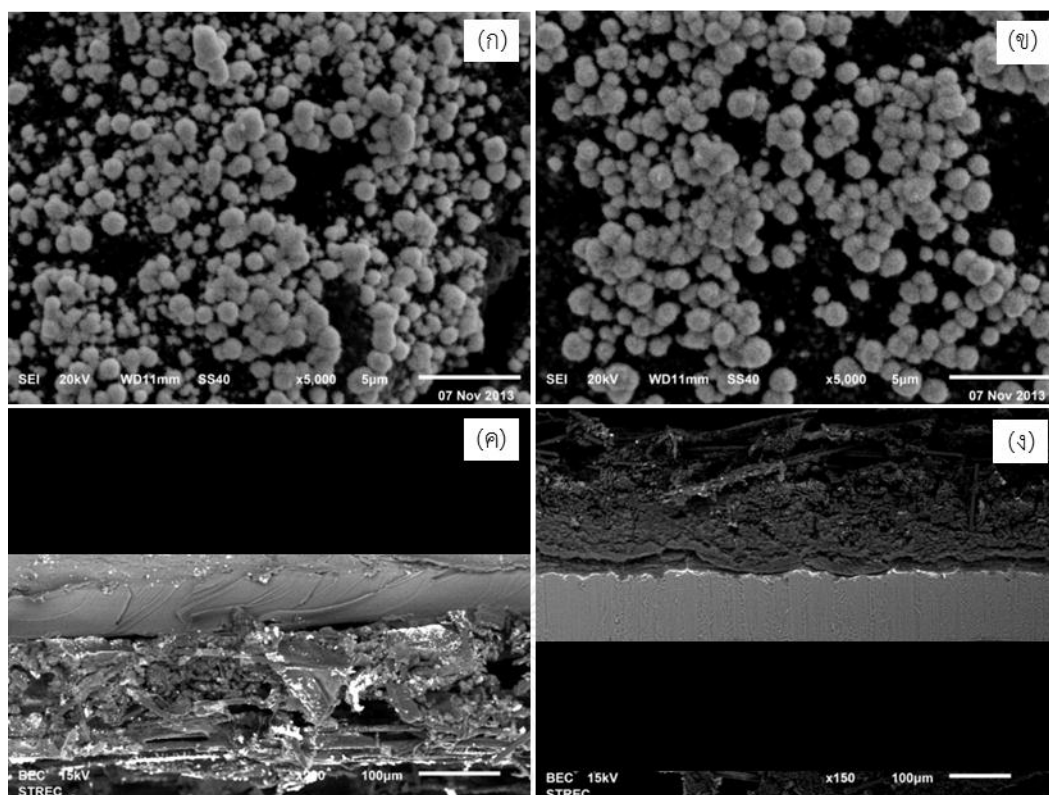
ชื่อย่อ	SGL-CP-5	SGL-CP-5-MPL-A
ปริมาณ PTFE (%)	5	5
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.17	0.23
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20	0.43
มุมสัมผัส (องศา)	144.65	146.80
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโอม์ตารางเซนติเมตร)	18.2	24.4
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.10	0.23
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	200.4	176.9
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	112.4	218.8

สัณฐานวิทยาของชั้นแพร่แก๊สแสดงด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.18 จากภาพถ่ายไมโครกราฟแสดงให้เห็นว่าชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 (รูปที่ 4.18 (ก)) แสดงโครงสร้างของเส้นใยคาร์บอนเนื่องจากไม่มีการเคลือบชั้นไมโครพอร์สและพบว่ามีช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนสูงจึงเกิดเป็นรูขนาดใหญ่ ส่วนชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A (รูปที่ 4.18 (ข)) ทางผู้ผลิตได้ทำการเคลือบชั้นไมโครพอร์สบนผิวหน้ามาแล้ว จึงไม่เห็นโครงสร้างของเส้นใยคาร์บอนและพบว่าผิวหน้าของชั้นแพร่แก๊สมีความเรียบและมีลักษณะแน่น ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวน่าจะส่งผลต่อขั้นตอนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า ทำให้ชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A เนื่องจากชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 มีลักษณะบาง ช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนสูงทำให้เกิดรูขนาดใหญ่และชั้นแพร่แก๊สชนิดนี้ไม่มีการเคลือบชั้นไมโครพอร์ส ดังนั้นในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกระจายตัวเข้าไปภายในเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 150) แสดงลักษณะของชั้นแพร์แก๊ส: (ก) SGL-CP-5; (ข) SGL-CP-5-MPL-A

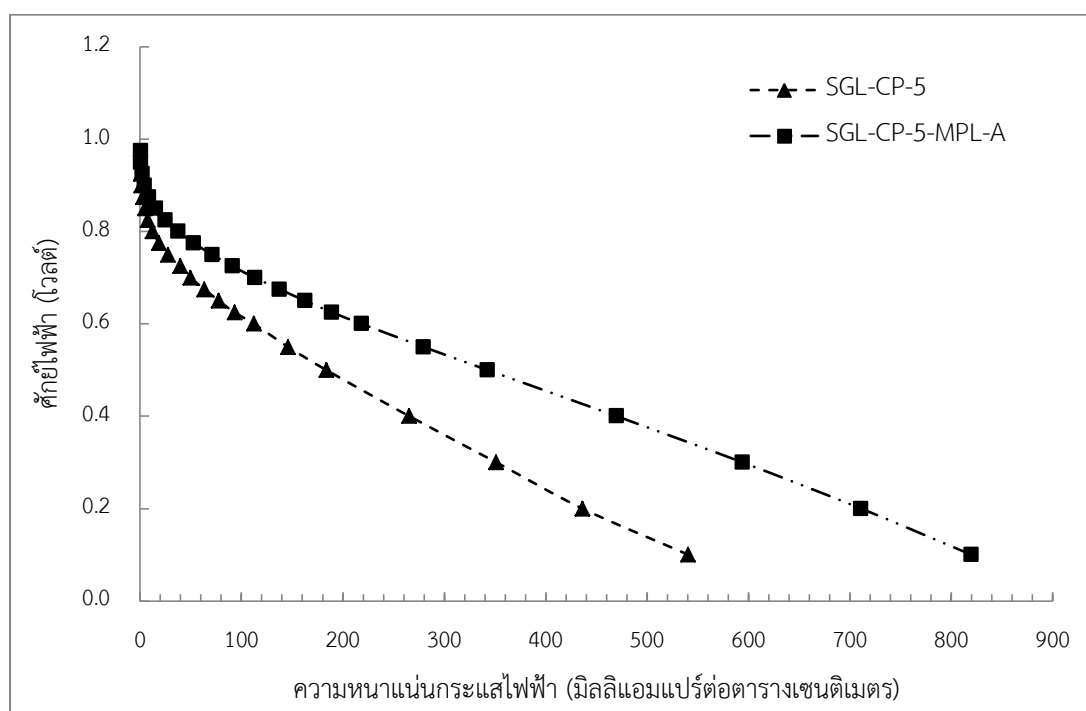
ลักษณะวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าแสดงด้วยภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.19 จากภาพถ่ายไมโครกราฟแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่พอกพูนบนชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A (รูปที่ 4.19 (ข)) ซึ่งเป็นชั้นแพร์แก๊สที่มีชั้นไมโครพอร์สอยู่แล้วนั้น มีลักษณะการกระจายตัวและความสม่ำเสมอ โดยพบว่าอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนมีการซ้อนทับกัน ซึ่งแตกต่างกับขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5 (รูปที่ 4.19 (ก)) ที่มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่หนาแน่นใกล้เคียงกัน โดยมีการรวมตัวในขนาดที่เล็กกว่า ขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5-MPL-A (รูปที่ 4.19 (ข)) เล็กน้อย ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า



รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า (X 5000): (ก) SGL-CP-5; (ข) SGL-CP-5-MPL-A; ลักษณะของภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า (X 150): (ค) SGL-CP-5; (ง) SGL-CP-5-MPL-A

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าทั้งสองชนิดมาประกอบกับเมมเบรนและนำไปทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่างกันในช่วงการสูญเสียโพลาร์ไรเซชันทางเคมี ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร่แก๊สทั้งสองกลุ่มที่มีค่าแตกต่างกันนั่นเองโดยชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 และ SGL-CP-5-MPL-A มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.10 และ 0.23 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาร่วมกับภาพตัดขวางของขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ค) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนมีการกระจายตัวลงมากตามรูพรุนขนาดใหญ่และชั้นแพร่แก๊สเกิดการเสียหายเมื่อนำมาประกอบกับเมมเบรน โดยสังเกตได้ว่าชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 ด้านล่างเกิดการแยกตัวระหว่างเส้นใยคาร์บอนออกจากกัน จึงเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างเส้นใยคาร์บอนขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 มีความหนาคือ 0.17 มิลลิเมตร นอกจากนั้นยังมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับชั้นแพร่แก๊สชนิดอื่น อีกทั้งเมื่อพิจารณาภาพถ่ายไมโครกราฟของชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) พบว่าชั้นแพร่แก๊สนี้มีรูพรุนขนาดใหญ่ เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนสูง ส่งผลให้ชั้นแพร่แก๊สนี้มีความแข็งแรงต่ำ [29] เมื่อนำไปประกอบ

กับเมมเบรนโดยใช้ความร้อนและความดันสูง จึงทำให้เส้นใยคาร์บอนขาดออกจากกันและเกิดความเสียหายกับโครงสร้างของชั้นแพร์แก๊สที่เป็นตัวรองรับทางกายภาพและเป็นตัวกระจายแก๊สให้มีความสม่ำเสมอ สมบัติเหล่านี้จึงหมดไป โดยค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5 มีค่าต่ำมากคือ 112.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ถึงแม้ว่าจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูงก็ตาม ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5-MPL-A มีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 218.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊สบริษัท Sigracet ที่มีความหนาแน่นต่างกัน

4.2.5 ผลของชั้นย่อยบนชั้นไมโครพอร์สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

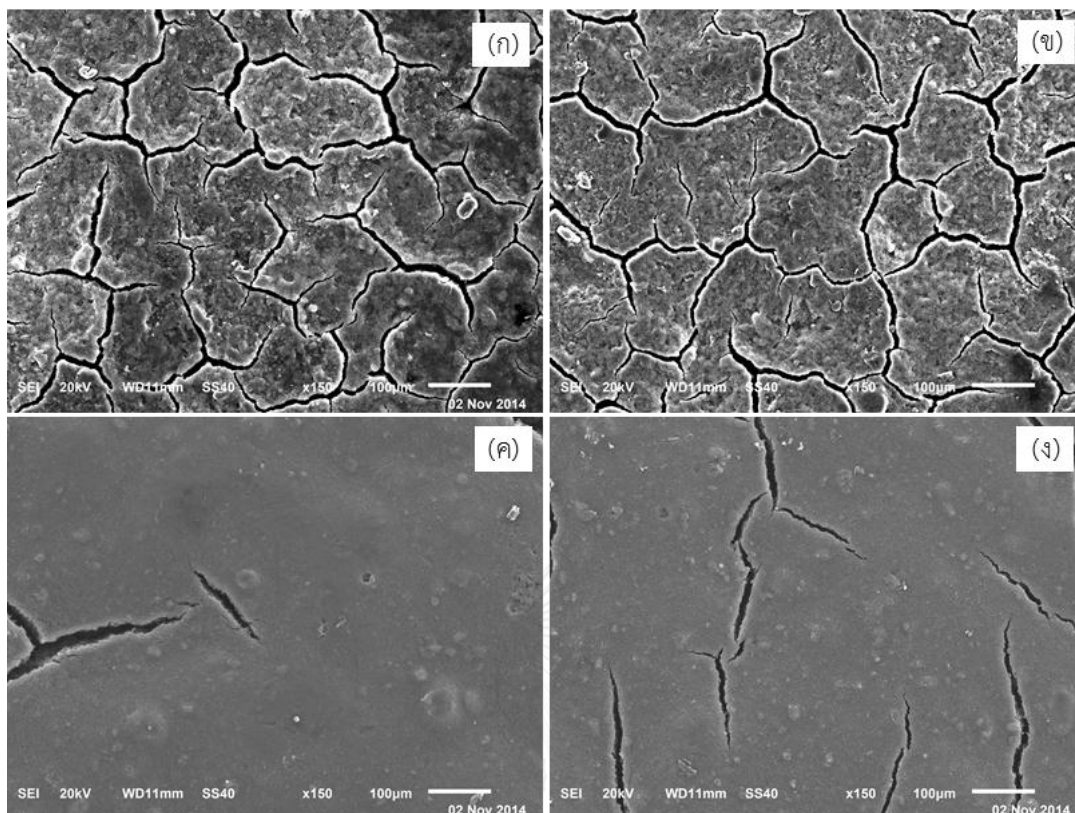
ชั้นแพร์แก๊สที่นำมาศึกษาผลของชั้นย่อยบนชั้นไมโครพอร์สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างที่ 1 คือชั้นแพร์แก๊สของบริษัท Sigracet (SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B) กลุ่มตัวอย่างที่ 2 คือชั้นแพร์แก๊สของบริษัท Etek (ETEK-CC-0-MPL และ ETEK-CP-0-MPL)

โดยที่ชั้นแพร์แก๊สจากทางผู้ผลิตทั้ง 2 กลุ่มตัวอย่างนี้ ได้ทำการเคลือบชั้นไมโครพอร์สที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาแล้ว โดยการทดลองในส่วนนี้มาจากสมมติฐานที่ว่าชั้นไมโครพอร์สซึ่งมีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่แล้ว การเพิ่มชั้นย่อยชั้นที่ 1 ซึ่งเป็นในส่วนของชั้นไมชอบน้ำซึ่งมีผง

คาร์บอนเป็นองค์ประกอบลงไปเพิ่มอาจไม่มีความจำเป็น ดังนั้นจึงทำการทดลอง โดยทำการแบ่งการทดลองในแต่ละกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 แบบคือ

- แบบที่ 1 ทำการเตรียมชั้นย่อยทั้ง 2 ชั้น (ชั้นไม่ชอบน้ำและชั้นชอบน้ำ) ลงบนชั้นแพร์แก๊สทั้ง 2 บริษัท โดยชั้นไม่ชอบน้ำที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบและชั้นชอบน้ำที่มีสารละลายเนฟิออนเป็นองค์ประกอบ จากนั้นทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (ตามวิธีในหัวข้อ 3.6.6) โดยจะใช้ชื่อย่อเดียวกับชั้นแพร์แก๊สที่นำมาใช้เพียงแต่ทำการเติมสัญลักษณ์ 2s ต่อท้าย
- แบบที่ 2 ทำการเตรียมชั้นย่อยเพียงชั้นเดียวคือชั้นชอบน้ำที่มีสารละลายเนฟิออนเป็นองค์ประกอบ (โดยไม่เติมชั้นไม่ชอบน้ำเพิ่ม) เนื่องจากชั้นแพร์แก๊สทั้งสองชนิดนี้มีชั้นไมโครพอร์สที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่แล้ว เพื่อทดสอบสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าชั้นไมโครพอร์สที่เคลือบอยู่แล้วนี้ คือชั้นไม่ชอบน้ำเนื่องจากมีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่เหมือนกัน จึงไม่น่าจะมีความจำเป็นที่จะต้องเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำเพิ่ม จากนั้นทำการเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (ตามวิธีในหัวข้อ 3.6.6) โดยจะใช้ชื่อย่อเดียวกับชั้นแพร์แก๊สที่นำมาใช้เพียงแต่ทำการเติมสัญลักษณ์ 1s ต่อท้าย

กลุ่มตัวอย่างที่ 1 คือชั้นแพร์แก๊สประเภทกระดาษคาร์บอนจากบริษัท Sigracet ประกอบด้วยชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A และ SGL-CP-5-MPL-B โดยมีปริมาณ PTFE เท่ากับ 5% ชั้นแพร์แก๊สทั้งสองต่างกันที่ความหนา (0.23 และ 0.27 มิลลิเมตรตามลำดับ) หลังจากทำการเตรียมชั้นแพร์แก๊สทั้ง 2 แบบดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จากนั้นทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของชั้นแพร์แก๊สทั้ง 2 แบบ เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายไมโครกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าชั้นแพร์แก๊สในแบบที่ 2 ที่ไม่ได้มีการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำเพิ่ม (SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยลักษณะของผิวหน้าของชั้นแพร์แก๊สทั้ง 2 มีความเรียบมากกว่าชั้นแพร์แก๊สในแบบที่ 1 ที่มีการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำซึ่งมีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเพิ่มเข้าไป (SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 150) แสดงลักษณะของชั้นแพร์แก๊ส: (ก) SGL-CP-5-MPL-A-2s; (ข) SGL-CP-5-MPL-B-2s; (ค) SGL-CP-5-MPL-A-1s; (ง) SGL-CP-5-MPL-B-1s

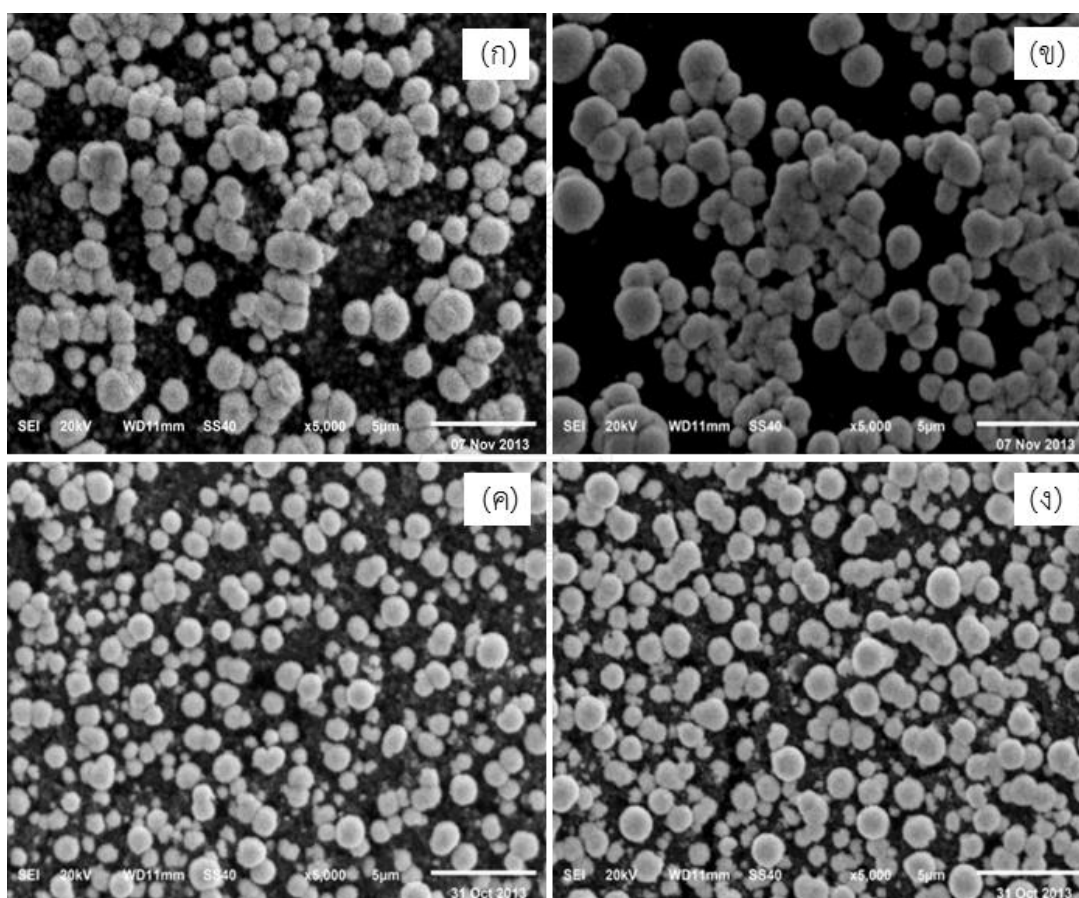
หลังจากทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำลงบนชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s แล้ว นำขั้วไฟฟ้าทั้งสองมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเช่น ความหนา, ความหนาแน่น, มุมสัมผัส และความต้านทานไฟฟ้า พบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีการเตรียมแบบที่ 1 (SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s) มีความหนาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากในกลุ่มตัวอย่างนี้ได้ทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเพิ่ม เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่มีการเตรียมแบบที่ 2 (SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s) เนื่องจากขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 นั้นได้ทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ทำให้ความหนาของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0.23 เป็น 0.27 และ 0.32 เป็น 0.36 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งความหนาของขั้วไฟฟ้านั้นยังส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมี PTFE เป็นองค์ประกอบในชั้นนี้ นอกจากนั้นยังพบว่าค่ามุมสัมผัสของชั้นแพร์แก๊สที่ทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำเพิ่มนั้นมีค่าที่สูงขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกัน แต่พบว่าค่าความหนาแน่นของขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A-2s, SGL-CP-5-MPL-A-1s, SGL-CP-5-MPL-B-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s

ชื่อย่อ	SGL-CP-5-MPL-A-2s	SGL-CP-5-MPL-A-1s	SGL-CP-5-MPL-B-2s	SGL-CP-5-MPL-B-1s
ปริมาณ PTFE (%)	5	5	5	5
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.27	0.23	0.36	0.32
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.43	0.51	0.44	0.50
มุมสัมผัส (องศา)	152.75	146.80	147.89	142.79
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	149.2	24.4	189.2	36.4
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.23	0.18	0.24	0.13
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	176.9	210.9	158.3	202.0
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	218.8	261.2	195.3	214.2

หลังจากนำขั้วไฟฟ้าเหล่านี้ไปพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธี 3.6.6 แล้ว และนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าพบว่าชั้นแพร์แก๊สที่มีการเตรียมแบบที่ 2 (ไม่มีชั้นไม่ชอบน้ำ) มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าต่ำกว่า (0.18 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรสำหรับ SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s ตามลำดับ) ชั้นแพร์แก๊สที่มีการเตรียมแบบที่ 1 (มีชั้นย่อยทั้ง 2 ชั้นคือชั้นไม่ชอบน้ำและชั้นชอบน้ำ) (0.23 และ 0.24 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรสำหรับ SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s ตามลำดับ) เมื่อพิจารณาภาพถ่ายไมโครกราฟพบว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5-MPL-A-1s (รูปที่ 4.22 (ค)) และ SGL-CP-5-MPL-B-1s (รูปที่ 4.22 (ง)) มีการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5-MPL-A-2s (รูปที่ 4.22 (ก)) และ SGL-CP-5-MPL-B-2s (รูปที่ 4.22 (ข)) ซึ่งมีการเกาะกลุ่มและรวมตัวกันที่มากกว่าของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่ขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีอนุภาคที่เล็กกว่าและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า (210.9 และ 202.0 ตารางเมตรต่อกรัมสำหรับ SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s

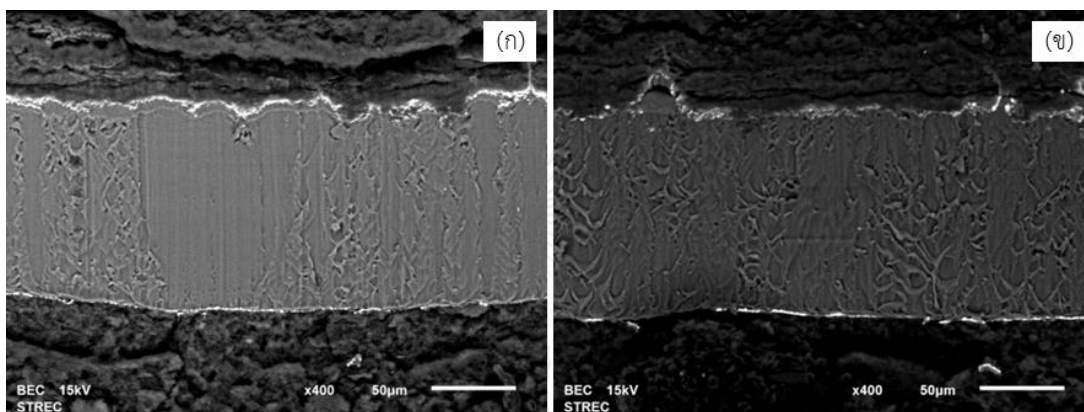
ตามลำดับ) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ที่มีการรวมตัวกันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า (176.9 และ 158.3 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับ SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s ตามลำดับ) นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (รูปที่ 4.23 (ก) และ (ข) ด้านล่าง) มีพื้นที่ผิวที่เรียบ มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าที่ทั่วถึงและสม่ำเสมอมากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (รูปที่ 4.23 (ก) และ (ข) ด้านบน) โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวลงไปตามชั้นไม่ชอบน้ำเล็กน้อย



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 5000) แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร่แก๊ส: (ก) SGL-CP-5-MPL-A-2s; (ข) SGL-CP-5-MPL-B-2s; (ค) SGL-CP-5-MPL-A-1s; (ง) SGL-CP-5-MPL-B-1s

นอกจากนี้จากภาพถ่ายไมโครกราฟยังพบว่าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ของขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s) มีความหนาแน่นมากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งพบว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (0.23

และ 0.24 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรสำหรับ SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s ตามลำดับ) ซึ่งมากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (0.18 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรสำหรับ SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s ตามลำดับ) และเมื่อพิจารณาร่วมกับภาพถ่ายไมโครกราฟแสดงสัญญาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่ามีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สม่ำเสมอและมีการซ้อนทับกันของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อย

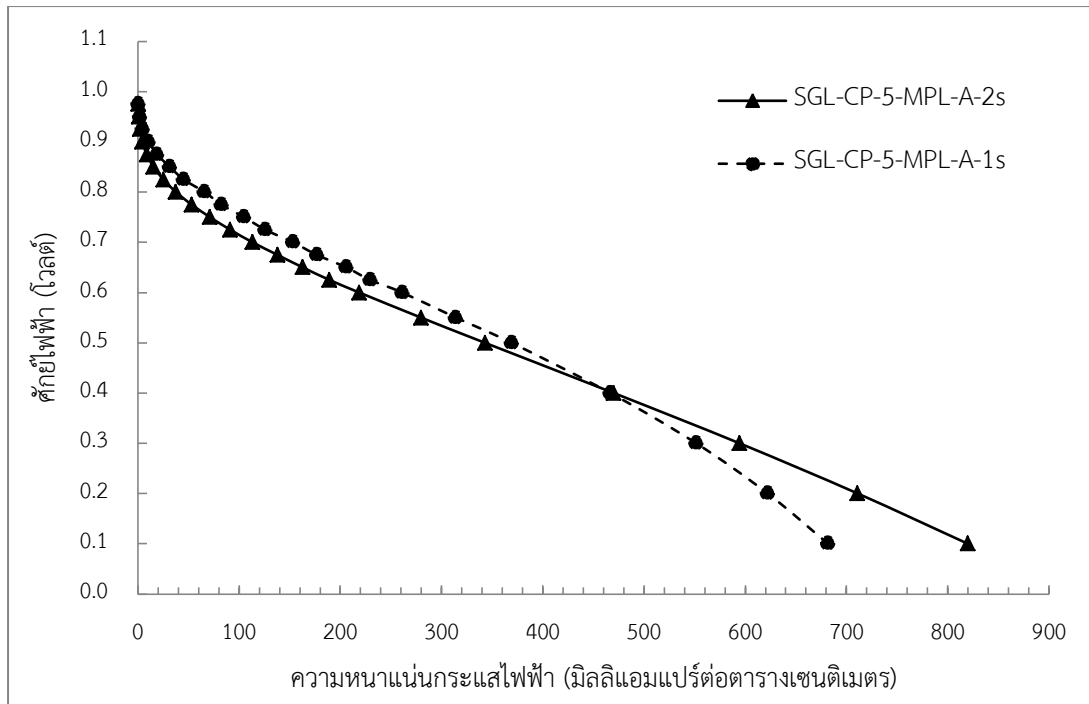


รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 400) แสดงสัญญาณของภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า: (ก) SGL-CP-5-MPL-A-2s (ด้านบน) และ SGL-CP-5-MPL-A-1s (ด้านล่าง); (ข) SGL-CP-5-MPL-B-2s (ด้านบน) และ SGL-CP-5-MPL-B-1s (ด้านล่าง)

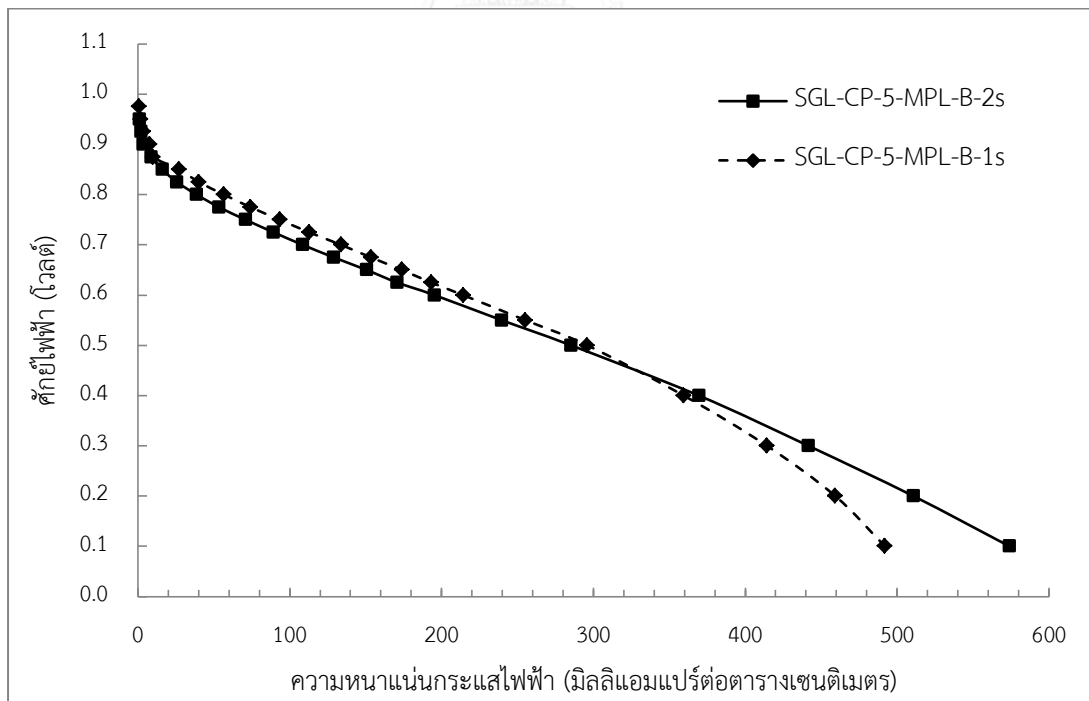
เมื่อนำชั้นแพร่แก๊สทั้ง 4 ชนิดมาประกบอัดกับเมมเบรนได้เป็นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าและนำไปทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 พบว่าในช่วงของการสูญเสียโพลาริเซชันทางเคมีของขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ไม่ต่างกันมากนัก แต่พบว่าสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 แบบแตกต่างกันในช่วงของการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิกเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำพบว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s) มีค่าความต้านทานไฟฟ้า (149.2 และ 189.2 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตรตามลำดับ) มากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s มีค่าเท่ากับ 24.4 และ 36.4 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตรตามลำดับ) ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ทั้งนี้เนื่องจากในขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ได้มีการเติมชั้นไม่ชอบน้ำซึ่งมีผงคาร์บอนและ PTFE เพิ่ม ทำให้ความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าที่สูงขึ้นนั่นเอง ค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 ที่ไม่ได้ทำการเติมชั้นไม่ชอบน้ำที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเพิ่มนั้น มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (261.2 และ 214.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ) ที่ใกล้เคียงกับขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ที่ทำการเติมชั้นไม่ชอบน้ำเพิ่ม (218.8 และ 195.3 มิลลิแอมแปร์ต่อ

ตารางเซนติเมตรตามลำดับ) ดังแสดงในตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณาจากกราฟโพลาริเซชัน พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 มีสมรรถนะที่ดีกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 โดยต่างกันในช่วงของการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากโพลาริเซชันของความเข้มข้น

จากรูปที่ 4.21 เมื่อทำการพิจารณาภาพถ่ายไมโครกราฟแสดงสัญญาณของชั้นแพร่แก๊ส พบว่าชั้นแพร่แก๊สทั้ง 4 ชนิดมีโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกัน ต่างกันที่ความเรียบของผิวหน้าของชั้นแพร่แก๊ส โดยขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s) มีผิวหน้าที่เรียกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s) ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 แบบมีลักษณะต่างกันเล็กน้อย โดยขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีการจัดเรียงตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่รวมเป็นกลุ่มก้อนน้อยกว่า แต่ไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมากนัก โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน (218.8, 195.3, 261.2 และ 214.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ดังแสดงในตารางที่ 4.10 แต่เมื่อพิจารณาถึงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากค่าพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับการใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (กำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อปริมาณแพลทินัมที่พอกพูนได้บนขั้วไฟฟ้า; P_{max}/Pt loading) จะมีค่าต่างกันมาก โดยพบว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s) พบว่ามีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาและค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อปริมาณแพลทินัมที่พอกพูนได้บนขั้วไฟฟ้า (176.9, 158.3 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับและ 0.82, 0.62 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-1s) พบว่ามีค่าน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด (210.9, 202.0 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับและ 1.05, 1.14 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีการใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 โดยพบว่าชั้นไมโครพอร์สช่วยลดความต้านทานในการสัมผัสกันระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและชั้นแพร่แก๊สโดยมีการจัดเรียงตัวที่เรียบและมีความสม่ำเสมอ การใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีสูง [13] ในส่วนของการจัดการน้ำในชั้นไมโครพอร์สทำหน้าที่คล้ายวาล์วที่ผลักน้ำออกจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังช่องทางการไหลของแก๊ส จึงช่วยทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดีขึ้น [13, 48] แต่ในกรณีที่มีปริมาณคาร์บอนในชั้นไมโครพอร์สสูงมากเกินไป จะทำให้ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามีความขรุขระมากกว่า ส่งผลให้ความต้านทานในการสัมผัสกันระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและชั้นแพร่แก๊สมีค่าสูงขึ้น นอกจากนั้นทำให้ปริมาณของรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เกิดน้ำท่วมเซลล์ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นเนื่องจากมีความต้านทานการไหลของน้ำในชั้นไมโครพอร์สมากขึ้นด้วย [49]



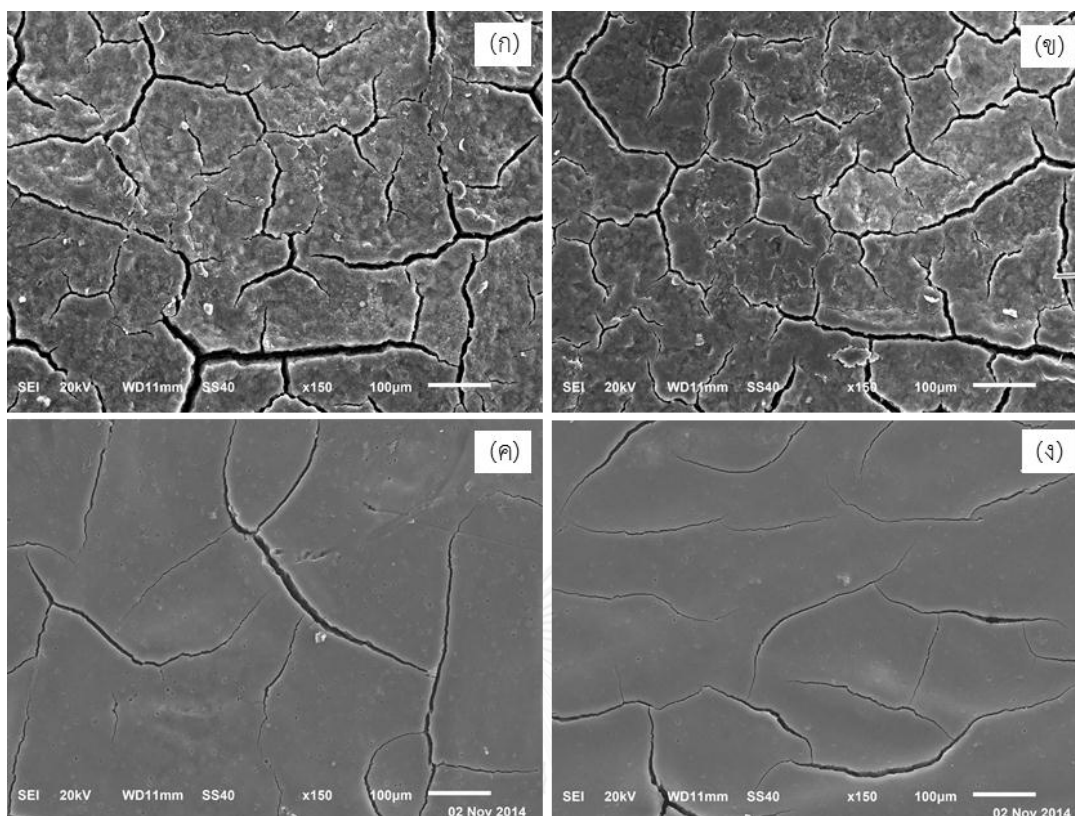
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-A-1s และ SGL-CP-5-MPL-A-2s



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊ส SGL-CP-5-MPL-B-1s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s

ชั้นแพร่แก๊สกลุ่มตัวอย่างที่ 2 ที่นำมาศึกษาผลของชั้นย่อยบนชั้นไมโครพอร์สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ประกอบด้วยฝ้ายคาร์บอนและกระดาษคาร์บอน จากบริษัท E-tek (Etek-CC-0-MPL และ Etek-CP-0-MPL) มีปริมาณ PTFE เท่ากับศูนย์ โดยที่ชั้นแพร่แก๊สทั้งสองทางผู้ผลิตได้ทำการเคลือบชั้นไมโครพอร์สที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาแล้ว โดยทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้นคือ แบบที่ 1 มีการเตรียมชั้นย่อยเพิ่มทั้ง 2 (ชั้นไม่ชอบน้ำและชั้นชอบน้ำ) และแบบที่ 2 มีการเตรียมชั้นย่อยเพิ่มอีกเพียง 1 ชั้นคือชั้นชอบน้ำ (ไม่ทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำ) โดยเติมสัญลักษณ์ 2s ต่อท้ายสำหรับขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (ชั้นย่อย 2 ชั้น) และเติมสัญลักษณ์ 1s ต่อท้ายสำหรับขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (ชั้นย่อย 1 ชั้น)

หลังจากทำการเตรียมชั้นแพร่แก๊สและแบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น 2 แบบดังที่กล่าวไว้เบื้องต้น จากนั้นทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของชั้นแพร่แก๊สทั้ง 2 แบบ เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายไมโครกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าชั้นแพร่แก๊สที่เตรียมแบบที่ 2 (ไม่ได้ทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำเพิ่ม) ซึ่งประกอบด้วยชั้นแพร่แก๊ส Etek-CC-0-MPL-1s และ Etek-CP-0-MPL-1s ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ค) และ (ง) ตามลำดับ มีลักษณะของผิวหน้าของชั้นแพร่แก๊สที่มีความเรียบมากกว่าชั้นแพร่แก๊สที่เตรียมแบบที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยชั้นแพร่แก๊ส Etek-CC-0-MPL-2s และ Etek-CP-0-MPL-2s ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งมีผลในลักษณะเดียวกับชั้นแพร่แก๊สของบริษัท Sigracet ดังที่พิจารณาแล้วข้างต้น



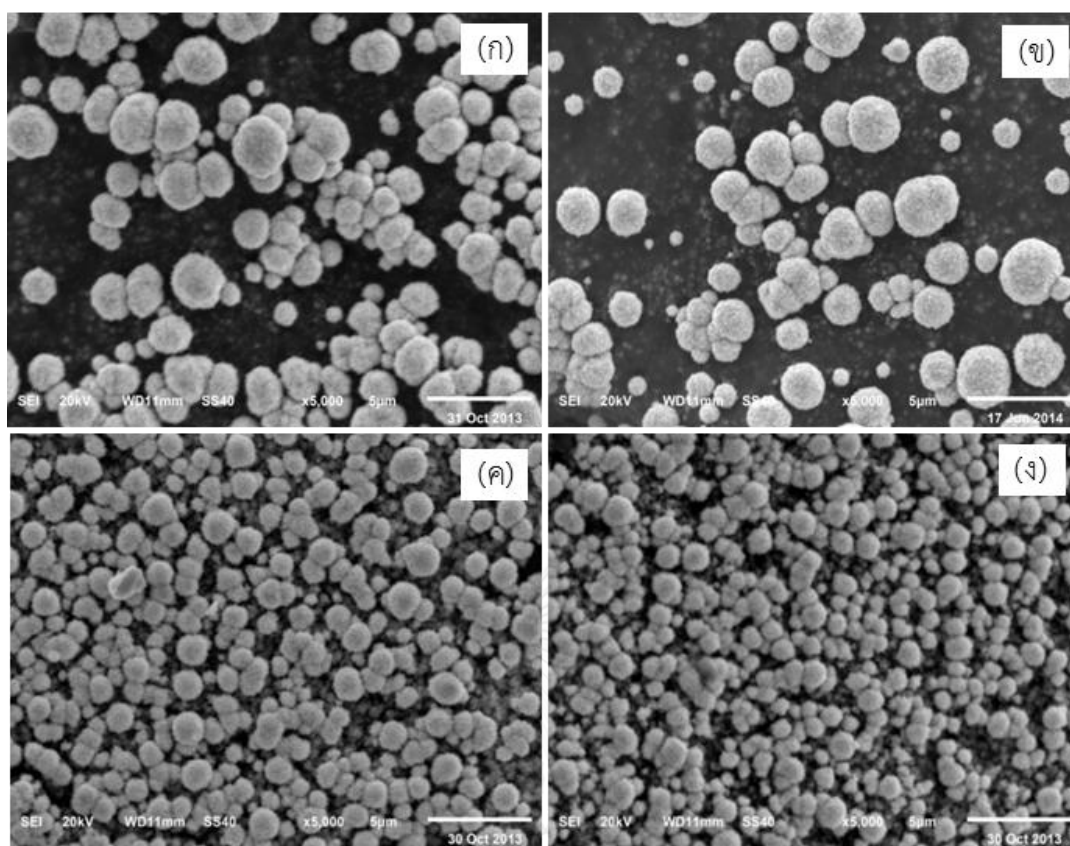
รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 150) แสดงลักษณะของชั้นแพร์แก๊ส: (ก) ETEK-CC-0-MPL-2s; (ข) ETEK-CP-0-MPL-2s; (ค) ETEK-CC-0-MPL-1s; (ง) ETEK-CP-0-MPL-1s

หลังจากทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำให้กับขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 แล้ว จึงนำขั้วไฟฟ้าทั้งหมดมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเช่น ความหนา, ความหนาแน่น, มุมสัมผัส และความต้านทานไฟฟ้า พบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีการเตรียมแบบที่ 1 (ETEK-CC-0-MPL-2s และ ETEK-CP-0-MPL-2s) มีความหนาที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s) เนื่องจากขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 นั้นได้ทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเพิ่ม ทำให้ความหนาของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0.28 เป็น 0.32 และ 0.17 เป็น 0.21 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งความหนาของขั้วไฟฟ้านั้นยังส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมี PTFE เป็นองค์ประกอบในชั้นนี้ นอกจากนั้นยังพบว่าค่ามุมสัมผัสของชั้นแพร์แก๊สที่ทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำเพิ่มนั้นมีค่าที่สูงขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกัน แต่พบว่าค่าความหนาแน่นของขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มเดียวกับชั้นแพร์แก๊สของบริษัท Sigracet ดังที่พิจารณาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-0-MPL-2s, ETEK-CC-0-MPL-1s, ETEK-CP-0-MPL-2s และ ETEK-CP-0-MPL-1s

ชื่อย่อ	ETEK-CC-0-MPL-2s	ETEK-CC-0-MPL-1s	ETEK-CP-0-MPL-2s	ETEK-CP-0-MPL-1s
ปริมาณ PTFE (%)	0	0	0	0
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.32	0.28	0.21	0.17
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.50	0.58	0.46	0.59
มุมสัมผัส (องศา)	154.23	138.84	152.48	121.96
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	103.7	14.3	131.6	17.6
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูน ได้(มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.25	0.14	0.22	0.14
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	124.3	274.6	68.6	284.0
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตาราง เซนติเมตร)	131.1	319.0	64.9	312.5

นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าพบว่าชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.14 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีแนวโน้มที่น้อยกว่าชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-0-MPL-2s และ ETEK-CP-0-MPL-2s โดยมีค่าเท่ากับ 0.25 และ 0.22 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพถ่ายไมโครกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าลักษณะการกระจายตัวและสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับชั้นแพร์แก๊สชนิดกระดาษคาร์บอนจากบริษัท Sigracet ที่ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้ โดยพบว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-0-MPL-1s (รูปที่ 4.27 (ค)) และ ETEK-CP-0-MPL-1s (รูปที่ 4.27 (ง)) มีการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-0-MPL-2s (รูปที่ 4.27 (ก)) และ ETEK-CP-0-MPL-2s (รูปที่ 4.27 (ข)) ซึ่งมีการเกาะกลุ่มและรวมตัวกันที่มากกว่าของตัวเร่งปฏิกิริยา

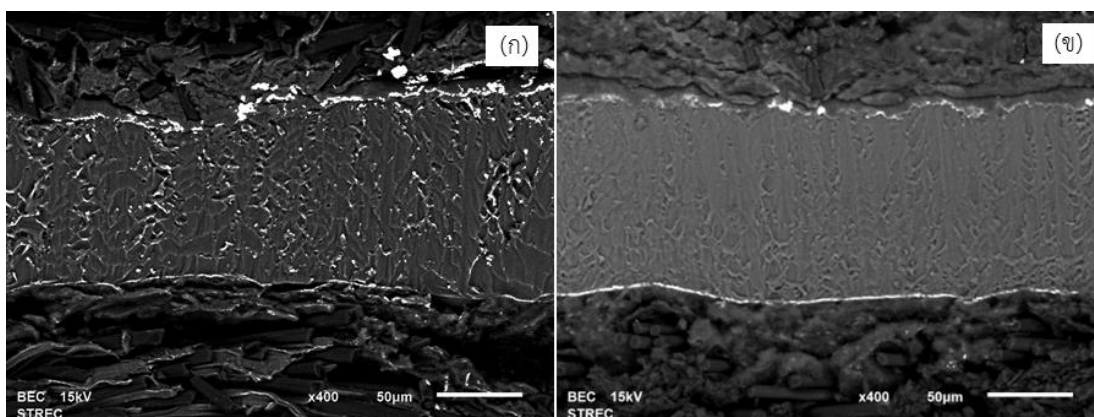


รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 5000) แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร่แก๊ส: (ก) ETEK-CC-0-MPL-2s; (ข) ETEK-CP-0-MPL-2s; (ค) ETEK-CC-0-MPL-1s, (ง) ETEK-CP-0-MPL-1s

พิจารณาการรวมตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนขั้วไฟฟ้าร่วมกับพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาพบว่า ขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s) มีขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่เล็กและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันและทั่วถึงมากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (ETEK-CC-0-MPL-2s และ ETEK-CP-0-MPL-2s) ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า (274.6 และ 284.0 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด (124.3 และ 68.6 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ) ถึงแม้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้จะมีค่ามากกว่าก็ตาม เมื่อทำการเปรียบเทียบภาพถ่ายไมโครกราฟแสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร่แก๊สของบริษัท Sigracet (รูปที่ 4.22) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะการกระจายตัวบนขั้วไฟฟ้าเป็นไปในแนวโน้มเดียวกับขั้วไฟฟ้าของบริษัท E-tek (รูปที่ 4.27) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 มีการรวมตัวและเกาะกันเป็นกลุ่มระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่กว่า และการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีลักษณะที่ไม่ทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 มีแนวโน้มในการรวมตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่

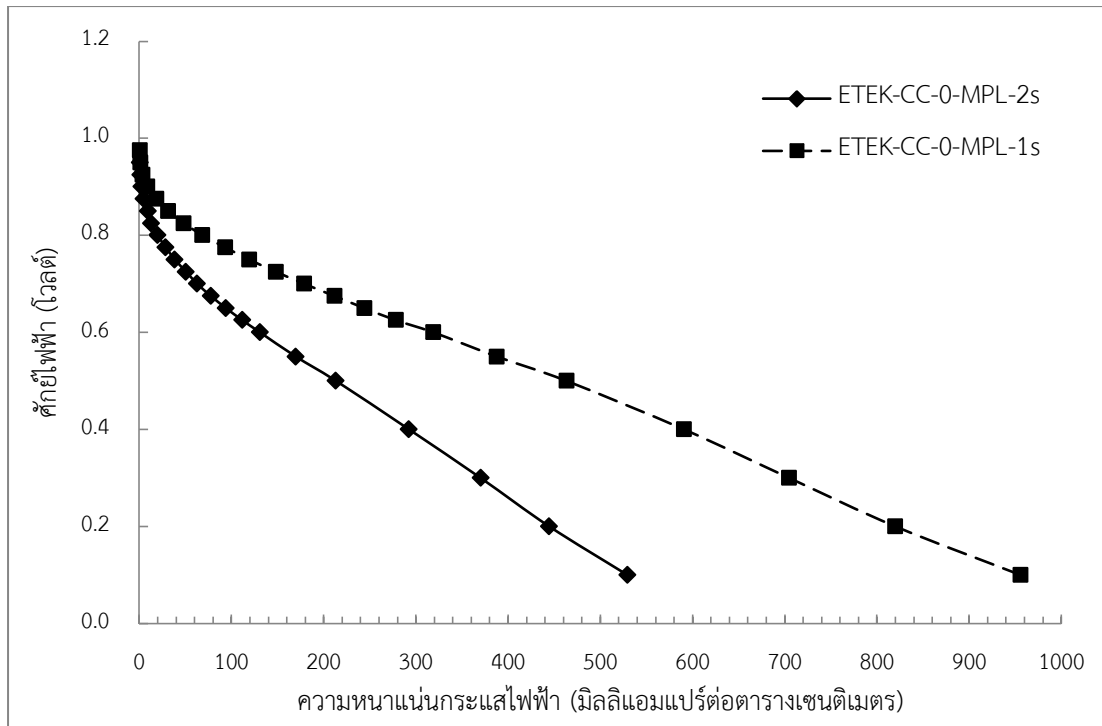
เล็กและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและทั่วทั้งพื้นผิวมากกว่า แต่เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ของทั้ง 2 บริษัทพบว่าขั้วไฟฟ้าของบริษัท E-tek (Etek-CC-0-MPL-2s และ Etek-CP-0-MPL-2s ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (ก) และ (ข) ตามลำดับ) มีการจับกลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่และความไม่สม่ำเสมอมากกว่า และมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าของบริษัท Sigracet (SGL-CP-5-MPL-A-2s และ SGL-CP-5-MPL-B-2s ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก) และ (ข) ตามลำดับ) ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงของขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ของบริษัท E-tek (124.3, 68.6 ตารางเมตรต่อกรัมและ 131.1, 64.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ) ต่างกับขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (274.6, 284.0 ตารางเมตรต่อกรัมและ 319.0, 312.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ) มากอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าของบริษัท Sigracet พบว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีค่าพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกันไม่ต่างกันมาก

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (รูปที่ 4.28 (ก) และ (ข) ด้านล่าง) มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอและเรียบมากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (รูปที่ 4.28 (ก) และ (ข) ด้านบน) โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่และมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมออย่างชัดเจนโดยมีการกระจายตัวลงไปตามขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพบลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกันของตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายไมโครกราฟแสดงสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร่แก๊ส Etek-CC-0-MPL-2s และ Etek-CP-0-MPL-2s (รูปที่ 4.28 (ก) และ (ข) ด้านบนตามลำดับ) โดยมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อย

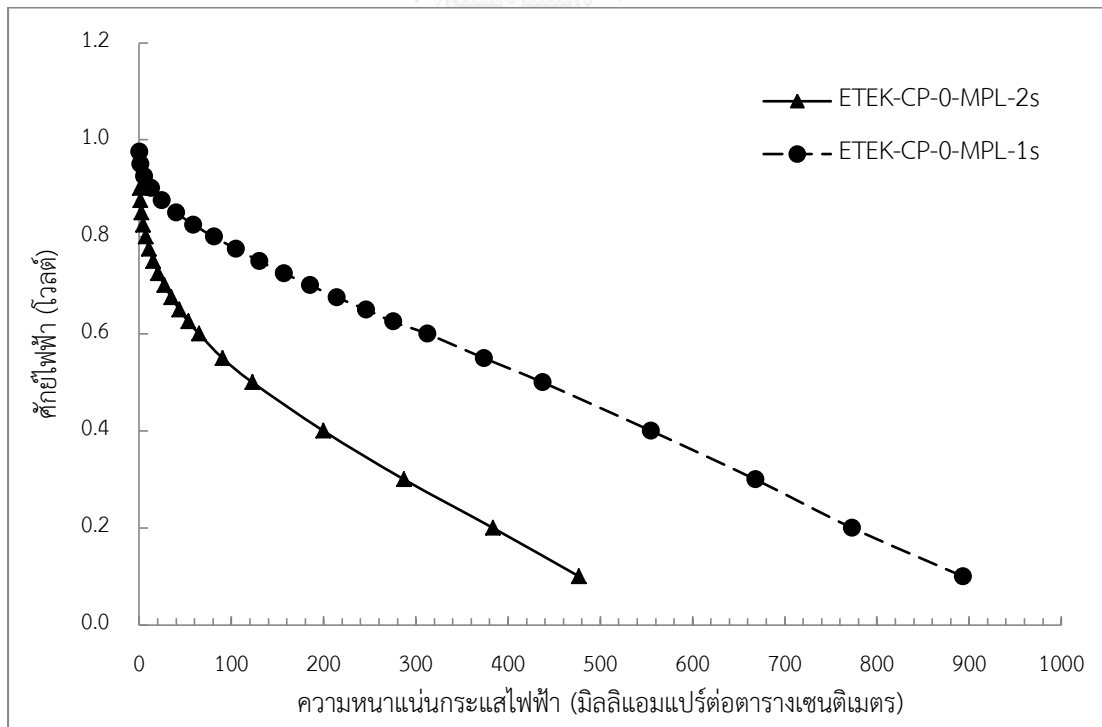


รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 400) แสดงสัญญาณของภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า: (ก) ETEK-CC-0-MPL-2s (ด้านบน) และ ETEK-CC-0-MPL-1s (ด้านล่าง); (ข) ETEK-CP-0-MPL-2s (ด้านบน) และ ETEK-CP-0-MPL-1s (ด้านล่าง)

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าทั้งสองชนิดมาประกบอัดกับเมมเบรนได้เป็นเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าและนำไปทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.29 และ 4.30 พบว่าสมรรถนะของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งสองกลุ่มมีสมรรถนะที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในช่วงของการสูญเสียโพลาริเซชันทางเคมี เนื่องจากสัญญาณวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 (ETEK-CC-0-MPL-2s และ ETEK-CP-0-MPL-2s) นั้นมีลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีการเกาะกลุ่มกันและขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ ต่างกันกับตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 (ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s) ที่มีลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสม่ำเสมอ ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า ทำให้มีสมรรถนะที่ดีกว่านั่นเอง โดยพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้าแบบที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s ที่ไม่ได้ทำการเติมชั้นไม่ชอบน้ำที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเพิ่มนั้น มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์มีค่าเท่ากับ 319.0 และ 312.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าขั้วไฟฟ้าแบบที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย ETEK-CC-0-MPL-2s และ ETEK-CP-0-MPL-2s โดยค่าความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์มีค่าเท่ากับ 131.1 และ 64.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ



รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CC-0-MPL-2s



รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-2s

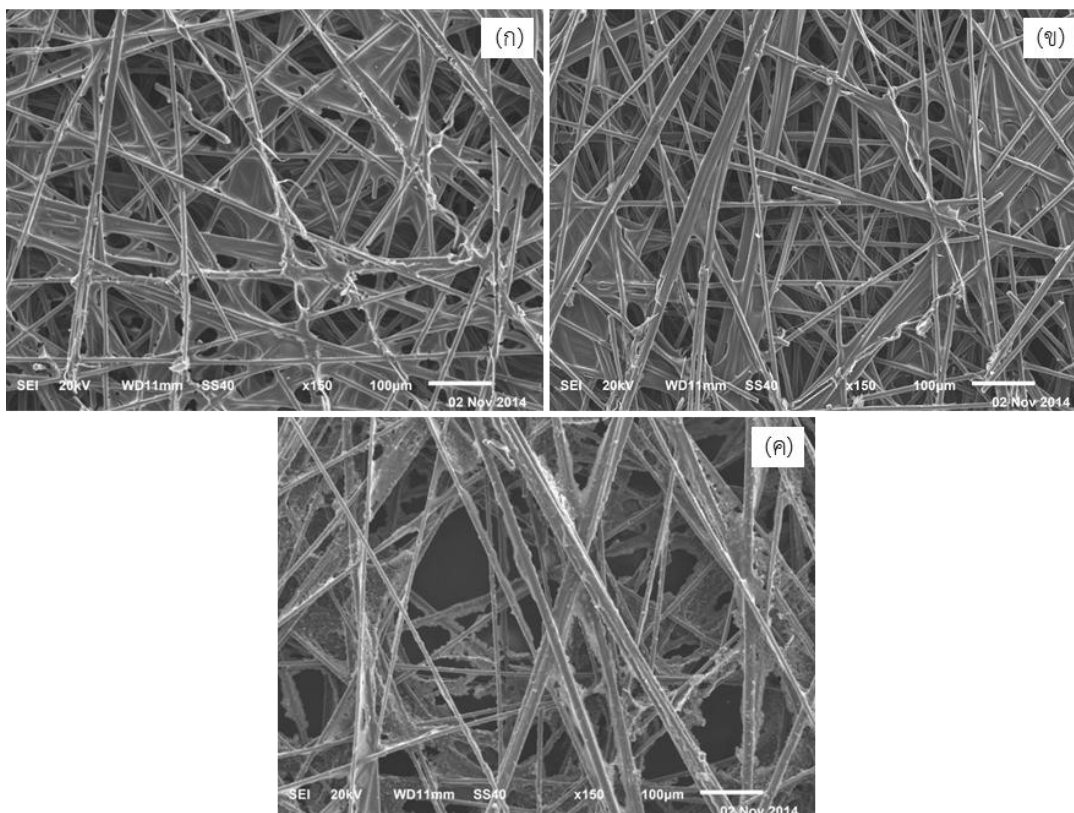
เมื่อพิจารณาข้อไฟฟ้าที่มีการเตรียมแบบที่ 2 (Etek-CC-0-MPL-1s และ Etek-CP-0-MPL-1s) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบนข้อไฟฟ้าทั้ง 2 มีการรวมตัวและการกระจายตัวที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.27 (ค) และ (ง)) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้มีค่าเท่ากัน ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งส่งผลให้กราฟโพลาริเซชันในช่วงการสูญเสียทางเคมีเท่ากัน และการที่ชั้นแพร่แก๊สของกลุ่มที่ 2 มีความต้านทานน้อยและมีค่าที่ต่างกันเล็กน้อย (14.3 และ 17.6 มิลลิโอม์ตารางเซนติเมตร) จึงส่งผลให้การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอมมิคของข้อไฟฟ้าทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกัน

4.3 สรุปผลของชนิดและสมบัติของชั้นแพร่แก๊สต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

ชั้นแพร่แก๊สมีส่วนสำคัญในด้านการจัดการน้ำในระบบโดยรักษาสมดุลของน้ำในเมมเบรนเป็นตัวรองรับทางกายภาพสำหรับเมมเบรนประกอบข้อไฟฟ้าและทำหน้าที่นำอิเล็กตรอนจากชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า เป็นต้น จึงกล่าวได้ว่าชั้นแพร่แก๊สส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีพอกพูนด้วยไฟฟ้า ชนิดและสมบัติของชั้นแพร่แก๊สมีความสำคัญต่อกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้าและการเกิดการสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นแพร่แก๊ส ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ นอกจากความสำคัญเบื้องต้นของชั้นแพร่แก๊สที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการรวบรวมชั้นแพร่แก๊สที่ทำการศึกษาผลของชั้นแพร่แก๊สต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมข้างต้นจำนวน 14 ชนิด เพื่อเป็นการสรุปผลการทดลองและวิเคราะห์สมบัติของชั้นแพร่แก๊สซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

4.3.1 ชั้นแพร่แก๊สที่ส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีสมรรถนะต่ำ

ชั้นแพร่แก๊สที่นำมาศึกษาถึงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในกลุ่มตัวอย่างนี้พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์มีค่าต่ำ คือชั้นแพร่แก๊สชนิดกระดาษคาร์บอนของบริษัท E-tek และ Sigracet ประกอบด้วยชั้นแพร่แก๊ส Etek-CP-SWP-A, Etek-CP-30 และ SGL-CP-5 โดยพบว่าชั้นแพร่แก๊ส Etek-CP-SWP-A และ Etek-CP-30 ที่มีความหนาเท่ากับ 0.09 มิลลิเมตร ซึ่งมีความหนาน้อยที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับชั้นแพร่แก๊สที่ศึกษาทั้งหมด 14 ชนิด ในขณะที่ชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 ที่มีความหนาเท่ากับ 0.17 มิลลิเมตร ซึ่งหนากว่าชั้นแพร่แก๊ส Etek-CP-SWP-A และ Etek-CP-30 แต่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นชั้นแพร่แก๊สที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดในบรรดาชั้นแพร่แก๊สทั้งหมด 14 ชนิด เมื่อพิจารณาภาพถ่ายไมโครกราฟของชั้นแพร่แก๊สทั้ง 3 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.31 พบว่าชั้นแพร่แก๊สทั้งสามชนิดนี้มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนสูง ส่งผลให้ชั้นแพร่แก๊สนี้มีความแข็งแรงต่ำ [29]

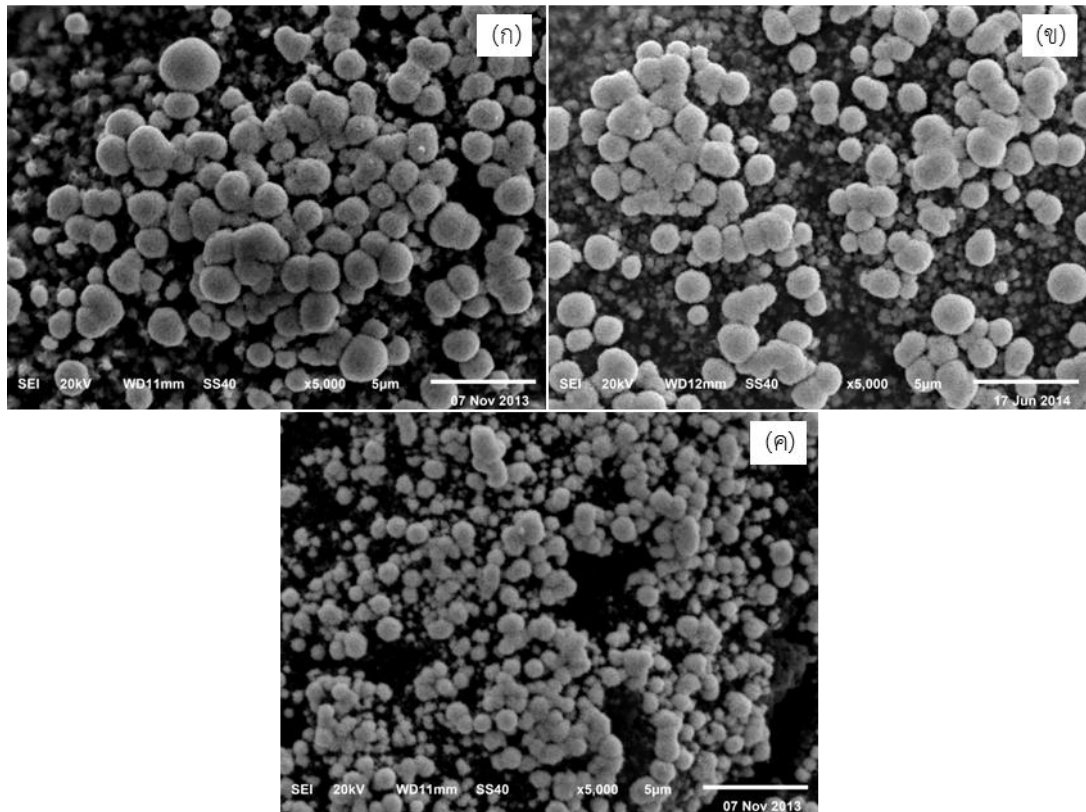


รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 150) แสดงลักษณะของชั้นแพร่แก๊ส: (ก) ETEK-CP-SWP-A; (ข) ETEK-CP-30; (ค) SGL-CP-5

และเมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้พบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-30 มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.17 และ 0.16 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ส่วนชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.10 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.12 โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 มีลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน คือมีการเกาะกลุ่มและเกิดการซ้อนทับกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (รูปที่ 4.32) ทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาต่ำ โดยพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A และ ETEK-CP-30 มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 155.4 และ 137.8 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ โดยขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-30 มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาต่ำที่สุดในกลุ่มตัวอย่างนี้เนื่องจากการรวมกลุ่มของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาค่อนข้างสูง สำหรับขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5 มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 200.4 ตารางเมตรต่อกรัม โดยมีค่าสูงที่สุดในกลุ่มตัวอย่างนี้ เนื่องจากการรวมกลุ่มของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดค่อนข้างเล็ก

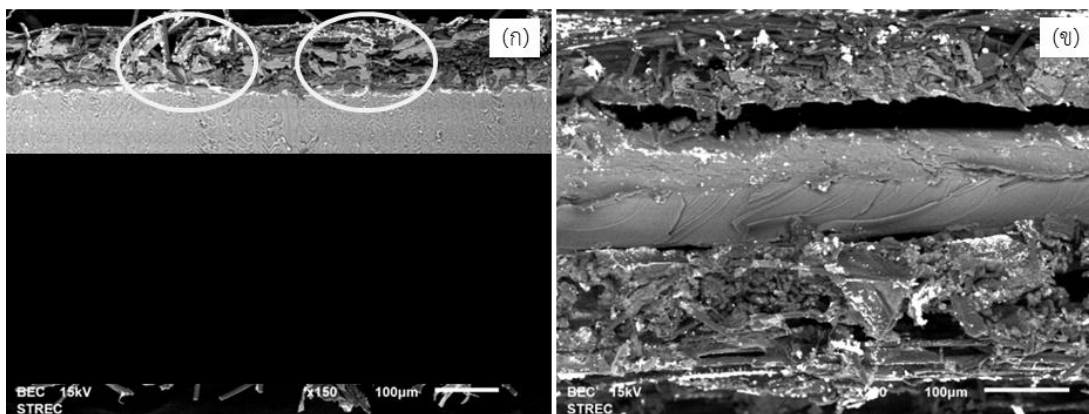
ตารางที่ 4.12 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร่แก๊ส ETEK-CP-SWP-A, ETEK-CP-30 และ SGL-CP-5

ชื่อย่อ	ETEK-CP-SWP-A	ETEK-CP-30	SGL-CP-5
ปริมาณ PTFE (%)	10-50	30	5
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.09	0.09	0.17
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.79	0.62	0.20
มุมสัมผัส (องศา)	145.97	144.36	144.65
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร)	15.9	16.9	18.2
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.17	0.16	0.10
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	155.4	137.8	200.4
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	149.9	99.1	112.4



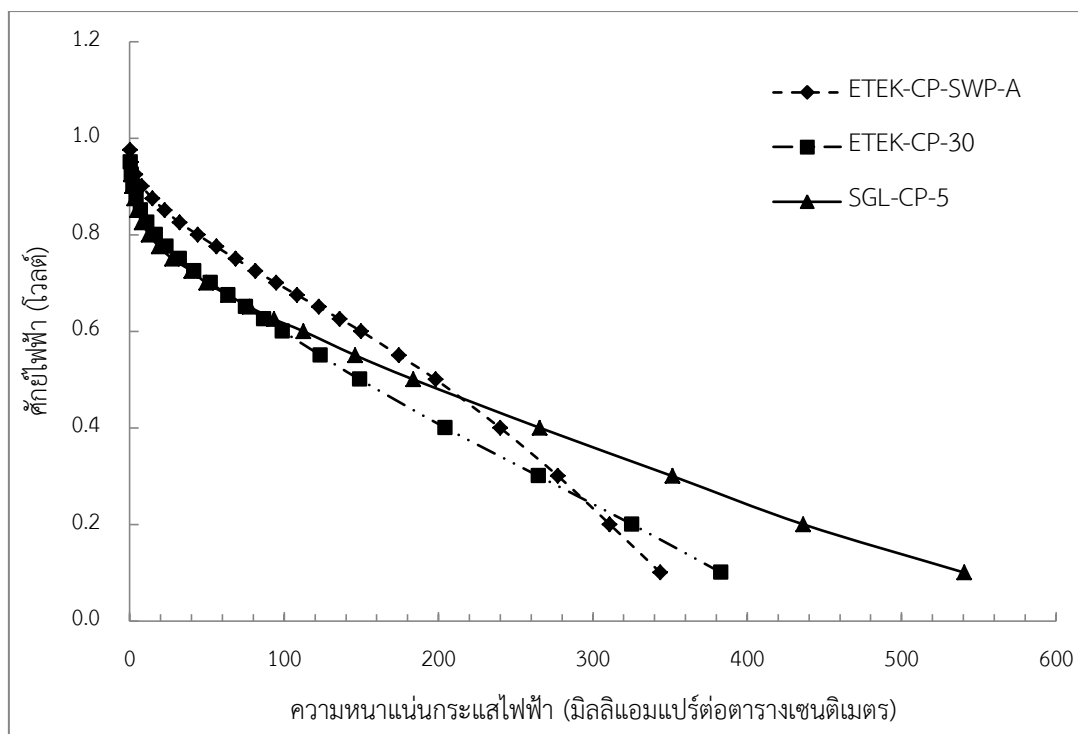
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 5000) แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแกร์แก๊ส: (ก) ETEK-CP-SWP-A; (ข) ETEK-CP-30; (ค) SGL-CP-5

พิจารณาภาพตัดขวางของขั้วไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมของขั้วไฟฟ้าทั้งสามชนิดมีการกระจายตัวลงไปตามช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ในขณะที่ขั้วไฟฟ้ ETEK-CP-30 ซึ่งบางมากและขั้วไฟฟ้ SGL-CP-5 ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำที่สุด เมื่อนำไปประกอบกับเมมเบรนโดยใช้ความร้อนและความดันสูง ทำให้เกิดการเสียรูปร่างและเกิดความเสียหายกับโครงสร้างของชั้นแกร์แก๊สที่เป็นตัวรองรับทางกายภาพ



รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 100) แสดงสัญญาณของภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า: (ก) ETEK-CP-SWP-A (ด้านบน); (ข) ETEK-CP-30 (ด้านบน) และ SGL-CP-5 (ด้านล่าง)

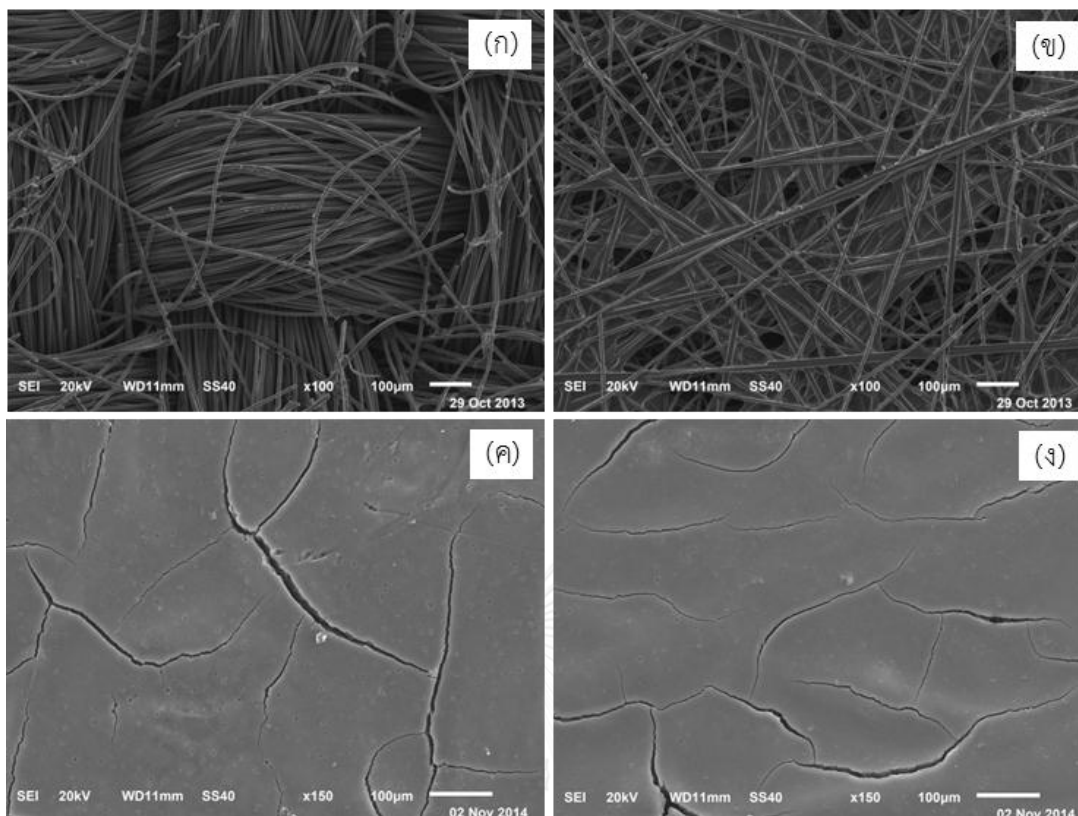
เมื่อนำขั้วไฟฟ้าทั้งสามชนิดมาประกอบกับเมมเบรนและนำไปทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 4.34 พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งสามมีสมรรถนะที่ต่ำที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าทั้งหมด 14 ชนิด โดยค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-SWP-A, ETEK-CP-30 และ SGL-CP-5 มีค่าเท่ากับ 149.9, 99.1 และ 112.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความหนาหรือความหนาแน่นของชั้นแพร์แก๊สน้อยกว่าขีดจำกัดจะทำให้ชั้นแพร์แก๊สนั้นมีความแข็งแรงที่ต่ำ [29] โดยจะส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกลที่จะทนต่อแรงกดอัดในขั้นตอนของการประกอบกับเมมเบรน ทำให้ชั้นแพร์แก๊สเกิดการเสียหายในเชิงกายภาพไป ทำให้สมบัติความเป็นชั้นแพร์แก๊สที่ดันทันหมดไปด้วยเมื่อพิจารณาจากกราฟโพลาริเซชันพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5 มีสมรรถนะที่ดีกว่าขั้วไฟฟ้าอีกสองชนิด โดยต่างกันในช่วงของการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าจากโพลาริเซชันของความเข้มข้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากขั้วไฟฟ้า SGL-CP-5 มีความหนาแน่นน้อยที่สุดทำให้การแพร่ของแก๊สที่เป็นสารตั้งต้นเพื่อเข้าไปเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า และขั้วไฟฟ้า ETEK-CP-30 มีการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าโอห์มมิกที่มากที่สุด



รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊สของบริษัท ETEK และ Sigracet

4.3.2 ชั้นแพร์แก๊สที่ให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูง

ชั้นแพร์แก๊สที่นำมาศึกษาถึงสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงในกลุ่มตัวอย่างนี้พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์มีค่าสูงกว่าชั้นแพร์แก๊สชนิดอื่น ประกอบด้วยชั้นแพร์แก๊สของบริษัท Electrochem (ELT-CC-30 และ ELT-CP-30) และชั้นแพร์แก๊สของบริษัท E-tek (Etek-CC-0-MPL-1s และ Etek-CP-0-MPL-1s) ที่ทางผู้ผลิตได้เตรียมชั้นไมโครพอร์สบนชั้นแพร์แก๊สแล้วพิจารณาภาพถ่ายไมโครกราฟของชั้นแพร์แก๊สทั้งสี่ชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.35 พบว่าชั้นแพร์แก๊สของบริษัท Electrochem ประกอบด้วยชั้นแพร์แก๊สประเภทผ้าคาร์บอนและกระดาษคาร์บอนมีโครงสร้างที่ต่างกันเนื่องจากกระบวนการผลิตที่ต่างกัน โดยกระดาษคาร์บอน (ELT-CP-30 ดังแสดงในรูปที่ 4.35 (ข)) จะมีลักษณะผิวหน้าของชั้นแพร์แก๊สที่มีความเรียบมากกว่าผ้าคาร์บอน (ELT-CC-30 ดังแสดงในรูปที่ 4.35 (ก)) ที่ปรากฏกลุ่มเม็ดที่มีลักษณะนูนซึ่งเกิดจากการทอของเส้นใยคาร์บอนนั่นเอง เมื่อพิจารณาชั้นแพร์แก๊สของบริษัท E-tek ซึ่งประกอบด้วย Etek-CC-0-MPL-1s และ Etek-CP-0-MPL-1s (รูปที่ 4.35 (ค) และ (ง) ตามลำดับ) พบว่าชั้นไมโครพอร์สที่ทางบริษัทได้ทำการเตรียมไว้แล้วนั้น มีผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอ แต่เกิดการแตกของชั้นไมโครพอร์สทำให้เกิดรอยแยกบนพื้นผิวของชั้นแพร์แก๊สด้วย



รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 150) แสดงลักษณะของชั้นแพร่แก๊ส: (ก) ELT-CC-30; (ข) ELT-CP-30; (ค) ETEK-CC-0-MPL-1s; (ง) ETEK-CP-0-MPL-1s

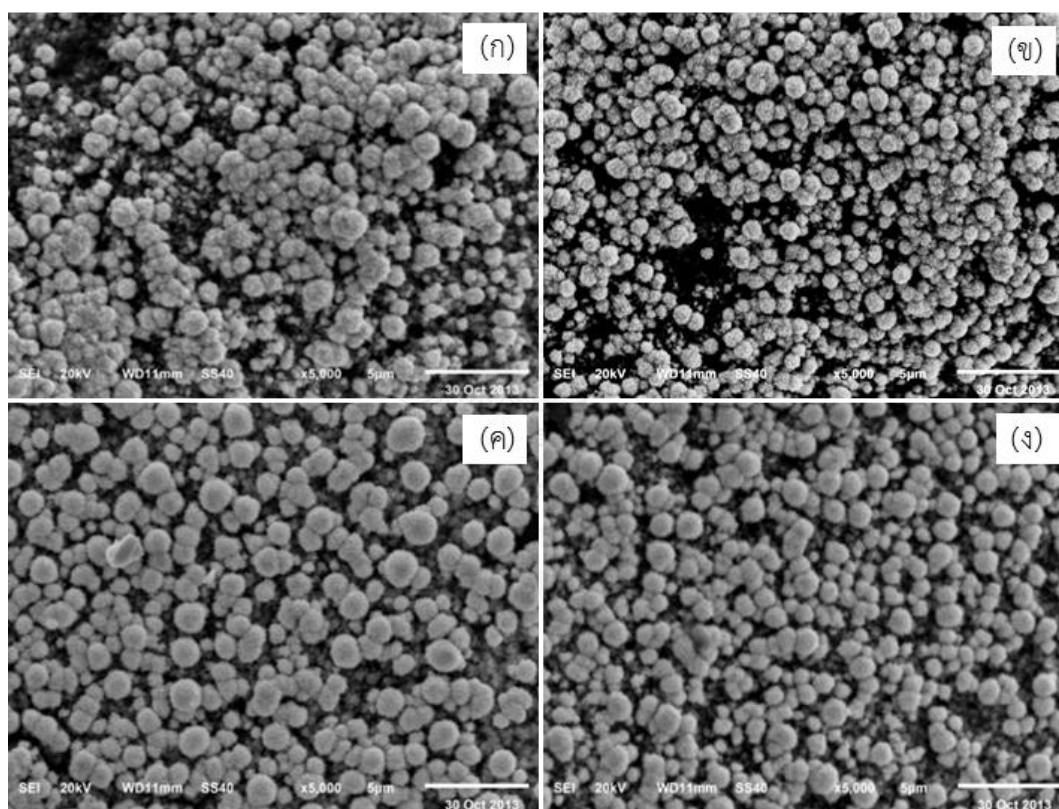
ชั้นแพร่แก๊สประเภทกระดาษคาร์บอนของทั้งสองบริษัทมีแนวโน้มของความหนาที่น้อยกว่าผ้าคาร์บอน โดยกระดาษคาร์บอน ELT-CP-30 และ ETEK-CP-0-MPL-1s มีความหนาเท่ากับ 0.19 และ 0.17 มิลลิเมตรตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ซึ่งความหนาของชั้นแพร่แก๊สทั้งสองนี้มีค่าใกล้เคียงกับชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 (ความหนา 0.17 มิลลิเมตร) ซึ่งพบว่าให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำ แต่ในขณะที่ชั้นแพร่แก๊ส ELT-CP-30 และ ETEK-CP-0-MPL-1s ให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูง เมื่อพิจารณาร่วมกับความหนาแน่นพบว่า ชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 มีความหนาแน่นที่ต่ำที่สุดคือ 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่ในขณะที่ชั้นแพร่แก๊ส ELT-CP-30 และ ETEK-CP-0-MPL-1s มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 0.57 และ 0.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาภาพถ่ายไมโครกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.35 (ข) และ (ง) พบว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนมีน้อยมากซึ่งต่างกับชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 ที่มีช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้ชั้นแพร่แก๊สทั้งสองมีความแข็งแรงมากกว่าชั้นแพร่แก๊ส SGL-CP-5 ทำให้มีสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีกว่านั่นเอง

ตารางที่ 4.13 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาของชั้นแพร์แก๊ส ELT-CC-30, ELT-CP-30, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s

ชื่อย่อ	ELT-CC-30	ELT-CP-30	ETEK-CC-0-MPL-1s	ETEK-CP-0-MPL-1s
บริษัท	Electrochem	Electrochem	E-tek	E-tek
ประเภทของชั้นแพร์แก๊ส	ผ้าคาร์บอน	กระดาษคาร์บอน	ผ้าคาร์บอน	กระดาษคาร์บอน
ปริมาณ PTFE (%)	30	30	0	0
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.33	0.19	0.28	0.17
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.43	0.57	0.58	0.59
มุมสัมผัส (องศา)	143.06	135.73	138.84	121.96
ความต้านทานไฟฟ้า (มิลลิโอมตารางเซนติเมตร)	57.5	42.6	14.3	17.6
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.22	0.29	0.14	0.14
พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)	288.7	324.1	274.6	284.0
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	327.2	352.0	319.0	312.5

หลังจากทำการเตรียมชั้นย่อยลงบนขั้วไฟฟ้าและชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแล้ว นำขั้วไฟฟ้ามาวิเคราะห์หาปริมาณแพลทินัม พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนชั้นแพร์แก๊สของบริษัท E-tek ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s มีค่าเท่ากับ 0.14 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนชั้นแพร์แก๊สของบริษัท Electrochem ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30 และ ELT-CP-30 มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาใกล้เคียงกันคือ เท่ากับ 0.22 และ 0.29 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.13

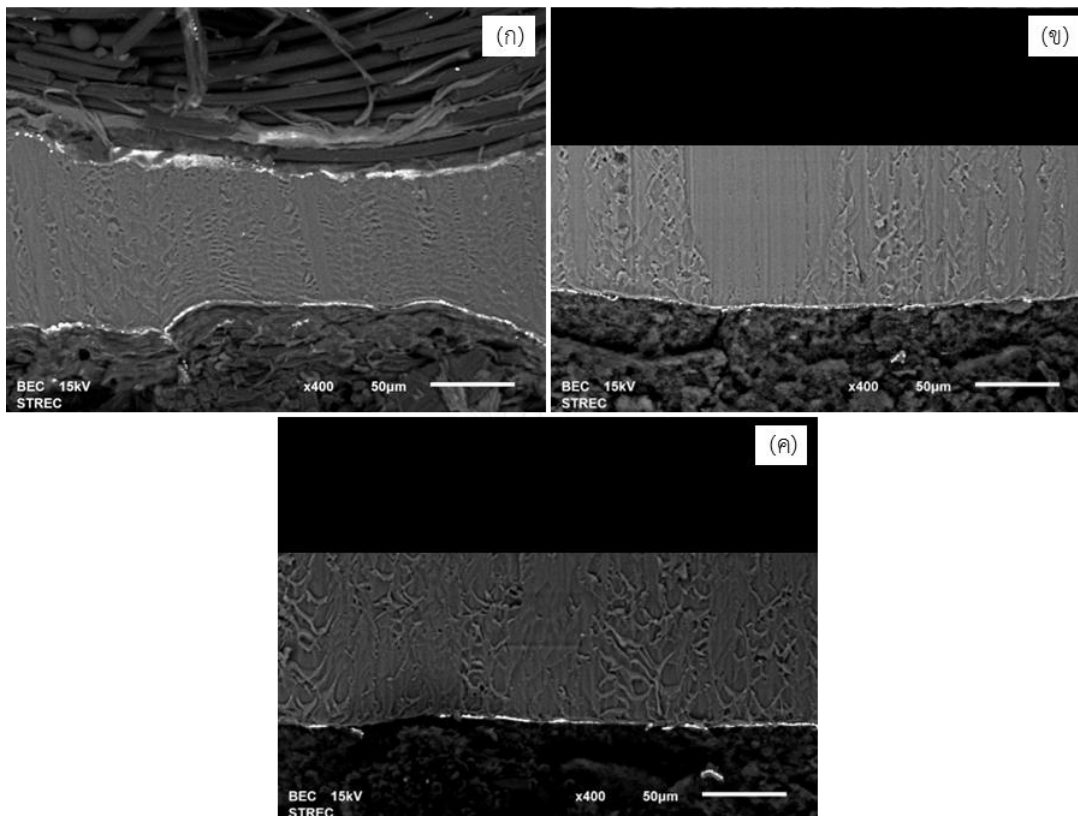
เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายไมโครกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.36 พบว่าชั้นแพร์แก๊สทั้งสี่มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่คล้ายกันคือ มีลักษณะกระจายตัวไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่และมีความสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน ทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูง โดยพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 288.7, 274.6 และ 284.0 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าทั้งสามในรูปจากภาพถ่ายไมโครกราฟพบว่ามีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.36 ก, ค, ง) โดยขั้วไฟฟ้า ELT-CP-30 มีขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ (รูปที่ 4.36 ข) ที่สุด ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาต่ำที่สุดในกลุ่มตัวอย่างนี้ โดยมีค่าเท่ากับ 324.1 ตารางเมตรต่อกรัม



รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 5000) แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร์แก๊ส: (ก) ELT-CC-30; (ข) ELT-CP-30; (ค) ETEK-CC-0-MPL-1s; (ง) ETEK-CP-0-MPL-1s

นำขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ชนิดมาประกอบกับเมมเบรน พิจารณาภาพตัดขวางดังแสดงในรูปที่ 4.37 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมของขั้วไฟฟ้า ELT-CP-30, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s (รูปที่ 4.37 ก), (ข) และ (ค) ด้านล่างตามลำดับ มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา

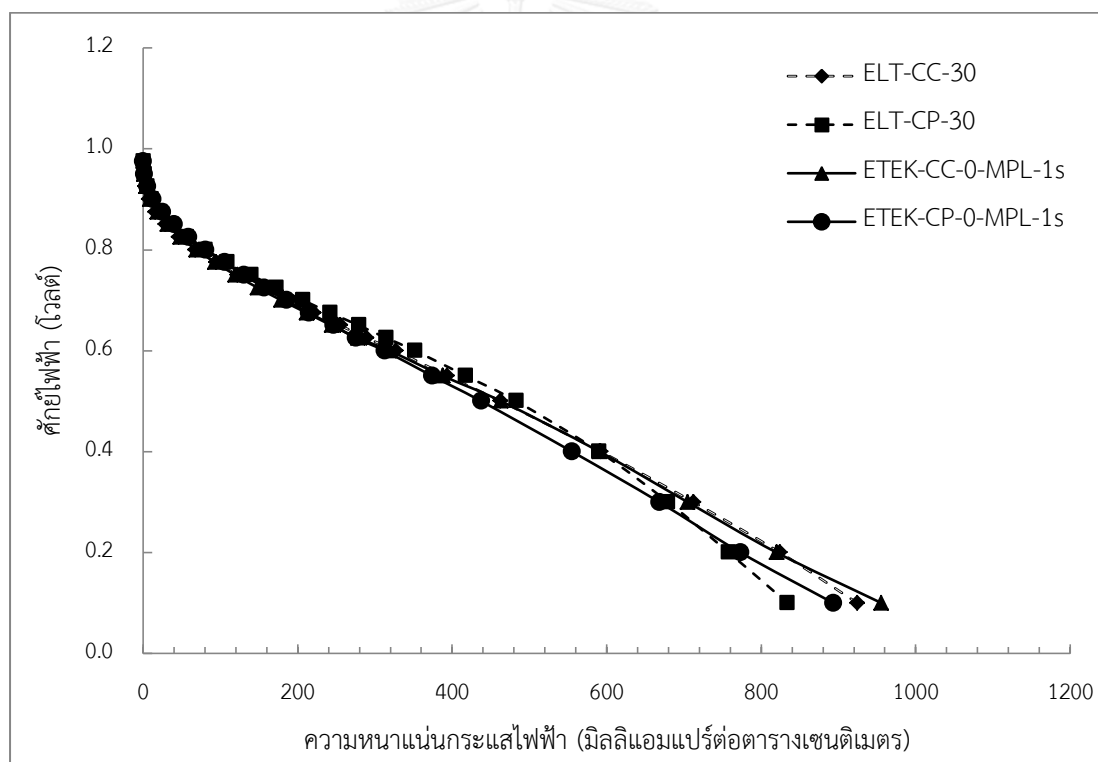
แพลทินัมที่บนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเท่านั้น ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30 (รูปที่ 4.37 (ก) ด้านบน) มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปตามชั้นไมโครพอร์สเล็กน้อย



รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (X 400) แสดงสัญญาณของภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้า: (ก) ELT-CC-30 (ด้านบน) และ ELT-CP-30 (ด้านล่าง); (ข) ETEK-CC-0-MPL-1s (ด้านล่าง); (ค) ETEK-CP-0-MPL-1s (ด้านล่าง)

นอกจากนั้นเมื่อทำการพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าบริษัท Electrochem (ELT-CC-30 และ ELT-CP-30 ดังแสดงในรูปที่ 4.37 (ก)) พบว่ามีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้ามากกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 0.22 และ 0.29 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ส่งผลให้ความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนข้างหนากว่าขั้วไฟฟ้าของบริษัท E-tek (ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s ดังแสดงในรูปที่ 4.37 (ข) และ (ค) ตามลำดับ) ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.14 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และถึงแม้ว่าขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30 จะมีความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่าขั้วไฟฟ้าอื่น แต่มีการจัดเรียงตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมและมีการกระจายตัวที่มีความสม่ำเสมอ จึงเกิดการใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีและส่งผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูง (แตกต่างกับตัวอย่างอื่นที่มีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่หนา แต่มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่ำ)

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ชนิดมาประกอบกับเมมเบรนและนำไปทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 4.38 พบว่าเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 มีสมรรถนะที่สูงที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าทั้งหมด 14 ชนิด โดยค่าความหนาแน่นกระแสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ของขั้วไฟฟ้า ELT-CC-30, ELT-CP-30, ETEK-CC-0-MPL-1s และ ETEK-CP-0-MPL-1s มีค่าเท่ากับ 327.2, 352.0, 319.0 และ 312.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ชนิดนี้มีขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับชั้นแพร่แก๊สอื่นในงานวิจัยนี้ และมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้มีการซ้อนทับกันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อย และส่งผลต่อให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับภาพตัดขวางของเมมเบรนประกอบขั้วไฟฟ้าพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงสุด จึงส่งผลให้มีสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีด้วย



รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นแพร่แก๊สของบริษัท Electrochem และ E-tek

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ตามทฤษฎีปัจจัยที่ส่งผลต่อการพอกพูนด้วยไฟฟ้าคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, การกวน, อุณหภูมิ, เวลา, สมบัติของสารที่ใช้ในการพอกพูนและสมบัติของชิ้นงานที่นำมาพอกพูน โดยในงานวิจัยนี้ทำการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ตลอดการพอกพูน โดยกำหนดให้มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, การกวน, อุณหภูมิและเวลาคงที่ พบว่าจากการทดลองปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้คือ สมบัติของชิ้นงานที่นำมาพอกพูนซึ่งเป็นชั้นแพร์แก๊สที่ต่างกัน โดยชั้นแพร์แก๊สที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะผิวหน้าที่ต่างกัน ทำให้สมบัติทางเคมีไฟฟ้ารวมถึงความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวออกซิไดส์ในสารละลายต่างกัน ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายและผิวหน้าของขั้วแคโทด ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาและความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์ โดยที่ตัวแปรทั้งสองต่างขึ้นกับค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทด ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้มีปริมาณและลักษณะต่างกัน

โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของชนิดและสมบัติของชั้นแพร์แก๊สที่เหมาะสมต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยใช้กระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยชั้นแพร์แก๊สจากแหล่งที่มาต่างกันจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ความหนา ความต้านทานไฟฟ้า ปริมาณ PTFE ในชั้นแพร์แก๊สเป็นต้น สมบัติของชั้นแพร์แก๊สเหล่านี้ส่งผลต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของชั้นแพร์แก๊สและลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้าได้นี้จะส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยพบว่าชั้นแพร์แก๊สประเภทผ้าคาร์บอนมีโครงสร้างที่ต่างจากกระดาษคาร์บอนเนื่องจากวิธีการผลิตที่ต่างกัน ทำให้มีสมบัติที่ต่างกันด้วย ซึ่งส่งผลต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร์แก๊สชนิดผ้าคาร์บอนที่มีการเกาะกลุ่มและเกิดการซ้อนทับกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดการพอกพูนบนมัดของเส้นใยคาร์บอนที่เกิดจากการทอ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษคาร์บอนโดยมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอมากกว่าเนื่องจากผิวหน้าของกระดาษคาร์บอนมีความสม่ำเสมอมากกว่าผ้าคาร์บอน โดยชั้นแพร์แก๊สทั้งสองประเภทมีสมรรถนะที่ดีใกล้เคียงกัน แต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงพบว่าผ้าคาร์บอนมีสมรรถนะที่ดีกว่ากระดาษ

คาร์บอน เนื่องจากกระดาษคาร์บอนมีความหนาแน่นมากกว่า ทำให้การแพร่ของแก๊สเพื่อเข้าไปเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาช้ากว่าผ้าคาร์บอนที่มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า

ปัจจัยต่อมาเป็นการศึกษาผลของความหนาของกระดาษคาร์บอนพบว่า เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในกรณีที่กระดาษคาร์บอนบางมากและความหนาแน่นต่ำ ทำให้การซ้อนทับของเส้นใยน้อยกว่าทำให้เหมือนรูพรุนมีขนาดใหญ่ จึงพบรูพรุนขนาดใหญ่ในปริมาณที่มากกว่ากระดาษคาร์บอนที่มีความหนาแน่นมาก ซึ่งส่งผลในขั้นตอนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากจะเกิดการพอกพูนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าแล้ว ยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนที่สามารถกระจายตัวลงไปตามรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และทะลุไปยังด้านในของขั้วไฟฟ้า โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระจายตัวลงไปตามรูพรุนนั้น สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนได้ยากกว่า เนื่องจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะต้องเป็นบริเวณที่มีการสัมผัสกันระหว่างขั้วไฟฟ้าหรือตัวเร่งปฏิกิริยา อิเล็กโทรไลต์และแก๊ส ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงมีเพียงที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสหรือใกล้กับอิเล็กโทรไลต์เท่านั้น ประกอบกับกระดาษคาร์บอนที่บางมากมีการเกาะกลุ่มและซ้อนทับกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่ากระดาษคาร์บอนที่หนา จึงทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีค่าต่ำ นอกจากนี้กระดาษที่บางมากยังส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกลที่จะทนต่อแรงกดอัดของน้ำหนักระหว่างที่เซลล์เชื้อเพลิงประกอบกันหลายเซลล์ได้ต่ำลง จึงทำให้มีสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่ำด้วย

โดยทั่วไปชั้นแพร่แก๊สจะถูกปรับสภาพด้วยสารไม่ชอบน้ำ ทำให้ผิวหน้าและรูพรุนในชั้นแพร่แก๊สไม่เกิดการอุดตันของน้ำ ซึ่งผู้ผลิตมักมีการเติมสาร PTFE ลงในโครงสร้างของเส้นใยของชั้นแพร่แก๊สมาแล้ว โดยพบว่าเมื่อปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร่แก๊สเพิ่มขึ้น จะทำให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำและค่าความต้านทานสูงขึ้นด้วย และช่องว่างระหว่างเส้นใยคาร์บอนจะน้อยลง โดยพบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร่แก๊สสูงขึ้น เนื่องจาก PTFE เป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้สมบัติภาวะการเปียกระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้าของชั้นแพร่แก๊สกับอิเล็กโทรไลต์ลดลง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะเกิดการพอกพูนบริเวณผิวหน้าของชั้นแพร่แก๊สยากขึ้น จึงทำให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้มีปริมาณน้อยลง นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นก้อนใหญ่ สัดส่วนการปกคลุมของตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นแพร่แก๊สมีสัดส่วนน้อยลง และลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สม่ำเสมอส่งผลให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาและสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำลงด้วย

นอกจากนั้นชั้นแพร่แก๊สบางประเภทผู้ผลิตได้ทำการเคลือบชั้นไมโครพอร์รัสที่มีผงคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาแล้ว ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของชั้นไมโครพอร์รัสต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม โดยทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มคือ ชั้นแพร่แก๊สในกลุ่มที่ 1 ทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำและชั้นชอบน้ำเพิ่ม (2 ชั้นย่อย) เข้าไป ทำให้มีความหนา ความต้านทานไฟฟ้าและค่ามัมสัมผัสที่สูงขึ้น จาก

ชั้นแพร์แก๊สกลุ่มที่ 2 ที่มีการเตรียมชั้นขอบน้ำเพิ่มเท่านั้น (1 ชั้นย่อย) เนื่องจากผงคาร์บอนและ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบในชั้นไม่ชอบน้ำที่ถูกเพิ่มเข้าไป ซึ่งส่งผลต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยพบว่า ขั้วไฟฟ้าในกลุ่มที่ 1 มีการรวมตัวกันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สม่ำเสมอและมีการซ้อนทับกัน ทำให้เกิดการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อย ทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมจากชั้นแพร์แก๊สในกลุ่มที่ 2 ซึ่งไม่ได้ทำการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำเพิ่ม ที่มีผิวหน้าของชั้นแพร์แก๊สมีความเรียบมากกว่า ส่งผลให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนได้บนขั้วไฟฟ้ามีแนวโน้มที่น้อยกว่า แต่มีการจัดเรียงตัวที่รวมเป็นกลุ่มก้อนน้อย มีแนวโน้มในการรวมตัวที่เล็กและการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกว่า ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า และทำให้มีสมรรถนะที่ดีกว่านั่นเอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาเพิ่มเติมถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า กลไกและจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคไฮโดรไดนามิกโวลแทมเมตรี โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าแผ่น และวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าแผ่นและขั้วไฟฟ้าวงแหวน

รายการอ้างอิง

1. Alcaide, F., et al., *Development of a novel portable-size PEMFC short stack with electrodeposited Pt hydrogen diffusion anodes*. International Journal of Hydrogen Energy, 2010. **35**(11): p. 5521-5527.
2. Wang, Y., C.-Y. Wang, and K.S. Chen, *Elucidating differences between carbon paper and carbon cloth in polymer electrolyte fuel cells*. Electrochimica Acta, 2007. **52**(12): p. 3965-3975.
3. Vielstich, W., A. Lamm, and H.A. Gasteiger, *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals Technology and Applications* 2ed. 2003, New York: John Wiley & Sons.
4. Larminie, J. and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. 2 ed. 2003, New York: John Wiley & Sons.
5. หุ่นสม, ม., เซลล์เชื้อเพลิงพอลิเมอร์และการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. 2555: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. คณะทำงานวารสารนโยบายพลังงาน, วารสารนโยบายพลังงาน มกราคม-มีนาคม. 2549. **71**.
7. Peng, A.Z., et al., *Asymmetric bi-layer PFSA membranes as model systems for the study of water management in the PEMFC*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014. **16**(38): p. 20941-20956.
8. Barbir, F., *PEM fuel cells: Theory and practice*. 2005, California: Elsevier Academic Press.
9. Bevers, D., R. Rogers, and M. von Bradke, *Examination of the influence of PTFE coating on the properties of carbon paper in polymer electrolyte fuel cells*. Journal of Power Sources, 1996. **63**(2): p. 193-201.
10. Park, G.-G., et al., *Effect of PTFE contents in the gas diffusion media on the performance of PEMFC*. Journal of Power Sources, 2004. **131**(1-2): p. 182-187.
11. Prasanna, M., et al., *Influence of cathode gas diffusion media on the performance of the PEMFCs*. Journal of Power Sources, 2004. **131**(1-2): p. 147-154.

12. Nam, J.H. and M. Kaviany, *Effective diffusivity and water-saturation distribution in single- and two-layer PEMFC diffusion medium*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. **46**(24): p. 4595-4611.
13. Weber, A.Z. and J. Newman, *Effects of Microporous Layers in Polymer Electrolyte Fuel Cells*. Journal of The Electrochemical Society, 2005. **152**(4): p. A677-A688.
14. Jordan, L.R., et al., *Effect of diffusion-layer morphology on the performance of polymer electrolyte fuel cells operating at atmospheric pressure*. Journal of Applied Electrochemistry, 2000. **30**(6): p. 641-646.
15. Jordan, L.R., et al., *Diffusion layer parameters influencing optimal fuel cell performance*. Journal of Power Sources, 2000. **86**(1-2): p. 250-254.
16. Paganin, V.A., E.A. Ticianelli, and E.R. Gonzalez, *Development and electrochemical studies of gas diffusion electrodes for polymer electrolyte fuel cells*. Journal of Applied Electrochemistry, 1996. **26**(3): p. 297-304.
17. Mehta, V. and J.S. Cooper, *Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing*. Journal of Power Sources, 2003. **114**(1): p. 32-53.
18. เรืองพรวิสุทธิ, ว., คະตะไลซิสแบบ เฮทเทอโรจีเนียส :หลักทฤษฎี & การประยุกต์. 2534: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
19. ทองนพเนื่อ, เ., เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. 2542, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
20. Saejeng, Y. and N. Tantavichet, *Preparation of Pt-Co alloy catalysts by electrodeposition for oxygen reduction in PEMFC*. Journal of Applied Electrochemistry, 2009. **39**(1): p. 123-134.
21. Kinoshita, K., *Electrochemical Oxygen Technology*. 1992: John Wiley & Sons.
22. Allen J. Bard and L.R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. 2 ed. 2000, New York: John Wiley & Sons.
23. Rao, C.R.K. and D.C. Trivedi, *Chemical and electrochemical depositions of platinum group metals and their applications*. Coordination Chemistry Reviews, 2005. **249**(5-6): p. 613-631.
24. Lipkowsky, J. and P.N. Ross, *Electrocatalysis*. 1998, New York: John Wiley & Sons.

25. Litster, S. and G. McLean, *PEM fuel cell electrodes*. Journal of Power Sources, 2004. **130**(1–2): p. 61-76.
26. O'Hayre, R., et al., *Fuel Cell Fundamentals*. 2006, John Wiley & Sons: New York.
27. ศรีพงษ์, ถ., การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. 2543, นครปฐม: คณะเภสัชศาสตร์ และโรงพยาบาลศิริปากร.
28. Tabet-Aoul, A. and M. Mohamedi, *Interrelated functionalities of hierarchically CNT/CeO₂/Pt nanostructured layers: synthesis, characterization, and electroactivity*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012. **14**(13): p. 4463-4474.
29. Maheshwari, P.H., R. Singh, and R.B. Mathur, *Effect of the thickness of carbon electrode support on the performance of PEMFC*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2012. **673**(0): p. 32-37.
30. Frey, T. and M. Linardi, *Effects of membrane electrode assembly preparation on the polymer electrolyte membrane fuel cell performance*. Electrochimica Acta, 2004. **50**(1): p. 99-105.
31. Park, S. and B.N. Popov, *Effect of a GDL based on carbon paper or carbon cloth on PEM fuel cell performance*. Fuel, 2011. **90**(1): p. 436-440.
32. Ralph, T.R., et al., *Low Cost Electrodes for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Performance in Single Cells and Ballard Stacks*. Journal of The Electrochemical Society, 1997. **144**(11): p. 3845-3857.
33. Rajalakshmi, N. and K.S. Dhathathreyan, *Nanostructured platinum catalyst layer prepared by pulsed electrodeposition for use in PEM fuel cells*. International Journal of Hydrogen Energy, 2008. **33**(20): p. 5672-5677.
34. Lufrano, F., et al., *Improvement in the diffusion characteristics of low Pt-loaded electrodes for PEFCs*. Journal of Applied Electrochemistry, 1999. **29**(4): p. 445-448.
35. Mazúr, P., et al., *Gas diffusion electrodes for high temperature PEM-type fuel cells: role of a polymer binder and method of the catalyst layer deposition*. Journal of Applied Electrochemistry, 2011. **41**(9): p. 1013-1019.

36. Millington, B., V. Whipple, and B.G. Pollet, *A novel method for preparing proton exchange membrane fuel cell electrodes by the ultrasonic-spray technique*. Journal of Power Sources, 2011. **196**(20): p. 8500-8508.
37. Kim, H. and B.N. Popov, *Development of Novel Method for Preparation of PEMFC Electrodes*. Electrochemical and Solid-State Letters, 2004. **7**(4): p. A71-A74.
38. Lertviriyapaisan, S. and N. Tantavichet, *Sublayers for Pt catalyst electrodeposition electrodes in PEMFC*. International Journal of Hydrogen Energy, 2010. **35**(19): p. 10464-10471.
39. Antolini, E., et al., *Influence of Nafion loading in the catalyst layer of gas-diffusion electrodes for PEFC*. Journal of Power Sources, 1999. **77**(2): p. 136-142.
40. Taylor, E.J., E.B. Anderson, and N.R.K. Vilambi, *Preparation of High-Platinum-Utilization Gas Diffusion Electrodes for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells*. Journal of The Electrochemical Society, 1992. **139**(5): p. L45-L46.
41. Chun, Y.-G., et al., *Performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell with thin film catalyst electrodes*. Journal of Power Sources, 1998. **71**(1-2): p. 174-178.
42. Passalacqua, E., et al., *Nafion content in the catalyst layer of polymer electrolyte fuel cells: effects on structure and performance*. Electrochimica Acta, 2001. **46**(6): p. 799-805.
43. Mathias, M.F., et al., *Diffusion media materials and characterisation*. 2003, New York: John Wiley & Sons.
44. Moreira, J., et al., *Dependence of PEM fuel cell performance on the configuration of the gas diffusion electrodes*. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 2002. **5**: p. 173-175.
45. Chiu, K.F. and K.W. Wang, *Hydrophobic coatings on carbon electrodes for proton exchange membrane fuel cells*. Surface and Coatings Technology, 2007. **202**(4-7): p. 1231-1235.

46. Velayutham, G., *Effect of micro-layer PTFE on the performance of PEM fuel cell electrodes*. International Journal of Hydrogen Energy, 2011. **36**(22): p. 14845-14850.
47. Lobato, J., et al., *Influence of the Teflon loading in the gas diffusion layer of PBI-based PEM fuel cells*. Journal of Applied Electrochemistry, 2008. **38**(6): p. 793-802.
48. Gostick, J.T., et al., *On the role of the microporous layer in PEMFC operation*. Electrochemistry Communications, 2009. **11**(3): p. 576-579.
49. Park, S., J.-W. Lee, and B.N. Popov, *Effect of carbon loading in microporous layer on PEM fuel cell performance*. Journal of Power Sources, 2006. **163**(1): p. 357-363.





ภาคผนวก ก

การคำนวณในการเตรียมชั้นย่อย

ก.1 การคำนวณในการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic layer)

การคำนวณปริมาณผงคาร์บอน : PTFE ในอัตราส่วน 70 : 30 โดยให้มีปริมาณชั้นไม่ชอบน้ำเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยชั้นงานมีขนาด 6.9 ตารางเซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารผสมต่อ 1 ชั้นงาน} &= \text{พื้นที่ของชั้นงาน} \times \text{ปริมาณสารของชั้นไม่ชอบน้ำ} \\ &= 6.9 \text{ ตารางเซนติเมตร} \times 1.9 \text{ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร} \\ &= 13.11 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

ปริมาณผงคาร์บอน : PTFE ในอัตราส่วน 70 : 30 หมายความว่าในสารผสมมีปริมาณผงคาร์บอนร้อยละ 70 และ PTFE ร้อยละ 30

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณผงคาร์บอนที่ใช้} &= 13.11 \text{ มิลลิกรัม} \times 0.7 \\ &= 9.177 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ PTFE} &= 13.11 \text{ มิลลิกรัม} \times 0.3 \\ &= 3.933 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

โดยเตรียมจากสารละลาย PTFE 60 wt% ที่มีความหนาแน่น 1.5 กรัมต่อมิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ PTFE ที่ใช้} &= 3.933 \text{ มิลลิกรัม PTFE} \left(\frac{100 \text{ กรัมสารละลาย}}{60 \text{ กรัม PTFE}} \right) \left(\frac{1 \text{ มิลลิลิตร}}{1.5 \text{ กรัมสารละลาย}} \right) \\ &= 4.37 \text{ ไมโครลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นในการเตรียมชั้นไม่ชอบน้ำโดยมีสัดส่วนของผงคาร์บอนต่อ PTFE คือ 70 : 30 บนชั้นแพร์แก๊สขนาด 6.9 ตารางเซนติเมตรต้องผสมผงคาร์บอนปริมาณ 0.00918 กรัม และ PTFE ปริมาณ 4.37 ไมโครลิตร

ก.2 การคำนวณในการเตรียมชั้นชอบน้ำ (Hydrophilic layer)

การคำนวณปริมาณชั้นชอบน้ำโดยมีปริมาณเนฟิออน : กลีเซอรอลในอัตราส่วน 50 : 50 ชิ้นงานมีขนาด 6.9 ตารางเซนติเมตร มีตัวอย่างในการคำนวณดังนี้

ตัวอย่าง การคำนวณปริมาณสารในชั้นชอบน้ำ 0.6 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารผสมต่อ 1 ชิ้นงาน} &= \text{พื้นที่ของชิ้นงาน} \times \text{ปริมาณสารของชั้นชอบน้ำ} \\ &= 6.9 \text{ ตารางเซนติเมตร} \times 0.6 \text{ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร} \\ &= 4.14 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

ปริมาณเนฟิออน : กลีเซอรอล ในอัตราส่วน 50 : 50 หมายความว่าในสารผสมมีปริมาณเนฟิออนและกลีเซอรอลร้อยละ 50

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเนฟิออน} &= 4.14 \text{ มิลลิกรัม} \times 0.5 \\ &= 2.07 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

โดยเตรียมจากสารละลายเนฟิออน 5 wt% ที่มีความหนาแน่น 0.87 กรัมต่อมิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเนฟิออนที่ใช้} &= 2.07 \text{ มิลลิกรัม} \left(\frac{100 \text{ กรัม}}{5 \text{ กรัม}} \right) \left(\frac{1 \text{ มิลลิลิตร}}{0.87 \text{ กรัม}} \right) \\ &= 47.59 \text{ ไมโครลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกลีเซอรอล} &= 4.14 \text{ มิลลิกรัม} \times 0.5 \\ &= 2.07 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

โดยเตรียมจากสารละลายกลีเซอรอลที่มีความหนาแน่น 1.261 กรัมต่อมิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้} &= 2.07 \text{ มิลลิกรัม} \left(\frac{1 \text{ มิลลิลิตร}}{1.261 \text{ กรัม}} \right) \\ &= 1.64 \text{ ไมโครลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นในการเตรียมชั้นชอบน้ำโดยมีสัดส่วนของเนฟิออน : กลีเซอรอลคือ 50 : 50 บนชิ้นแพร์แก๊สขนาด 6.9 ตารางเซนติเมตรต่อผสมเนฟิออนปริมาณ 47.59 ไมโครลิตรและกลีเซอรอลปริมาณ 1.64 ไมโครลิตร

ตารางที่ ก.1 ปริมาณของส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมชั้นงานขนาด 6.9 ตารางเซนติเมตร ของชั้นชอบน้ำ โดยมีปริมาณเนฟิออนต่อกลีเซอรอลในอัตราส่วน 50 : 50 โดยมีปริมาณชั้นชอบน้ำที่แตกต่างกัน

ปริมาณชั้นชอบน้ำ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	ปริมาณเนฟิออน (ไมโครลิตร)	ปริมาณกลีเซอรอล (ไมโครลิตร)
0.4	31.72	1.09
0.6	47.59	1.64
0.8	63.45	2.19



ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าจากความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

ทำการชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าก่อนทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อทำการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าแล้ว นำน้ำกลั่นฉีดล้างผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเพื่อกำจัดสารละลายแพลทินัมส่วนเกิน ที่ไม่ได้ยึดเกาะบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าออกแล้วนำขั้วไฟฟ้าไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาพอกพูนบนผิวหน้าไปชั่งน้ำหนัก โดยมีสมมติฐานที่ว่า น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของขั้วไฟฟ้าคือน้ำหนักของโลหะแพลทินัมที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มายึดเกาะบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

$$\text{ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา} = \frac{\text{น้ำหนักขั้วไฟฟ้าหลังการพอกพูน} - \text{น้ำหนักขั้วไฟฟ้าก่อนการพอกพูน}}{\text{พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า}}$$

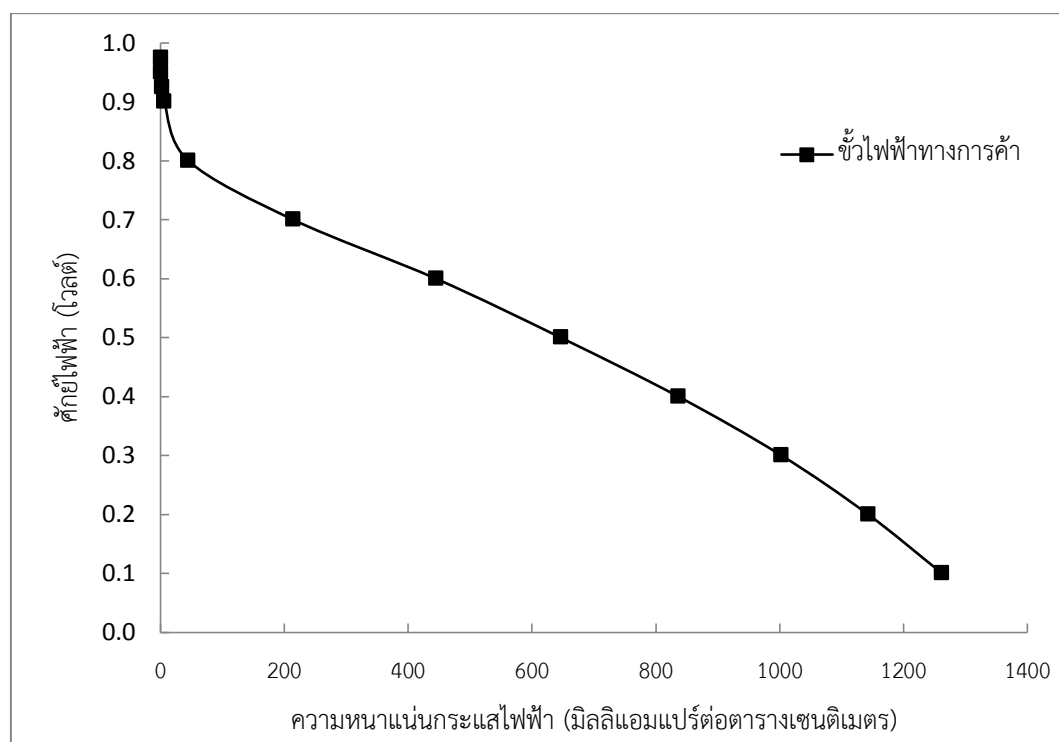
ตัวอย่าง

น้ำหนักขั้วไฟฟ้าก่อนการพอกพูน	=	115.6 มิลลิกรัม
น้ำหนักขั้วไฟฟ้าหลังการพอกพูน	=	116.8 มิลลิกรัม
พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า	=	6.9 ตารางเซนติเมตร

$$\text{ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา} = \frac{116.8 - 115.6}{6.9} = 0.174 \text{ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร}$$

ภาคผนวก ค

ขั้วไฟฟ้าทางการค้าของบริษัท E-tek ปริมาณแพลทินัม 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร
โดยใช้ 20% Pt/Vulcan XC-72



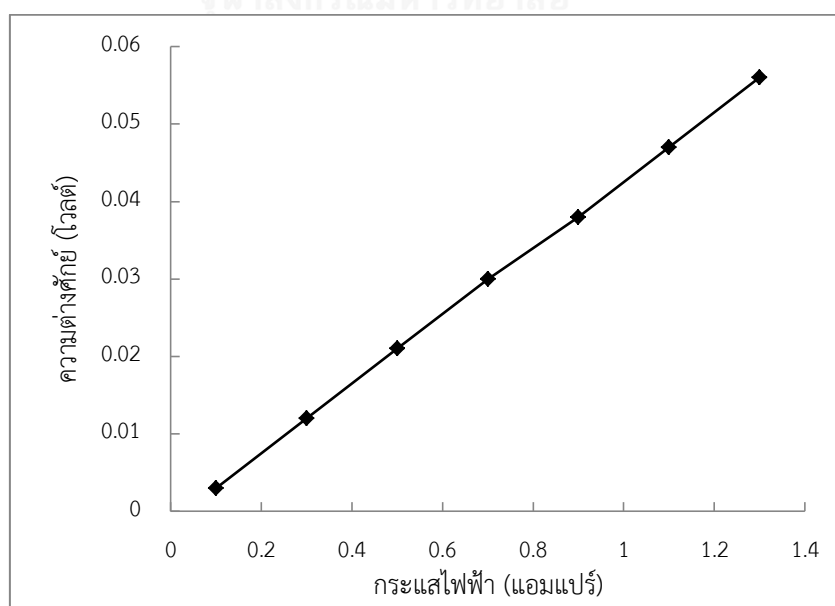
ความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์มีค่า 445.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ภาคผนวก ง

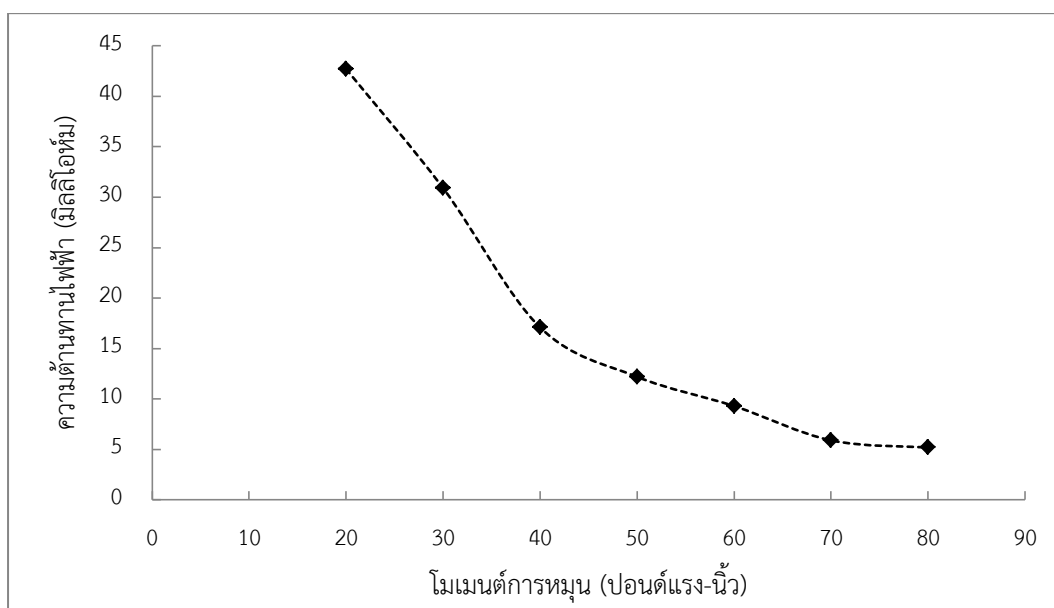
ตัวอย่างการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-A ในแนวทะลุผ่าน

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)						
	โมเมนต์ การหมุน 20 (ปอนด์ แรง-นิ้ว)	โมเมนต์ การหมุน 30 (ปอนด์ แรง-นิ้ว)	โมเมนต์ การหมุน 40 (ปอนด์ แรง-นิ้ว)	โมเมนต์ การหมุน 50 (ปอนด์ แรง-นิ้ว)	โมเมนต์ การหมุน 60 (ปอนด์ แรง-นิ้ว)	โมเมนต์ การหมุน 70 (ปอนด์ แรง-นิ้ว)	โมเมนต์ การหมุน 80 (ปอนด์ แรง-นิ้ว)
0.1	0.003	0.002	0.001	0	0	0	0
0.3	0.012	0.009	0.004	0.003	0.003	0.001	0.001
0.5	0.021	0.015	0.008	0.006	0.004	0.002	0.002
0.7	0.030	0.021	0.012	0.008	0.007	0.004	0.003
0.9	0.038	0.028	0.016	0.011	0.009	0.005	0.005
1.1	0.047	0.035	0.019	0.014	0.010	0.007	0.006
1.3	0.056	0.040	0.022	0.016	0.012	0.008	0.007

นำข้อมูลจากตารางไปพล็อตกราฟระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ที่โมเมนต์การหมุนต่างๆ จากสูตร $V=IR$ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าคือความชันของกราฟ



จากกราฟจะได้สมการ $y=0.0427x$ โดยมีค่า $R^2=0.9987$ โดยมีความชันเท่ากับ 0.0427 หรือค่าความต้านทานไฟฟ้าที่โมเมนต์การหมุน 20 ปอนด์แรง-นิ้ว มีค่าเท่ากับ 0.0427 โวลต์ หรือ 42.7 มิลลิโวลต์ จากนั้นทำการคำนวณค่าความต้านทานที่โมเมนต์การหมุนต่างๆ และนำมาพล็อตกราฟระหว่างโมเมนต์การหมุนกับค่าความต้านทานไฟฟ้า



พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มคงที่ที่โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 80 ปอนด์แรง-นิ้ว ซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 5.2 มิลลิโอดัม

จากนั้นวัดค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัดเท่ากับ 0.3 มิลลิโอดัม โดยมีพื้นผิวสัมผัสเท่ากับ 3.25 ตารางเซนติเมตร

ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นแพร์แก๊ส ETEK-CP-SWP-A สามารถคำนวณได้ดังนี้

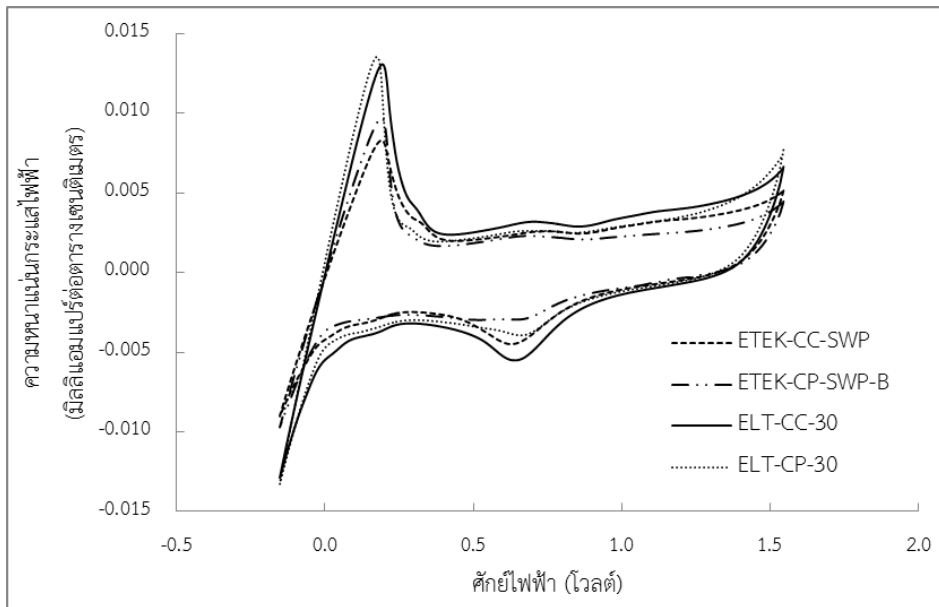
$$= (5.2 - 0.3) \times 3.25$$

$$= 15.9 \text{ มิลลิโอดัมตารางเซนติเมตร}$$

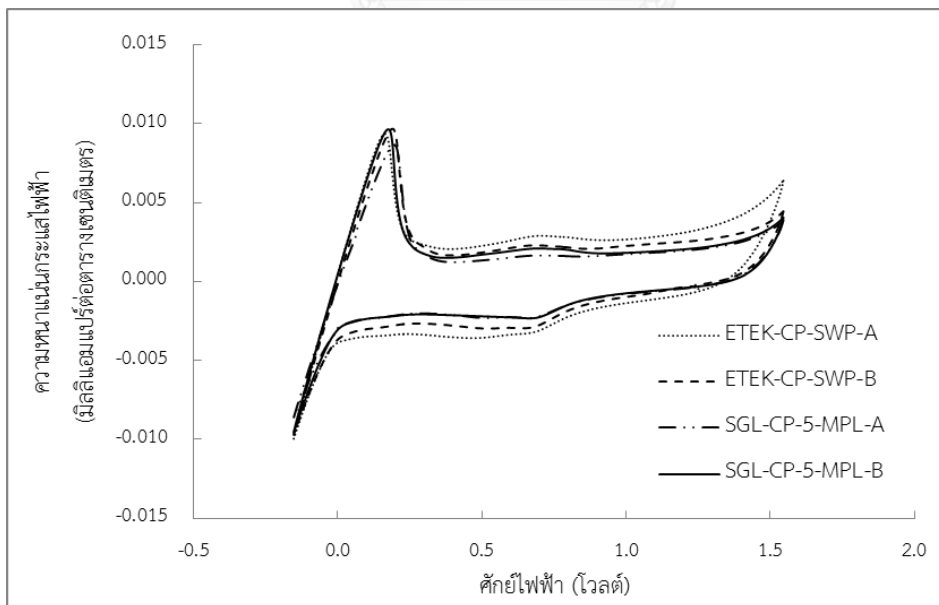
ภาคผนวก จ

ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนชั้นแพร์แก๊สชนิดต่างๆ

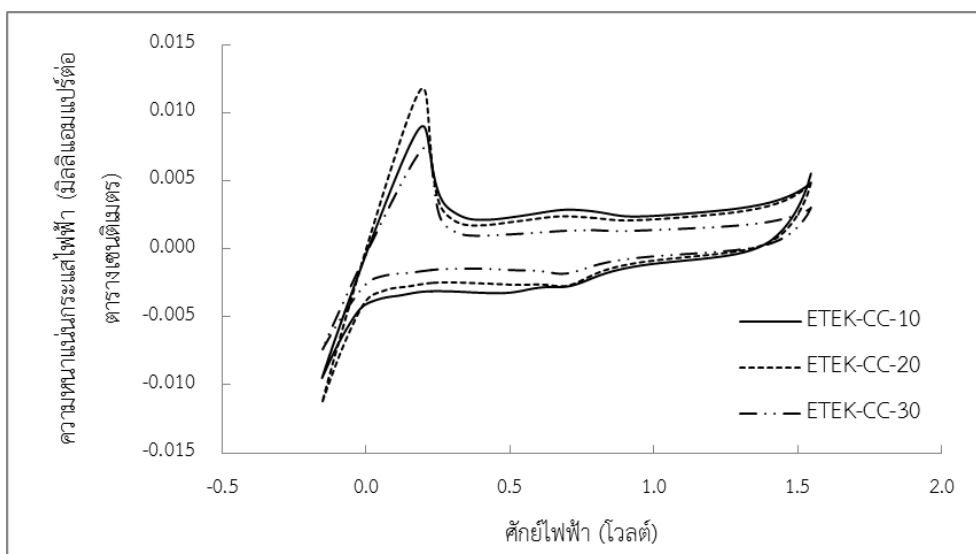
1. ผลของประเภทของชั้นแพร์แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม



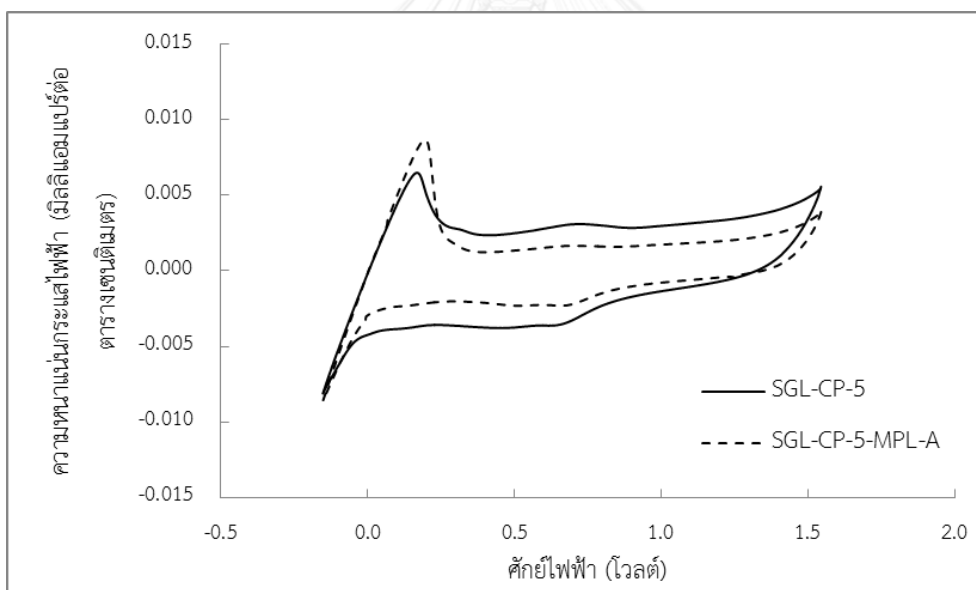
2. ผลของความหนาของชั้นแพร์แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม



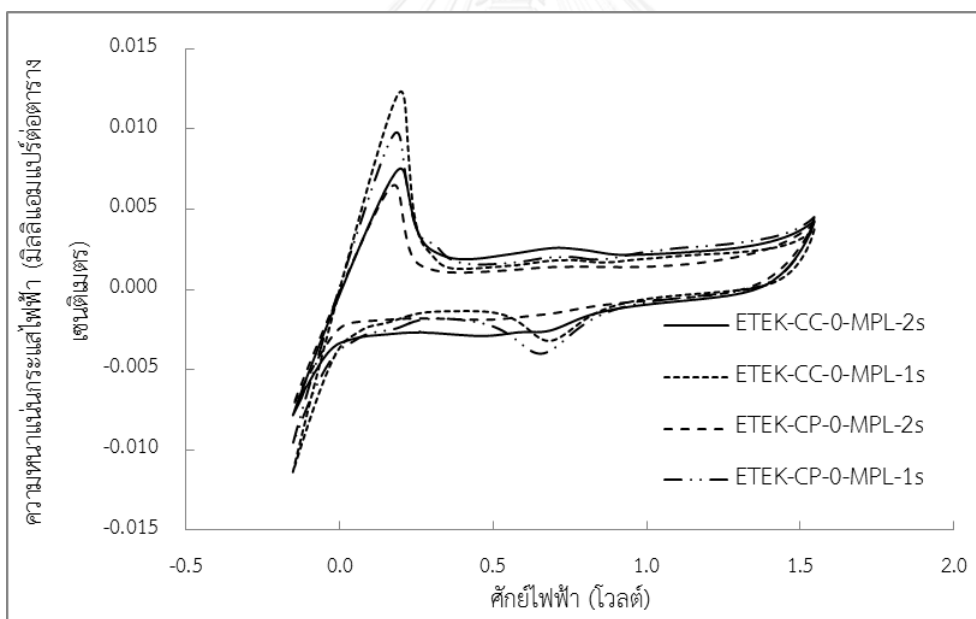
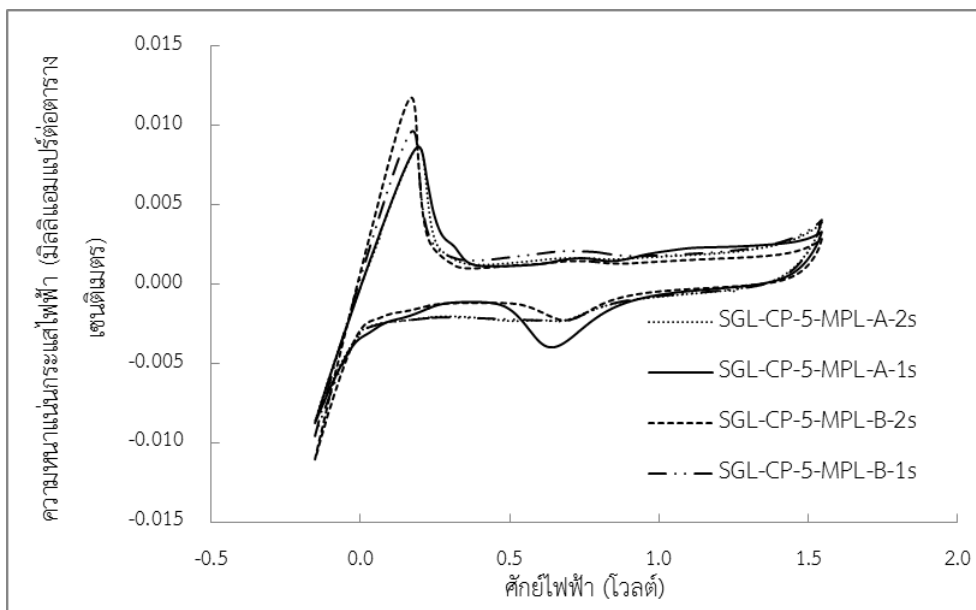
3. ผลของปริมาณ PTFE ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นแพร์แก๊สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม



4. ผลของชั้นไมโครพอร์สต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม



5. ผลของชั้นย่อยบนชั้นไมโครพอร์สต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม



ภาคผนวก ฉ

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ทำการศึกษาลักษณะและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า รวมถึงพิจารณาขนาดอนุภาคหรือการรวมกลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย จึงมีความจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ซึ่งมีกำลังขยายที่สูงเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนบนขั้วไฟฟ้ามีขนาดอนุภาคเล็กมาก อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

หลักการทำงานของเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดคือ อิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้ปืนยิงอิเล็กตรอน (Electron Gun) เนื่องจากอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กมาก จึงต้องมีการดูดอากาศออกจากตัวกล้องให้เป็นสุญญากาศ เพื่อป้องกันการรบกวนของลำแสงอิเล็กตรอน และเพื่อป้องกันการเกิดการหักเห เนื่องมาจากการชนกันของมวลอากาศกับลำแสงอิเล็กตรอน โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน โดยสัญญาณที่นำมาใช้ประโยชน์ได้สามารถแบ่งได้เป็น

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่เกิดจาก Primary Electrons ชนอิเล็กตรอนที่ผิวตัวอย่างหลุดออกมา โดยจะหลุดออกจากผิวตัวอย่างที่ความลึกจากพื้นผิวไม่เกิน 10 นาโนเมตร ให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง ความเข้มของ SE จะขึ้นกับมุมที่ Primary Electrons ตกใส่ และสภาพพื้นผิวตัวอย่าง ให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง ภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เรียกว่า Secondary Electron Image, SEI

- อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าใกล้หรือเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมบนผิวตัวอย่าง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางกระเจิงกลับออกมาจากผิวตัวอย่างโดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน โดยจะเกิดมากกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ค่าพลังงานที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้มและความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับเราเรียกว่า Back Scattered Electron Image (BEI)
- รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับความร้อนมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูล ประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้มีการสะท้อนกลับของพลังงานในรูปแบบต่างๆแล้ว ในลำกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด จะมีตัวรับสัญญาณที่ทำหน้าที่รับและให้เป็นสัญญาณอิเล็กตรอน (electrical signal) แล้วส่งสัญญาณไปยังจอภาพ (Cathode ray tube) เพื่อทำให้เกิดภาพที่ตามองเห็นได้ โดยภาพที่ออกมานั้นจะมีลักษณะ 3 มิติ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชนากาญจน์ เรืองกิจ เกิดวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ กาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2552 ก่อนเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554

