

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าฐานทอง
สำหรับออกซิเจนรีดักชันในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็่ม



นายอาทิตย์ กฤตยาสกุล

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

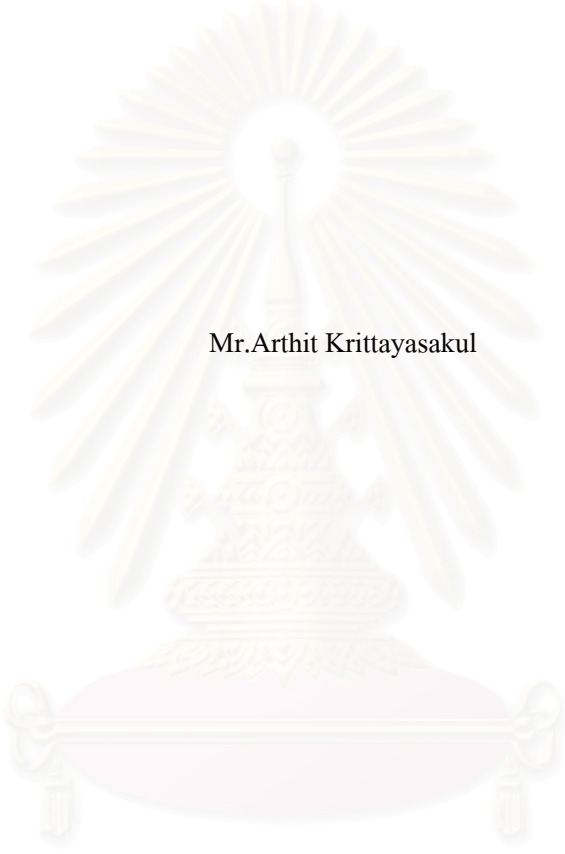
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2075-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF Au-BASED ELECTROCATALYSTS
FOR OXYGEN REDUCTION IN PEM FUEL CELL

Mr.Arthit Krittayasakul



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-14-2075-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าฐานทองสำหรับออกซิเจนรีดักชันใน
เซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์

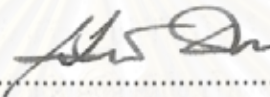
โดย นายอาทิตย์ กฤตยาสกุล

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม

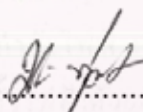
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

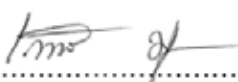
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกนทาทร)

นายอาทิตย์ กฤตยาสกุล: การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าฐานทองสำหรับออกซิเจนรีดักชันในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. (PREPARATION OF Au-BASED ELECTROCATALYSTS FOR OXYGEN REDUCTION IN PEM FUEL CELL) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: อาจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย 86 หน้า. ISBN 974-14-2075-7.

ปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชันในฝั่งแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นปฏิกิริยาที่ควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงคือ แพลทินัม อย่างไรก็ตามแพลทินัมมีราคาที่สูงมากทำให้ต้นทุนของการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงสูงตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่ใช้แพลทินัมสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตโดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของตัวรองรับ (คาร์บอน ใจแกนติกและแกรไฟต์) ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (โคบอลต์ ทองแดง นิกเกิลและทอง) ปริมาณของโลหะ (ร้อยละ 7.7-34.0 โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิในการรีดิวซ์ (350 และ 600 องศาเซลเซียส) และอัตราส่วนของโลหะผสม ผลการทดลองพบว่าโลหะผสมระหว่างทองกับนิกเกิลที่อัตราส่วนโดยอะตอม 1:1 บนตัวรองรับคาร์บอน ใจแกนติก โดยใช้ปริมาณโลหะทองร้อยละ 34.0 โดยน้ำหนัก ผ่านการรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะให้ประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด โดยให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 28.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 14.4 มิลลิวัตต์ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.1 โวลต์ เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติของขั้วไฟฟ้าด้วยภาพถ่ายจาก TEM และ SEM พบว่าขนาดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีขนาด 49 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของโลหะที่ดี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมในทางการค้าพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าค่อนข้างมาก

ภาควิชา ...เคมีเทคนิค...
สาขาวิชา ...เคมีเทคนิค...
ปีการศึกษา ...2548 ...

ลายมือชื่อนิติกร.....นางพิมพ์ กฤตยาสกุล.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4672504523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: PEMFC / PREPARATION / ELECTROCATALYSTS / OXYGEN REDUCTION
/ SUPPORTER

ARTHIT KRITTAYASAKUL: PREPARATION OF Au-BASED
ELECTROCATALYSTS FOR OXYGEN REDUCTION IN PEM FUEL CELL.
THESIS ADVISOR: ASST. PROF. MALI HUNSOM, Ph.D., THESIS COADVISOR:
CHAWALIT NGAMCHARUSSRIVICHAI, Ph.D. 86 pp. ISBN 974-14-2075-7.

The oxygen reduction reaction at cathode side of PEM fuel cell is the limiting reaction. Therefore, catalysts play an important role on the performance of a fuel cell. The famous catalyst used in the fuel cell is Pt. However, it is very expensive leading to high production cost of the fuel cell. This work was carried out to prepare the non-Pt based electrocatalysts for oxygen reduction reaction in a PEM fuel cell to reduce the production cost of fuel cell. The investigated parameters were types of supporter (gigantic and graphite), types of catalyst (cobalt, copper, nickel and gold), metal content (7.7-34.0 wt%), reduce temperature (350 and 600 °C), and ratio of metal alloy. The results showed that alloy metal between gold and nickel at atom ratio 1:1 on carbon gigantic supporter whereas gold content 34.0 wt% reduced in hydrogen atmosphere at 350°C gave the highest catalytic efficiency. Current density is 28.9 mA/cm² and maximum power is 14.4 mW at potential 0.1 V. In addition, by analyzing property of electrode with TEM and SEM, particle size was 49 nm and the particle distribution was good. By comparing with commercial platinum catalyst, it was found that the efficiency was still very low.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ...Chemical Technology... Student's signature.....*Arthit Kittayasakul*...
Field of study ...Chemical Technology... Advisor's signature.....*Mali Hunsom*...
Academic year ...2005 ... Co-Advisor's signature.....*Chawalit Ngamcharussrivichai*...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลหลาย ๆ ฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทรร ที่กรุณาให้คำปรึกษาให้งานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการเตรียมตัวเร่งปฏิบัติการ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร.สิทธิพงษ์ เฟื่องพานิช ที่ช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมีและทบวงมหาวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกการทำวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
2 วรรณสารปริทัศน์	
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.3 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน โปรตอน.....	7
2.3.1 หน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า.....	7
2.3.1.1 อิเล็กโทรไลต์.....	7
2.3.1.2 ขั้วไฟฟ้า.....	8
2.3.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	9
2.3.2 แผ่นช่องทางการไหล.....	13
2.3.3 ตัวประสาน.....	15
2.4 ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง	15
2.4.1 ตัวรองรับคาร์บอน.....	16
2.4.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	17
2.4.3 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ.....	17
2.4.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	18
2.4.5 วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	19

บทที่	หน้า
2.5 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน โพรตอน.....	19
2.6 การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน โพรตอน..	20
2.7 ปฏิกริยารีดักชันของออกซิเจน.....	21
2.7.1 วิธีทางตรงหรือวิธีทาง 4 อิเล็กตรอน.....	22
2.7.2 วิธีทางเปอร์ออกไซด์หรือวิธีทาง 2 อิเล็กตรอน.....	22
2.8 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	25
2.8.1 วิธีการตกตะกอนร่วม.....	25
2.8.2 วิธีการแพร่ซึม.....	26
2.8.2.1 การเตรียมสารตั้งต้นและ Active phase.....	26
2.8.2.2 การอบแห้ง.....	28
2.8.2.3 การเผาให้เป็นถ้ำ.....	28
2.8.2.4 การรีดิวซ์.....	29
2.9 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า.....	29
2.9.1 การสเปรย์.....	29
2.9.2 การพิมพ์หรือการระบาย.....	30
2.9.3 การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	31
2.10 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดย Scanning Electron Microscopy.....	32
2.11 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	32
2.11.1 โพลาริเซชันทางเคมี.....	34
2.11.2 โพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน.....	34
2.11.3 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น.....	35
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	38
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
3.4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแพร่ซึม.....	38
3.4.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยการพิมพ์.....	39
3.4.3 การปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน โพรตอน.....	39
3.4.4 การเตรียมหน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า.....	40

บทที่	หน้า
3.5 การวิเคราะห์อุณหภูมิในการรีดิวซ์.....	40
3.6 การวิเคราะห์สมบัติของขี้วัวไฟฟ้า.....	40
3.7 การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	40
3.7.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	40
3.7.2 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง.....	42
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
4.2 อุณหภูมิในการรีดิวซ์.....	45
4.3 ผลของตัวรองรับ.....	50
4.4 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	52
4.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	57
4.6 ผลของอัตราส่วนโลหะผสม.....	62
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	73
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง....	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะเฉพาะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบต่าง ๆ.....	6
2.2	ตัวเร่งปฏิกิริยาแอโนดชนิดต่าง ๆ.....	12
2.3	ตัวเร่งปฏิกิริยาแคโทดชนิดต่าง ๆ.....	13
2.4	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของโลหะต่าง ๆ.....	21
4.1	องค์ประกอบผงตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ ทองแดง นิกเกิลและทอง.....	57
4.2	องค์ประกอบผงตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ปริมาณโลหะทองร้อยละ 7.7, 13.8, 23.5 และ 34.0 โดยน้ำหนัก.....	62
ก1	แสดงขนาดอนุภาคของ Au/C ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 350 องศาเซลเซียส จากภาพถ่าย TEM.....	76
ข1	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาทองโดยใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์ที่ 350 และ 600 องศาเซลเซียส.....	78
ข2	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาทองบนตัวรองรับคาร์บอนไอแกนติกและแกรไฟต์.....	79
ข3	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (ครั้งที่ 1).....	80
ข4	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (ครั้งที่ 2).....	81
ข5	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาทอง (ครั้งที่ 1).....	82
ข6	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาทอง (ครั้งที่ 2).....	83
ข7	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของอัตราส่วนโลหะผสมต่าง ๆ (ครั้งที่ 1).....	84
ข8	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของอัตราส่วนโลหะผสมต่าง ๆ (ครั้งที่ 2).....	85

สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของซัลโฟเนตฟลูออโรเอทีลิน.....	8
2.2	การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	10
2.3	ช่องทางการไหลของแก๊สแบบต่าง ๆ.....	14
2.4	การประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวเป็นแบบแถว.....	15
2.5	บทบาทของตัวรองรับที่มีต่อการกระจายตัวของ Active species.....	16
2.6	โพลาริเซชันของขั้วไฟฟ้า Pd/Vulcan และ Pd/C ในชั้นแคโทดสำหรับ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	18
2.7	หลักการทํางานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	20
2.8	แบบจำลองสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์คูล์ดบนขั้วไฟฟ้าแบบต่าง ๆ.....	23
2.9	แบบจำลองของออกซิเจนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะชนิดต่าง ๆ.....	24
2.10	วิถีทางของออกซิเจนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะชนิดต่าง ๆ.....	25
2.11	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม.....	26
2.12	การเตรียมด้วยวิธีอิมแพกเนชัน.....	27
2.13	ผลของอัตราเร็วในการอบแห้งที่มีต่อการกระจายตัวของ Active species.....	28
2.14	กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการสเปรย์.....	30
2.15	กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์.....	31
2.16	กระบวนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระแสไฟฟ้า.....	31
2.17	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	33
4.1	TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Co/C ที่ร้อยละ 14.6 โดยน้ำหนัก.....	45
4.2	TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C ที่ร้อยละ 13.1 โดยน้ำหนัก.....	46
4.3	TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/C ที่ร้อยละ 16.0 โดยน้ำหนัก.....	47
4.4	TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Au/C ที่ร้อยละ 13.8 โดยน้ำหนัก.....	48
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและ กำลังไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ที่ 350 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส.....	49
4.6	สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทองเมื่อใช้อุณหภูมิรีดิวซ์ต่างกัน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ที่กำลังขยาย 1 ล้านเท่า.....	50

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของตัวรองรับคาร์บอนไอแกนติกและแกรไฟต์.....	51
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิดต่าง ๆ.....	53
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิดต่าง ๆ.....	54
4.10 สันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 250 เท่า โดยที่ภาพซ้ายแสดงผิวหน้าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ภาพขวาแสดงการกระจายตัวของโลหะ.....	55
4.11 สันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ที่กำลังขยาย 1 ล้านเท่า.....	56
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ปริมาณทองต่าง ๆ.....	59
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ปริมาณทองต่าง ๆ.....	59
4.14 สันฐานวิทยาและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ปริมาณต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 250 เท่า โดยที่ภาพซ้ายแสดงผิวหน้าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ภาพขวาแสดงการกระจายตัวของโลหะ.....	60
4.15 สันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ปริมาณต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM กำลังขยาย 1 ล้านเท่า.....	61
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่อัตราส่วนโลหะผสมต่าง ๆ.....	63
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่อัตราส่วนโลหะผสมต่าง ๆ.....	64
4.18 การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมระหว่างทองกับนิกเกิลที่อัตราส่วนโดยอะตอมต่าง ๆ.....	65
4.19 สันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมทองและนิกเกิลที่อัตราส่วนต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ที่กำลังขยาย 1 ล้านเท่า.....	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวของอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ทำให้ความต้องการใช้เชื้อเพลิงและพลังงานสูงขึ้น พลังงานส่วนใหญ่ได้มาจากเชื้อเพลิงที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้ถูกใช้ไปอย่างมากตามความต้องการของมนุษย์ ส่งผลให้ปริมาณสำรองของเชื้อเพลิงและพลังงานในประเทศลดลงและมีแนวโน้มจะหมดไปในอนาคต กอรปกับปัจจุบันโลกประสบปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นอากาศเป็นพิษ อุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งเป็นผลมาจากการปลดปล่อยแก๊สพิษ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ จากกระบวนการผลิตพลังงานข้างต้น ดังนั้นจึงมีความพยายามศึกษาค้นคว้าหาแหล่งพลังงานหรือกระบวนการชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทางเลือก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานลม พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear energy) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) และพลังงานจากชีวมวล (Biomass) เป็นต้น

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจในการผลิตพลังงานและได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางในหลายประเทศ เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานสูงถึง 80% ซึ่งสูงกว่ากระบวนการผลิตพลังงานแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นมลภาวะทางอากาศ มลภาวะทางเสียง หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะคล้ายกับแบตเตอรี่ (Battery) คือจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมี (Chemical energy) ในเชื้อเพลิงไปเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process) ทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตรงเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปในระบบ โดยเชื้อเพลิงที่ใช้มักอยู่ในรูปของเหลวหรือแก๊ส ผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By-product) คือน้ำและความร้อนเท่านั้น

เซลล์เชื้อเพลิงมีด้วยกันหลายชนิด โดยจัดแบ่งเซลล์เชื้อเพลิงตามประเภทของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell, AFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) โดยพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นกระบวนการที่น่าสนใจ เนื่องจาก

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง มีขนาดเล็กจึงเหมาะสำหรับเป็นแหล่งพลังงานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก และอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่หรือพกพาได้ เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์แบบพกพาและรถยนต์ เป็นต้น อุณหภูมิในการทำงานไม่สูงคือระหว่าง 50-125 องศาเซลเซียส จึงใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่น ความดันที่ใช้ไม่สูงคือระหว่าง 1-2 บรรยากาศ จึงง่ายต่อการควบคุมความปลอดภัยของกระบวนการ

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Membrane) ขั้วไฟฟ้า (Electrode) และตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์ จะให้ศักย์ไฟฟ้าที่วงจรไฟฟ้าเปิด (Open circuit voltage) เท่ากับ 1.229 โวลต์ ที่ภาวะมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) อย่างไรก็ตามพบว่าปฏิกิริยาการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะถูกควบคุมด้วยจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาในขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งจะช้ากว่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด (Anode) เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (Exchange current density) สำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนอยู่ประมาณ 10^5 เท่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีวิธีการเกิดปฏิกิริยาและความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในฝั่งแคโทดคือ แพลทินัม (Platinum) โดยแพลทินัมจะมีวิธีการเกิดปฏิกิริยาแบบ 4 อิเล็กตรอน มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและสามารถทนสภาพการกัดกร่อนได้ดี แต่เนื่องจากแพลทินัมมีราคาแพง ทำให้ต้นทุนในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงสูงตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนชนิดที่ไม่มีแพลทินัมเป็นองค์ประกอบ (Non platinum-based catalyst) เพื่อทดแทนการใช้แพลทินัม และเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษาก็คือ โคบอลต์ (Cobalt) ทองแดง (Copper) นิกเกิล (Nickel) และทอง (Gold)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนชนิดที่ไม่มีแพลทินัมเป็นองค์ประกอบ
2. ศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้เมื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพสูง
2. เป็นพื้นฐานในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่ไม่ใช้แพลทินัมเป็นองค์ประกอบ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้า รวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ไม่มีแพลทินัมเป็นองค์ประกอบ
2. หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่ไม่มีแพลทินัมเป็นองค์ประกอบซึ่งได้แก่ โคบอลต์ ทองแดง นิกเกิล และทอง
3. วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Transmission Electron Microscopy (TEM)
 - ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา
 - การกระจายตัวของอนุภาคโลหะบนผิวขั้วไฟฟ้า
 - ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา
4. ทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ศึกษาในรูปโพลาริเซชัน
5. วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1839 โดยศาสตราจารย์คริสเตียน เฟรเดอริก เซอนบาย (Christian Friedrich Schoenbein) โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน มีสารอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดซัลฟูริกและมีลวดแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในอีก 1 เดือนต่อมา เซอร์วิลเลียม โกรว์ฟ (Sir William Grove) ได้ผลิตเซลล์เชื้อเพลิงเครื่องแรกจากแบตเตอรี่ที่ใช้แพลทินัมและสังกะสี โดยมีกรดซัลฟูริกและไนตริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้มีการพัฒนาทางด้านเซลล์เชื้อเพลิงอย่างรวดเร็วในกลางศตวรรษที่ 20

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) หมายถึงกระบวนการที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current, DC) เซลล์เชื้อเพลิงมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่หรือเซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว ซึ่งแบตเตอรี่จะมีอายุการใช้งานที่แน่นอน ในการใช้งานจะต้องทำการชาร์จกระแสไฟฟ้าก่อนที่จะนำไปใช้งานและต้องชาร์จไฟใหม่เมื่อหมดแรงดัน แต่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือแก๊สเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ ผลผลิตที่พลอยได้คือน้ำและความร้อน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สะอาดไม่ทำลายสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ยังพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ประมาณ 1-3 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้

2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง [Bossel, 2000]

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับวิธีการจัดแบ่ง สำหรับการจัดแบ่งตามอิเล็กโทรไลต์และเชื้อเพลิงที่ใช้จะจำแนกได้เป็น 6 ประเภท คือ

1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เหลวเป็นอิเล็กโทรไลต์ แก๊สที่ใช้จะต้องเป็นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้น เนื่องจากระบบมีความไวต่อการปนเปื้อนมาก อุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 50-200 องศาเซลเซียส ข้อดีคือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดได้อย่างรวดเร็ว ข้อเสียคือ

คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีผลต่ออิเล็กโทรไลต์ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ระบบ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้นิยมใช้ในเครื่องมือทางทหารและอวกาศ

2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้กรดฟอสฟอริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้เชื้อเพลิงและสารออกซิแดนต์ชนิดเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์ แต่สามารถทนต่อแก๊สที่มีการเจือปนได้มากกว่า อุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 100-220 องศาเซลเซียส ปัญหาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ การกัดกร่อนของกรดที่อุณหภูมิการใช้งานและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ค่อนข้างต่ำ จึงเป็นข้อจำกัดด้านการนำเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้งาน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าบางประเภทและในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งบางชนิด
3. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ของแข็ง (Solid Polymer Fuel Cell, SPFC) เป็นชนิดที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิการใช้งานค่อนข้างต่ำ จึงใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องน้อยกว่าประเภทอื่น ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ จึงเหมาะที่นำมาใช้กับรถยนต์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้พอลิเมอร์เมมเบรนเป็นอิเล็กโทรไลต์ แก๊สเชื้อเพลิงที่นิยมใช้คือแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยาคือน้ำ ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาการกัดกร่อนของของเหลวในระบบ
4. เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเดทลอม เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้เกลือคาร์บอนเดทลอมของโซเดียมและโปแตสเซียมในเซรามิกเมตริกของลิเทียมออกไซด์ (LiAlO_2) เป็นอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเดทลอมคือสามารถใช้สารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ เป็นเชื้อเพลิงได้ แต่มีข้อเสียคือปัญหาการกัดกร่อนของชิ้นส่วนในเซลล์ เนื่องจากอุณหภูมิการทำงานที่สูง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้นิยมใช้ในโรงไฟฟ้าขนาดเมกะวัตต์
5. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะใช้เซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 500-1000 องศาเซลเซียส ข้อดีคือไม่มีผลกระทบจากการกัดกร่อนเหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเดทลอม สามารถใช้สารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ เป็นเชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศนำมาใช้เป็นออกซิแดนต์ได้ ข้อเสียคืออุณหภูมิการทำงานของเซลล์ที่สูงจึงทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับส่วนประกอบของเซลล์ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้เป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก 1-2 กิโลวัตต์

6. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอลโดยตรง คือเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เมทานอลเป็นเชื้อเพลิง และใช้พอลิเมอร์เมมเบรนเป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะคล้ายกับปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน แต่ต่างกันตรงปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด โมเลกุลเมทานอลจะแตกออก เมื่อสารละลายผสมระหว่างน้ำกับเมทานอลถูกส่งผ่านไปยังขั้วแคโทด อะตอมของคาร์บอนจะรวมตัวกับอะตอมของออกซิเจนที่มาจากน้ำกับเมทานอลเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะเฉพาะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งสามารถแบ่งได้คร่าว ๆ ว่าเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิต่ำได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนและแบบเมทานอลโดยตรง เซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิปานกลางได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแอลคาไลน์และแบบกรดฟอสฟอริก และเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอนเดทลอมและแบบออกไซด์ของแข็ง

ตารางที่ 2.1 ลักษณะเฉพาะและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบต่าง ๆ

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	อิเล็กโทรไลต์	อุณหภูมิทำงาน (°C)	ประจุเคลื่อนที่	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า	เชื้อเพลิง
แอลคาไลน์	โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์	50-200	OH ⁻	60	แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์
กรดฟอสฟอริก	กรดฟอสฟอริก	100-220	H ⁺	40-45	แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนจากอากาศ
พอลิเมอร์ของแข็ง	พอลิเมอร์เมมเบรน	50-125	H ⁺	40-45	แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนจากอากาศ
คาร์บอนเดทลอม	เกลือคาร์บอนเดทลอม	600-700	CO ₃ ²⁻	50-60	สารไฮโดรคาร์บอนและออกซิเจนจากอากาศ
ออกไซด์ของแข็ง	สารเซรามิก	500-1000	O ²⁻	50-60	สารไฮโดรคาร์บอนและออกซิเจนจากอากาศ
เมทานอลโดยตรง	พอลิเมอร์เมมเบรน	50-110	H ⁺	30-35	เมทานอลและออกซิเจนจากอากาศ

เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจศึกษาเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ดังนั้นจึงจะกล่าวรายละเอียดในส่วนของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เท่านั้น

2.3 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ หน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า (Membrane Electrode Assembly, MEA) แผ่นช่องทางการไหล (Flow field plate) และตัวประสาน (Seal)

2.3.1 หน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า

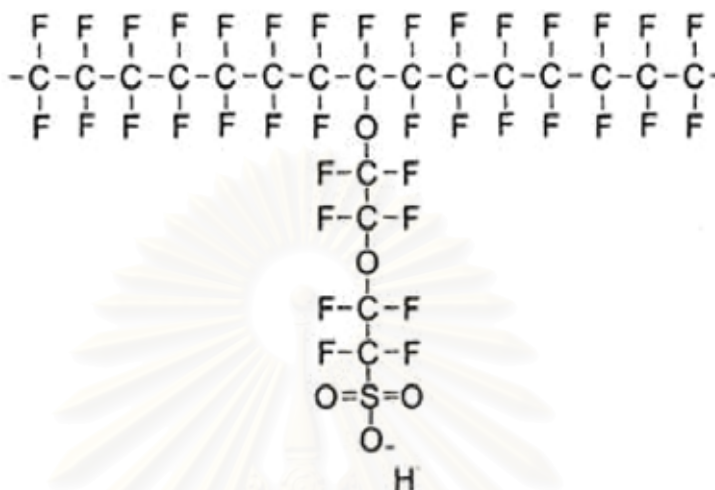
หน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้าประกอบด้วยอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้า และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอิเล็กโทรไลต์จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ที่ด้านข้างของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีรูพรุน 2 ขั้ว คือขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ช่วยให้ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงเกิดได้เร็วขึ้น โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้บนขั้วทั้งสองคือ แพลทินัม เพราะว่าแพลทินัมมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและสามารถทนสภาพการกัดกร่อนได้

2.3.1.1 อิเล็กโทรไลต์ [Larminie, 2000]

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะใช้อิเล็กโทรไลต์ คือเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือเมมเบรนทำหน้าที่ช่วยถ่ายโอนโปรตอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยโครงสร้างหลักของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ เช่น ซัลโฟเนต ฟลูออโรพอลิเมอร์ (Sulphonated fluoropolymers) หรือ ฟลูออโรเอทิลีน (Fluoroethylene) การเตรียมพอลิเมอร์ทำได้โดยการให้ฟลูออรีนแทนที่ตำแหน่งของไฮโดรเจนในโมเลกุลของเอทิลีน เรียกกระบวนการนี้ว่า เพอร์ฟลูออรีนชัน (Perfluorination) ได้โครงสร้างที่เรียกว่า เตตระฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene) เมื่อโมเลกุลเรียงต่อกันจะได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่า พอลิตะตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ความแข็งแรงของพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอนจะส่งผลให้พอลิเมอร์มีแข็งแรง ทนทาน

การเติมกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) ลงไปในพอลิตะตระฟลูออโรเอทิลีนจะเป็นการเพิ่มส่วนของซัลโฟเนต (Sulfonate) ในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์สามารถดูดซับน้ำได้ เนื่องจากโมเลกุลของกรดซัลโฟนิกเป็นโมเลกุลที่ชอบน้ำ โดยโมเลกุลของกรดซัลโฟนิกจะสร้าง

พันธะที่ปลายของพอลิเมอร์ กลายเป็นหมู่ SO_3^- (รูปที่ 2.1) โดยที่บริเวณนี้แรงยึดเหนี่ยวพันธะระหว่างหมู่ SO_3^- กับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ก่อนข้างอ่อน ทำให้ไฮโดรเจนไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซัลโฟเนตฟลูออโรเอทิลีน [Larminie, 2000]

2.3.1.2 ขั้วไฟฟ้า [Appleby, 1989]

เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วคือขั้วแอโนดและขั้วแคโทด บางครั้งอาจมีขั้วที่ 3 คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกหรือแคโทด (Cathode) จะเป็นขั้วที่ไอออนบวกและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้ามาทำปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นขั้วลบหรือแอโนด (Anode) จะเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้ไอออนบวกและอิเล็กตรอน ขั้วไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่ำหรือความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าสูง และจะต้องมีความพรุนสูง เนื่องจากความพรุนของขั้วไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า ทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยามีมากขึ้นและช่วยให้การเคลื่อนที่ของแก๊สเชื้อเพลิงไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา การเคลื่อนที่ของแก๊สแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่จากชั้นการแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer) ไปยังบริเวณผิวหน้าระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและอิเล็กโทรไลต์
- เกิดการดูดซับของแก๊สบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ซึ่งปริมาณการดูดซับของแก๊สจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว (Specific surface area) ในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนขั้วไฟฟ้า

- การเกิดปฏิกิริยาของแก๊สบนตัวเร่งปฏิกิริยา ไอออนบวกหรือโปรตอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปอีกด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้า ซึ่งความสามารถในการเคลื่อนที่ของโปรตอนขึ้นกับความหนาของอิเล็กโทรไลต์

2.3.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่ทำหน้าที่ช่วยเร่งอัตราการเกิดของปฏิกิริยาโดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีซึ่งจะสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา กล่าวคือระดับพลังงานกระตุ้นจะแสดงถึงความยากง่ายในการเกิดปฏิกิริยา ถ้าปฏิกิริยาใดมีระดับพลังงานกระตุ้นต่ำ ปฏิกิริยานั้นจะเกิดได้ง่ายและเร็ว ในทางตรงกันข้ามถ้าปฏิกิริยาใดมีระดับพลังงานกระตุ้นสูง ปฏิกิริยานั้นจะเกิดได้ยากและช้า เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบจะทำให้ระดับพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยานั้นลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น [วิทยา, 2534]

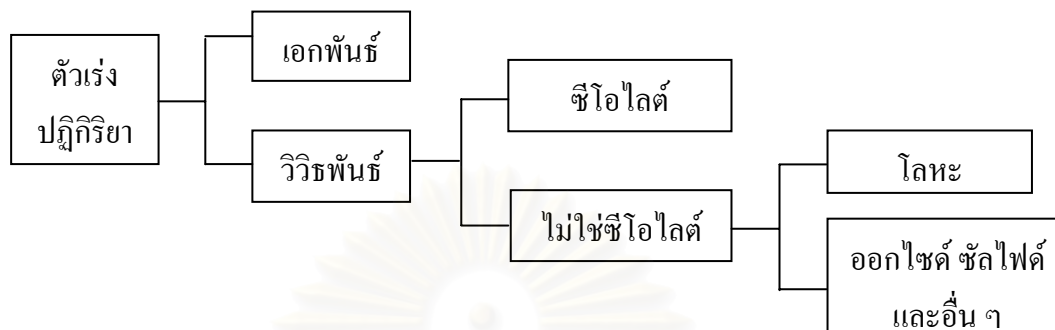
ตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงมีหน้าที่ 3 อย่างคือ ดูดซับแก๊ส (Adsorption) ส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transfer) และผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Surface reaction) ทั้งนี้การดูดซับแก๊สบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีการยึดเหนี่ยวได้หลายแบบ เช่น แบบโควาเลนต์ (Covalent bond) เป็นต้น

• ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา [Bond, 1987]

การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์คือ ทุกโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมเข้าไปในระบบจะมีลักษณะที่เหมือน ๆ กัน ดังนั้นรูปแบบการทำปฏิกิริยาจึงเหมือนกัน
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่คนละวัฏภาคกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนมากเป็นของแข็ง โดยโครงสร้างที่อยู่บนพื้นผิวเท่านั้นที่มีการทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น อะตอมไอออนหรือหมู่โครงสร้างที่อยู่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึก เช่น ที่มุม ขอบหรือบริเวณตอนกลาง จะมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกเหนือไปจากปฏิกิริยาที่ต้องการ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์นั้นยังแบ่งออกเป็นประเภทย่อย ๆ ได้อีก 2 ประเภทคือ กลุ่มของซีโอไลต์หรือ Molecular sieve และกลุ่มที่สองคือพวกที่ไม่ใช่

ซีโอไลต์ ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นออกไซด์ ซัลไฟด์ของโลหะต่าง ๆ การจัดแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นแสดงตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา [Bond, 1987]

● องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารหลายชนิด แต่พอจะแบ่งออกได้ดังนี้

1. สารเร่งปฏิกิริยา (Active species) เป็นสารที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาอาจประกอบด้วยสารเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น แต่กรณีที่สารเร่งปฏิกิริยามีราคาแพงหรือมีพื้นที่ผิวต่ำจะนิยมใช้วิธีเคลือบสารเร่งปฏิกิริยาลงบนตัวรองรับ
2. ตัวรองรับ (Supporter) โดยส่วนใหญ่เป็นสารที่มีราคาถูกและมีพื้นที่ผิวสูง ทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่สารเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ในบางกรณีจะมีอันตรกิริยากันระหว่างตัวรองรับและสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำให้สารเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยทั่วไปจะเลือกใช้ตัวรองรับที่เฉื่อยและไม่ทำปฏิกิริยา แต่ในบางกรณีตัวรองรับจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยา เช่น Bi-function catalyst
3. โพรโมเตอร์ (Promoter) เป็นสารที่ไม่ได้ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาโดยตรง จะเติมเข้าไปในปริมาณเล็กน้อยในขณะเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้สารเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ได้ดีขึ้น เช่น สามารถลดการหลอม (Fouling) และการเกาะรวมตัว (Sintering) ของตัวเร่งปฏิกิริยาในขณะเผา โดยทั่วไปนิยมแบ่งโพรโมเตอร์ออกเป็น 2 ชนิดคือ เทกเจอร์อัลโพรโมเตอร์ (Textural promoter) และสตรักเจอร์อัลโพรโมเตอร์ (Structural promoter) โดยเทกเจอร์อัล

โพรมอเตอร์เป็นสารเฉื่อยใส่เข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อป้องกันการรวมตัวของผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ให้รวมตัวเนื่องจากความร้อน ลักษณะเทอโรลโพรมอเตอร์ต้องมีขนาดเล็ก กระจายตัวได้ดีและมีจุดหลอมเหลวสูง ส่วนสตรักเทอโรลโพรมอเตอร์มีผลทางด้านการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา ลักษณะของสตรักเทอโรลโพรมอเตอร์คือ อัตราเร็วของปฏิกิริยา พลังงานกระตุ้น อันดับของปฏิกิริยา และเอนทัลปีของการดูดซับอาจเปลี่ยน [Satterfield, 1980]

ในเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าขึ้นที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเท่านั้น ดังนั้นการเกาะและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าจึงส่งผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Overpotential) คำนวณได้จากสมการที่ 2.1 [Lipkowski, 1998]

$$j = j_0 e^{\frac{2\alpha F}{RT}(E - V)} \quad (2.1)$$

โดยที่

V	คือ ศักย์ไฟฟ้าในเซลล์ (โวลต์)
E	คือ ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นผันกลับได้ (โวลต์)
T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
α	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ
R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.3145 จูลต่อ โมลเคลวิน)
F	คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 คูอมบ์ต่อ โมล)
j	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)
j_0	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)

ตารางที่ 2.2 และ 2.3 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาเอนโดและแคโทดชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะชนิดเดียว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะสองชนิด (Bi-metallic electrocatalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะสามชนิด (Ternary electrocatalyst) สำหรับใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

ตารางที่ 2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ [Mehta, 2003]

	ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นโลหะชนิดเดียว	ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นโลหะสองชนิด	ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นโลหะสามชนิด
Pt/C	X		
Pt-Co/C		X	
Pt-Cr/C		X	
Pt-Fe/C		X	
Pt-Ir/C		X	
Pt-Mn/C		X	
Pt-Mo/C		X	
Pt-Ni/C		X	
Pt-Pd/C		X	
Pt-Rh/C		X	
Pt-Ru/C		X	
Pt-V/C		X	
Au-Pd/C		X	
Pt-Ru-Al ₄			X
Pt-Ru-Mo/C			X
Pt-Ru-Cr/C			X
Pt-Ru-Ir/C			X
Pt-Ru-Mn/C			X
Pt-Ru-Co/C			X
Pt-Ru-Nb/C			X
Pt-Ru-Ni/C			X
Pt-Ru-Pd/C			X
Pt-Ru-Rh/C			X
Pt-Ru-W/C			X
Pt-Ru-Zr/C			X
Pt-Re-(MgH ₂)			X

ตารางที่ 2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาแคโทดชนิดต่าง ๆ [Mehta, 2003]

	ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นโลหะชนิดเดียว	ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นโลหะสองชนิด
Pt/C	X	
Pt-Ni/C		X
Pt-Co/C		X

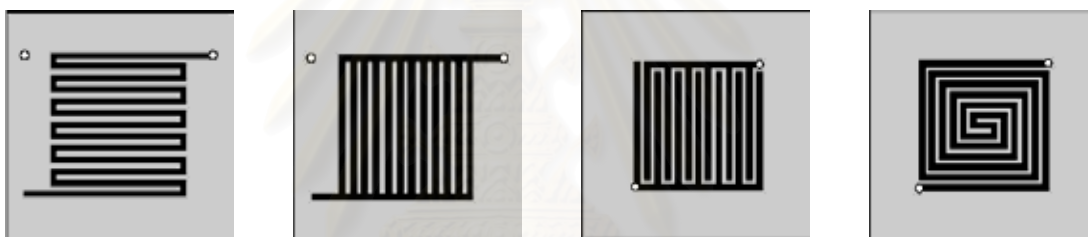
2.3.2 แผ่นช่องทางการไหล

แผ่นช่องทางการไหล (Flow field plate or Bipolar plates) ที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงมี 3 ชนิดดังนี้

1. แผ่นช่องทางการไหลของแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน (Non-porous graphite plates) ทำขึ้นจากของผสมแกรไฟต์ ข้อดีของแผ่นช่องทางการไหลชนิดนี้คือนำไฟฟ้าได้ดี เสถียรภาพทางเคมีและมีความหนาแน่นต่ำ ส่วนข้อเสียคือการขึ้นรูปยากและราคาแพง
2. แผ่นช่องทางการไหลของโลหะ (Metallic plate) ทำขึ้นจากโลหะต่าง ๆ เช่น อะลูมิเนียม สแตนเลส ไทเทเนียมและนิกเกิล โดยมีข้อดีคือนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี แก๊สซึมผ่านเนื้อโลหะได้ยาก ราคาถูกและให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตรสูง ส่วนข้อเสียคือในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีภาวะเป็นกรดสูง มีผลให้เกิดการป้องกันตัวเองของโลหะ โดยจะเกิดฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวโลหะ เพื่อลดการกัดกร่อนของตัวโลหะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า แพสซีเวชัน (Passivation) ซึ่งมีผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะสูงขึ้น วิธีการแก้ไขคือต้องนำโลหะไปผ่านกระบวนการเคลือบผิวโลหะ (Coating) ก่อน วัสดุที่ใช้ได้แก่ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น
3. แผ่นช่องทางการไหลของคอมโพสิต (Composite plate) มีข้อดีคือราคาถูกง่ายต่อการขึ้นรูป ทนต่อการเกิดการกัดกร่อนและน้ำหนักเบา โดยแผ่นช่องทางการไหลของคอมโพสิต แบ่งตามวัสดุที่ใช้ได้เป็น 2 ชนิดคือ Metal-based composite bipolar plate และ Carbon-based composite bipolar plate โดย Metal-based composite bipolar plate จะใช้แกรไฟต์ที่มีรูพรุน (Porous graphite) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) และเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ส่วนอีกชนิดคือ Carbon-based composite bipolar plate ใช้เทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Poly vinylidene fluoride) หรือเรซินของ

เทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolics resin) อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) และ ไวนิลเอสเทอร์เรซิน (Vinyl ester resin) ผสมกับสารเติมแต่งซึ่งอาจเสริมแรงด้วย เส้นใย

ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นช่องทางการไหลจะถูกเจาะร่องเป็นแบบต่าง ๆ เช่น แบบ เซอร์เพนทีน (Serpentine) แบบขนาน (Parallel) แบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous) และแบบ เส้นเวียนกันหอย (Spiral) เพื่อกำหนดทิศทางและอัตราการไหลของแก๊ส อีกทั้งช่วยกระจายแก๊ส ให้สัมผัสกับขั้วไฟฟ้า ทำให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น ลักษณะการเจาะร่อง ของแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สแสดงตามรูปที่ 2.3 หน้าที่ของแผ่นช่องทางการไหลคือ แยกเซลล์แต่ละเซลล์ออกจากกันเพื่อไม่ให้แก๊สที่ไหลผ่านขั้วแคโทดของเซลล์หนึ่งผสม เข้ากับแก๊สที่ป้อนเข้าขั้วแอโนดของเซลล์ที่อยู่ติดกัน นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์ต่อเซลล์ ช่วยในการป้องกันการรั่วของแก๊ส ช่วยในการจัดการน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาและการระบายความร้อน



แบบเซอร์เพนทีน

แบบขนาน

แบบไม่ต่อเนื่อง

แบบเส้นเวียนกันหอย

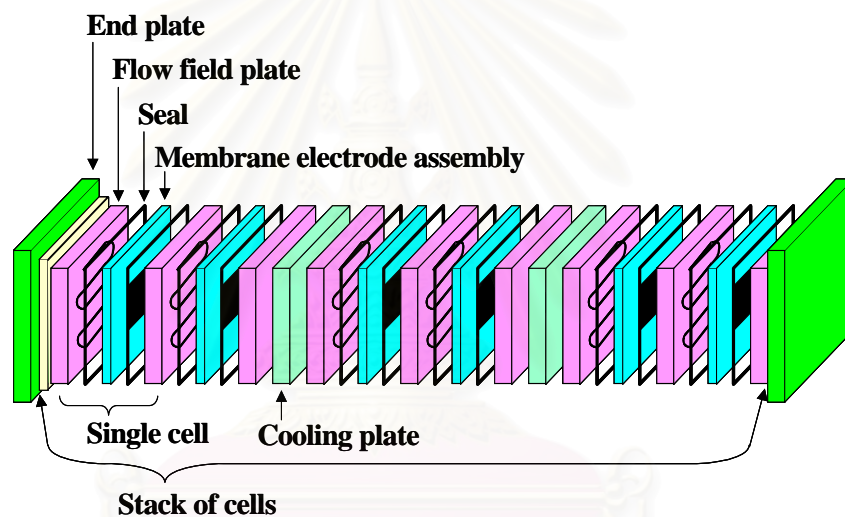
รูปที่ 2.3 ช่องทางการไหลของแก๊สแบบต่าง ๆ [Mennola, 2000]

ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน หน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า จะถูกประกบด้วยแผ่นช่องทางการไหล โดยระหว่างขั้วไฟฟ้าและแผ่นช่องทางการไหลจะมีชั้นการ แพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer) ซึ่งทำขึ้นจากกระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอนที่มีรูพรุน มีความหนาประมาณ 100-300 ไมโครเมตร นำไฟฟ้าได้ดี ส่วนมากจะนำไปผ่านการทำความสะอาด ด้วยฟลูออโรพอลิเมอร์และคาร์บอนดำเพื่อปรับปรุงการจัดการน้ำและคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยมี หน้าที่เชื่อมกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและแผ่นช่องทางการไหล อีกทั้งช่วยกระจายแก๊สให้กับ ขั้วไฟฟ้า สำหรับน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะออกตรงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าและยอมให้น้ำผ่านระหว่าง ขั้วไฟฟ้าและแผ่นช่องทางการไหล ดังนั้นชั้นการแพร่ของแก๊สจะต้องมีความเหมาะสมในการ ระบายไอน้ำ เพื่อให้มีความชื้นและไม่ให้น้ำท่วมเซลล์ที่ขั้วแคโทด

2.3.3 ตัวประสาน

ตัวประสาน (Seal) ทำขึ้นจากยางซิลิโคน โดยมีหน้าที่เป็นตัวประสานแผ่นช่องทางการไหลด้านแอโนดให้ยึดกับหน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า ทำนองเดียวกันยางซิลิโคนก็จะเป็นตัวประสานแผ่นช่องทางการไหลด้านแคโทดยึดกับหน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า

ในเซลล์เชื้อเพลิงแถวประกอบด้วยเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวหลายเซลล์ต่อกัน โดยมีแผ่นทำความเย็นอยู่ระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเป็นช่วง ๆ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวจะประกอบด้วยหน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้าอยู่ตรงกลาง โดยมีตัวประสานประกบทั้งสองด้านและมีแผ่นช่องทางการไหลประกบอีกทีหนึ่ง ที่ปลายสุดของเซลล์เชื้อเพลิงแถวจะถูกประกบด้วยแผ่นเก็บกระแสไฟฟ้า (Current collector plate) เป็นแผ่นสุดท้ายตามรูปที่ 2.4



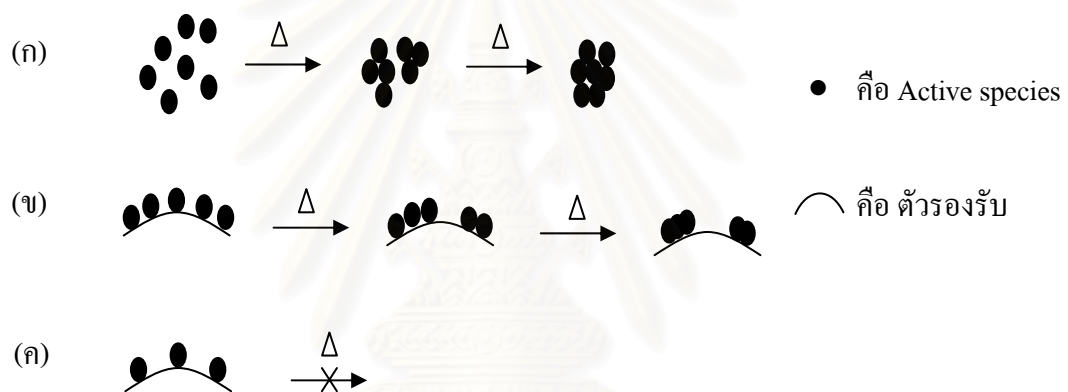
รูปที่ 2.4 การประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเซลล์เดี่ยวเป็นแบบแถว [Mehta, 2003]

2.4 ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง

การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นกับตัวแปรหลายตัวด้วยกันคือ ชนิดของตัวรองรับ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า

2.4.1 ตัวรองรับคาร์บอน

เนื่องจากปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นฐานนั้นจะเกิดขึ้นกับอะตอมหรือไอออนที่อยู่บนพื้นผิวของ Active species เท่านั้น อะตอมหรือไอออนที่อยู่ลึกลงไปจะไม่มีโอกาสเข้ามาร่วมทำปฏิกิริยาคู่ ในกรณีที่ Active species เป็นสารที่มีราคาแพงจะต้องเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่บนพื้นผิวมากที่สุด โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดเล็ก ๆ แต่วิธีการนี้ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวได้มาก นอกจากนี้เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงอนุภาคเล็ก ๆ เหล่านี้จะเกิดการหลอมรวมกันอีกทางเล็กน้อยที่นิยมทำคือนำเอา Active species ไปเคลือบลงบนวัสดุอื่นที่มีพื้นที่ผิวสูงคือตัวรองรับ ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของ Active species และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ Active species อีกทั้งยังลดการเกิดการหลอมรวมตัวกันของ Active species ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บทบาทของตัวรองรับที่มีต่อการกระจายตัวของ Active species [Bond, 1987]

(ก) ไม่มีตัวรองรับ Active species หลอมรวมตัวกันได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน

(ข) มีตัวรองรับ Active species ความเข้มข้นสูงจะหลอมรวมตัวกันที่อุณหภูมิสูง

(ค) มีตัวรองรับ Active species ความเข้มข้นต่ำจะหลอมรวมตัวกันน้อย

ในการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ จะต้องพิจารณาถึงตัวรองรับที่ใช้ให้เหมาะสม จึงจะทำให้ประสิทธิภาพที่ได้ดีที่สุด ตัวรองรับที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีหลายชนิด เช่น ผงคาร์บอน อะลูมินา ซิลิกา เป็นต้น สำหรับในเซลล์เชื้อเพลิงตัวรองรับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในขณะนี้คือ พกคาร์บอน เพราะคาร์บอนมีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าและมีความพรุนสูงช่วยในการเคลื่อนที่ของแก๊สเชื้อเพลิงและโปรตอน และยังช่วยดูดซับน้ำภายในระบบเพื่อป้องกันการเกิดชั้นฟิล์มของน้ำที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ความต้านทานในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นตัวรองรับเข้าไปในขั้วไฟฟ้ามีส่วนทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและทำให้ความหนาของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การแพร่ของเชื้อเพลิงไปยังบริเวณเกิดปฏิกิริยาที่ยากยิ่งขึ้น อัตราการ

เกิดปฏิกิริยาข้างล่าง ดังนั้นการเลือกชนิดของตัวรองรับควรเลือกให้เหมาะสมกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการ เพราะตัวรองรับมีหน้าที่สำคัญคือ ช่วยในการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา ช่วยในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยากับอนุภาคตัวรองรับใกล้เคียง เพิ่มความแข็งแรงของขั้วไฟฟ้า

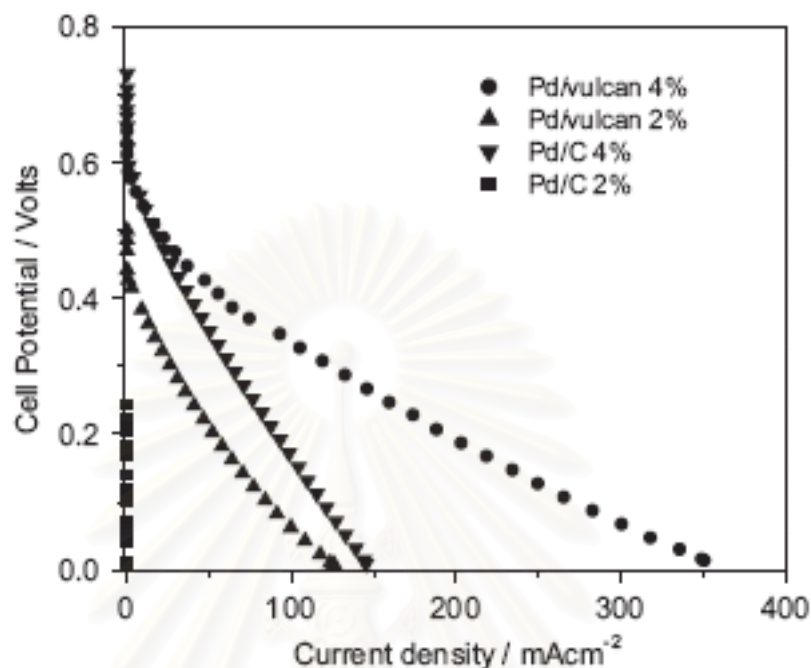
2.4.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเชื้อเพลิงแลกเปลี่ยนโปรตอน นิยมใช้คือ แพลทินัม เนื่องจากมีความทนต่อการกัดกร่อนและทำให้สมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้าเสถียรและว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนได้ดีกว่าพลาตินัมหรือโลหะอีกหลายชนิดในโลหะตระกูลสูงได้แก่ ทอง รูทีเนียม โรเดียม เป็นต้น นอกจากนี้การใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังมีการใช้โลหะผสมของแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้า เพราะโลหะผสมของแพลทินัมทนต่อความเป็นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีกว่าแพลทินัม การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใดนั้นจะต้องคำนึงถึงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของโลหะที่ใช้ ปฏิกิริยาที่มีค่า j_0 มาก การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงน้อย ในทางตรงกันข้ามปฏิกิริยาที่มีค่า j_0 น้อย การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงมาก และจะต้องพิจารณาถึงสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้อายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยานานรวมถึงการเกาะติดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ นอกจากนี้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นสำคัญคือสมบัติต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาอันได้แก่ พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (Active surface area) ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา การกระจายตัว เพราะคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าและสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า

2.4.3 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขนาด พื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยา หากใช้สารละลายที่มีปริมาณของโลหะมากจะทำให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามถ้าหากใช้สารละลายที่มีปริมาณของโลหะน้อยจะทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็ก จากการศึกษาของ Moreira (2004) พบว่าเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณที่มากขึ้นโดยใช้ตัวรองรับและภาวะการเตรียมเดียวกัน จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้น ตามรูปที่ 2.6 พบว่าเมื่อ Pd/Vulcan ที่ 4% จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า Pd/Vulcan 2% สำหรับตัวรองรับคาร์บอนเมื่อใช้ Pd/C 4% ก็จะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า Pd/C 2% เนื่องจากการ

เพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลในการช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีและโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน



รูปที่ 2.6 โพลาริเซชันของขั้วไฟฟ้า Pd/Vulcan และ Pd/C ในชั้นแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน โปรตอน [Moreira, 2004]

2.4.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความพรุนและขนาดของรูพรุนในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้าคือ ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปก็จะมีส่วนทำให้อนุภาคเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว อนุภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่และมีความพรุนต่ำและอาจมีส่วนทำให้สารประกอบบางตัวสลายตัวได้ จึงควรใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของสารประกอบที่ต้องการ แต่ถ้าใช้อุณหภูมิในการเตรียมต่ำเกินไป ขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็ก ความพรุนจะสูง แต่อาจต้องใช้เวลาในการทำนานเกินไป การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดิวซ์นั้นสามารถใช้เครื่อง TPR (Temperature-Programmed Reduction)

นอกจากอุณหภูมิแล้ว ระยะเวลาในการรีดิวซ์และการเผา (Calcination) ก็มีผลเช่นเดียวกับอุณหภูมิคือ มีผลต่อขนาดของรูพรุนและความหนา เป็นที่ทราบกันดีว่าความพรุนมีผลต่อการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในขั้วไฟฟ้า ดังนั้นควรพยายามทำให้ขั้วไฟฟ้ามีความพรุนที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า

2.4.5 วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า

การเตรียมขั้วไฟฟ้ามักมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การสเปรย์ การพิมพ์หรือการระบาย การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีจะมีการเตรียมและองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป โดยลักษณะการเตรียมและองค์ประกอบของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมมีผลต่อคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ได้ เช่น ความหนา ความพรุน การนำกระแสไฟฟ้าและความต้านทาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า ซึ่งวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.5 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า จึงให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการแปรรูปพลังงานทั่ว ๆ ไปทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งมักจะต้องเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานกลก่อนแล้วจึงเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องยนต์ที่ใช้แปรรูปพลังงานชนิดนี้มีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เพราะเป็นการแปรรูปพลังงานทางเคมีโดยตรงและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับ เซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สธรรมชาติหรือไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปยังขั้วแอโนดและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้แก๊สไฮโดรเจนนี้ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และอิเล็กตรอนตามปฏิกิริยาที่ (2.2) ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งถ่ายไปที่ขั้วแคโทดผ่านตัวนำจากภายนอก ส่วนไฮโดรเจนไอออนจะเกิดการแพร่ผ่านอิเล็กโตรไลต์ไปยังขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชันบนตัวเร่งปฏิกิริยาตามปฏิกิริยาที่ (2.3) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงแสดงได้ดังปฏิกิริยาที่ (2.4)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



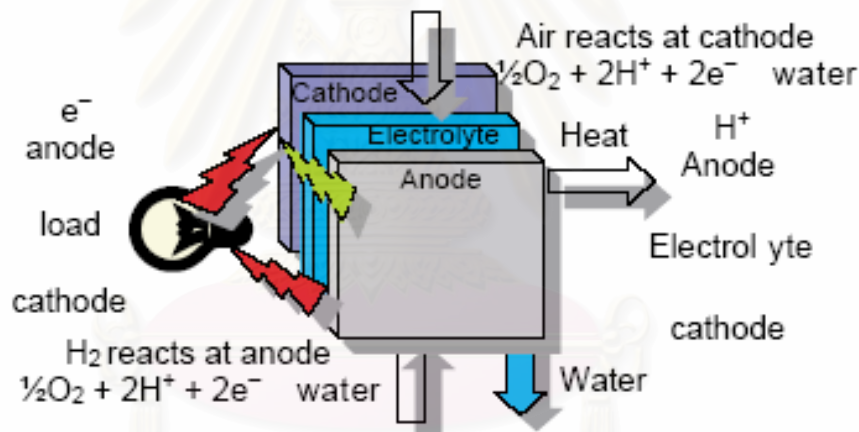
ปฏิกิริยารีดักชัน (เมื่อใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)



ปฏิกิริยารวม



รูปที่ 2.7 แสดงหลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน บริเวณตรงกลางของรูปจะเป็นชั้นของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ส่วนทางด้านซ้ายเป็นชั้นของขั้วแอโนด ส่วนทางด้านขวาเป็นชั้นของขั้วแคโทด จากการทำงานของเซลล์พบว่าปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์ในขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าที่ขั้วแอโนด เนื่องจากค่าอัตราการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนอยู่ประมาณ 10^5 เท่า [Larminie, 2000] จึงทำให้ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนเป็นขั้นที่ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [Sopian, 2006]

2.6 การสูญเสียศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะมีการสูญเสียประสิทธิภาพเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible reaction) บนขั้วไฟฟ้าโดยจะเกิดมากที่ฝั่งแคโทด ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ลดลง โดยค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสดงโดยสมการที่ (2.5)

$$V = E - \frac{RT}{2\alpha F} \ln\left(\frac{j}{j_0}\right) = E - \frac{RT}{2\alpha F} \ln j + \frac{RT}{2\alpha F} \ln j_0 \quad (2.5)$$

ตัวแปรที่ควบคุมสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงคือ อัตราการแลกเปลี่ยนแบบผันกลับไม่ได้ (Exchange irreversibility) ส่วนเทอมทางขวามือของสมการข้างต้นคือ $(RT/2\alpha F)\ln j_0$ จะรวมเทอมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน ปฏิกริยาที่มีค่า j_0 มาก คือ ลักษณะของปฏิกริยาที่จะบอกถึงการผันกลับได้ (Reversible) ในทางตรงกันข้ามปฏิกริยาที่มีค่า j_0 น้อยคือ ลักษณะของปฏิกริยาที่จะบอกถึงการผันกลับไม่ได้ (Irreversible หรือ Sluggish) ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เป็นอย่างมาก ดังนั้นการพิจารณาการใช้โลหะชนิดใดเป็นตัวเร่งปฏิกริยาจะต้องพิจารณาถึงค่า j_0 นี้ด้วย โดยค่า j_0 ของโลหะชนิดต่าง ๆ สำหรับปฏิกริยาขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งพบว่าค่า j_0 สำหรับปฏิกริยารีดักชันของออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าประมาณ 10^7 เท่า ของปฏิกริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน เมื่อพิจารณาจากโลหะชนิดเดียวกัน

ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนของโลหะต่าง ๆ [Savagado, 1999 และ Kinoshita, 1992]

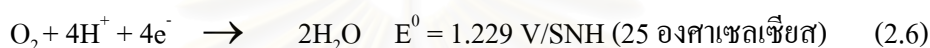
ปฏิกริยาขั้วไฟฟ้า							
ปฏิกริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน				ปฏิกริยารีดักชันของออกซิเจน			
โลหะ	$\text{Log } j_0 (\text{A/m}^2)$	โลหะ	$\text{Log } j_0 (\text{A/m}^2)$	โลหะ	$\text{Log } j_0 (\text{A/m}^2)$	โลหะ	$\text{Log } j_0 (\text{A/m}^2)$
Pd	1.0	Nb	-2.8	Pt	-5.0	Rh	-7.0
Pt	0.9	Ti	-4.2	Os	-6.0	Ru	-8.0
Rh	0.4	Cd	-6.6	Ir	-7.0	Au	-9.0
Ir	0.3	Mn	-6.9	Pd	-7.0		
Ni	-1.2	Th	-7.0				
Au	-1.4	Pb	-8.0				
W	-1.9	Hg	-8.3				

2.7 ปฏิกริยารีดักชันของออกซิเจน [Kinoshita, 1992]

เนื่องจากปฏิกริยารีดักชันของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นปฏิกริยาที่เกิดช้า จึงเป็นปฏิกริยาที่ควบคุมประสิทธิภาพการทำงานภายในเซลล์เชื้อเพลิง ส่งผลให้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางตั้งแต่ปี 1960 เกี่ยวกับวิถีทางและกลไกของการเกิดปฏิกริยารีดักชันของออกซิเจน ปฏิกริยารีดักชันของออกซิเจนเป็นปฏิกริยาหลายขั้นตอน (Multi-step reaction) ซึ่งในสารละลายที่เป็นกรดจะเกิดขึ้นได้ 2 วิถีทาง คือ วิถีทางตรงและวิถีทางเปอร์ออกไซด์ ขึ้นอยู่กับการทำงานและชนิดของตัวเร่งปฏิกริยา

2.7.1 วิธีทางตรงหรือวิธีทาง 4 อิเล็กตรอน

วิธีทางตรงหรือวิธีทาง 4 อิเล็กตรอน (4-electrons pathway) จะประกอบด้วย การเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนเดียว โดยออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์กลายเป็นน้ำได้โดยตรง ดังปฏิกิริยาที่ (2.6) วิธีทางนี้มักเกิดกับตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะตระกูลสูง เช่น แพลทินัม พาลาเดียม (Palladium) และเงิน (Silver) โลหะออกไซด์ เช่น เพอร์รอฟสกาย (Perovskites) และไพโรคลอ (Pyrochlores) และโลหะทรานซิชันที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่บางตัว เช่น ไอรอนเตตระซัลไฟด์โฟเนตฟาทาโลไซเอมีน (Iron tetrasulfonated phthalocyanine) และไดโคบอลต์เฟซทูเฟซไดปอร์ฟิริน คอมเพล็กซ์ (Dicobalt face-to-face diporphyrin complexes) บนแกรไฟต์



2.7.2 วิธีทางเปอร์ออกไซด์หรือวิธีทาง 2 อิเล็กตรอน

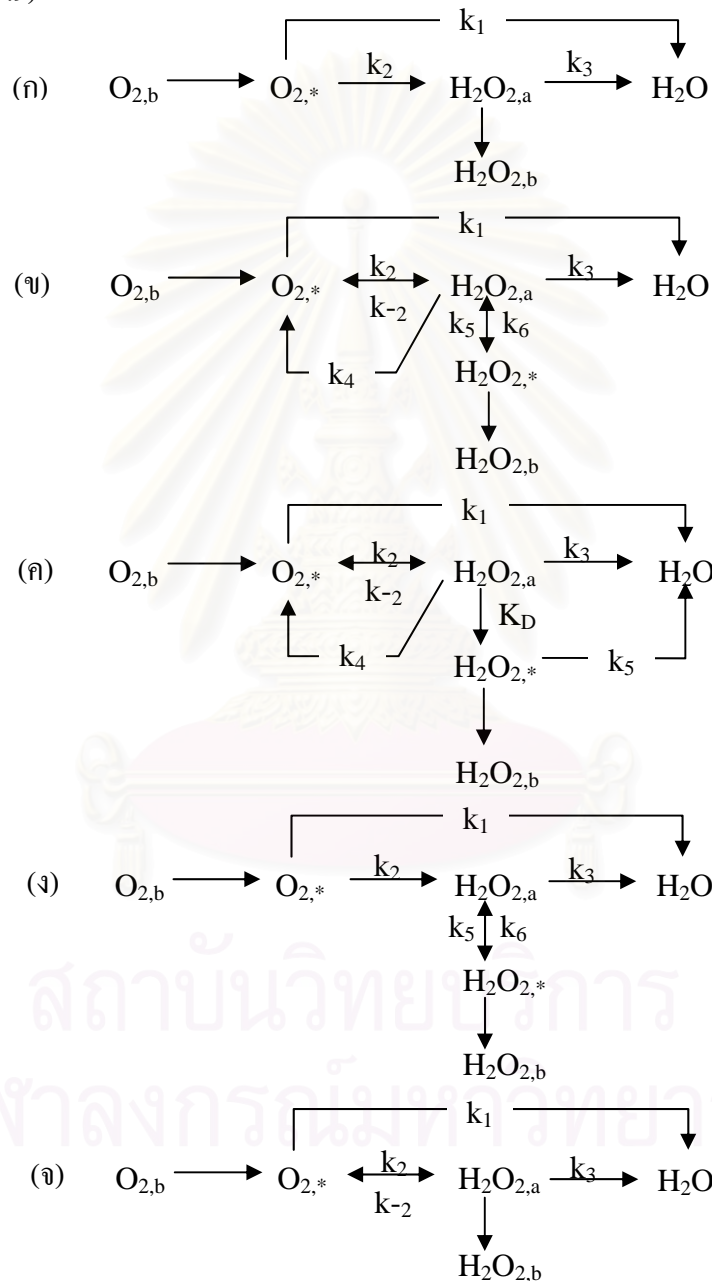
วิธีทางเปอร์ออกไซด์หรือวิธีทาง 2 อิเล็กตรอน (2-electrons pathway) ประกอบด้วย การเกิดเปอร์ออกไซด์ในเฟสสารละลาย ถ้าวิธีทางนี้แยกจำแนกในสารละลาย ผลก็คือออกซิเจนจะเกิดการหมุนเวียนผ่านปฏิกิริยา (2.7) ถึง (2.9) ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และปฏิกิริยารวมคือวิธีทาง 4 อิเล็กตรอน ส่วนมากวิธีทางนี้จะเกิดขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวก แกรไฟต์ คาร์บอน ทอง และปรอท (Mercury) โลหะออกไซด์ของนิกเกิลและโคบอลต์ โลหะทรานซิชันออกไซด์ เช่น นิกเกิลออกไซด์ (NiO) และสไปเนล (Spinels) โลหะทรานซิชันที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่บางตัว เช่น โคบอลต์เตตระซัลไฟด์โฟเนตฟาทาโลไซเอมีน (Cobalt tetrasulfonated phthalocyanine) และโคบอลต์เตตระเมทอกซีฟีนิล ปอร์ฟิริน (Cobalt tetramethoxyphenyl porphyrin)



โดยเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน 2 อิเล็กตรอนต่อไป



ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นปฏิกิริยาหลายอิเล็กตรอน ซึ่งจะประกอบด้วยปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยา รวมถึงปฏิกิริยาควบคุมหลายปฏิกิริยาเช่นกัน รูปที่ 2.8 แสดงวิถีทางสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา k_1 , k_2 และ k_3 แสดงถึงค่าคงที่ของปฏิกิริยา (2.6) (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ ส่วนค่า k_4 แสดงถึงค่าคงที่ของปฏิกิริยาการเกิดเปอร์ออกไซด์ ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (2.9)



รูปที่ 2.8 แบบจำลองสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดูดซับบนขั้วไฟฟ้าแบบต่างๆ โดย (ก) Damjanovic (ข) Wroblowa (ค) Appleby Zavy (ง) Zurilla และ (จ) Bagotskii เมื่อ A_s คือสาร A ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า A_* คือสาร A ที่บริเวณใกล้เคียงกับพื้นผิวขั้วไฟฟ้า และ A_b คือสาร A ที่อยู่ในสารละลาย [Kinoshita, 1992]

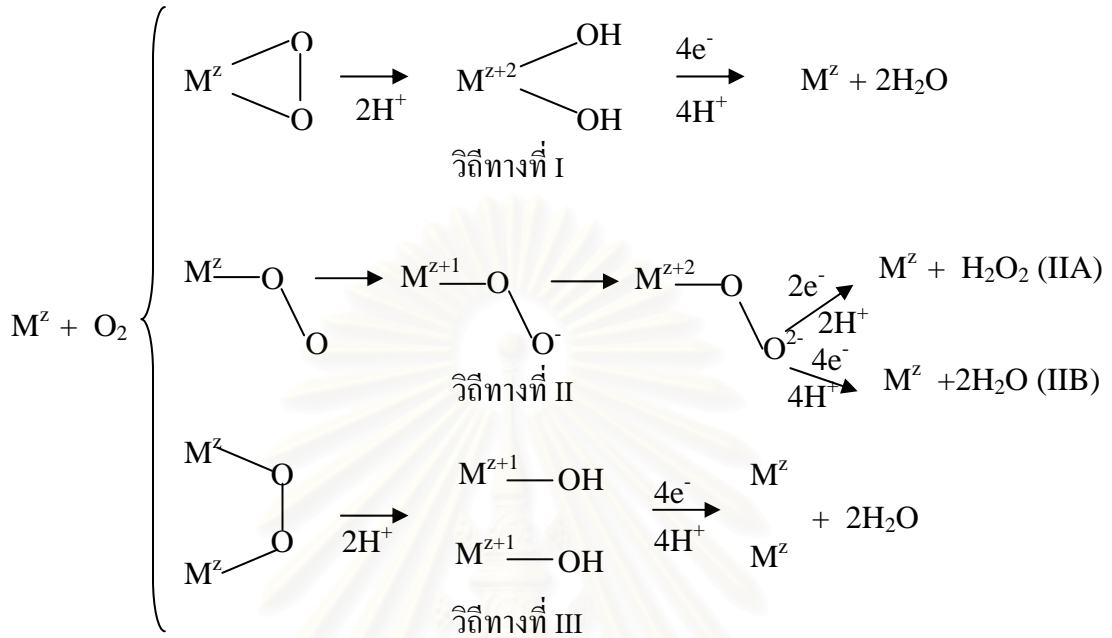
การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะเริ่มต้นจากการเกิดการดูดซับของออกซิเจนบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า หรือ Active site หลักการของ Active site ในตัวเร่งปฏิกิริยาวีธีพันธุได้ถูกค้นพบในกลางปี 1920 โดย Taylor (1926) และได้มีการศึกษาเพิ่มเติมโดย Boudart (1969) ต่อมา Yeager (1986) ได้เสนอแบบจำลองอันตรกิริยาสำหรับออกซิเจนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์แทรนซิชัน 3 แบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 คือ



รูปที่ 2.9 แบบจำลองของออกซิเจนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะชนิดต่าง ๆ [Kinoshita, 1992]

1. แบบจำลอง Griffiths โดยโมเลกุลออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาด้านข้างของวงโคจร π (π -orbital) ของตัวเองและเกิดอันตรกิริยากับส่วนที่ว่างในวงโคจร d_{x^2} (d_{x^2} -orbital) ของธาตุแทรนซิชัน ไอออนหรืออะตอมโลหะ พันธะ O-O เป็นพันธะอย่างอ่อน ซึ่งการเพิ่มความยาวของพันธะจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างโลหะกับออกซิเจนแข็งแรงขึ้นและเป็นสิ่งที่กำหนดการดูดซับออกซิเจน ซึ่งสามารถทำได้โดยการจำลองการเพิ่มโปรตอนและ การเพิ่มวาเลนซ์ของโลหะแทรนซิชัน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาตามวิถีทางที่ I ตามรูปที่ 2.10
2. แบบจำลอง Pauling โมเลกุลออกซิเจนจะเกิดอันตรกิริยากับขั้วไฟฟ้าในตำแหน่งปลายสุด ด้วย π ออบิตอลของออกซิเจนเกิดอันตรกิริยากับ d_{x^2} ออบิตอลของโลหะแทรนซิชัน การถ่ายโอนประจุบางส่วนกับโครงสร้างของซูปเปอร์ออกไซด์และเกิดเปอร์ออกไซด์ระหว่างกลางก็จะเกิดการดูดซับของออกซิเจน ในแบบจำลองนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ น้ำซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาโดยวิถีทาง 4 อิเล็กตรอน ส่วนเปอร์ออกไซด์เกิดจากปฏิกิริยาโดยวิถีทาง 2 อิเล็กตรอน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาตามวิถีทางที่ II ตามรูปที่ 2.10
3. แบบจำลอง Bridge ก็จะทำให้เกิดการดูดซับด้านข้างของออกซิเจน ซึ่งจะเกิดการดูดซับที่สองบริเวณด้วยการเติมบางส่วนของ d ออบิตอลสำหรับพันธะกับ π^* ออบิตอลของออกซิเจนตามวิถีทางที่ III ตามรูปที่ 2.10 อันตรกิริยาโดยแบบจำลอง Bridge

ให้ผลออกซิเดชันและรีดักชันของบริเวณที่ดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยาค้ำกับแบบวิถีทางที่ I



รูปที่ 2.10 วิถีทางของออกซิเจนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะชนิดต่าง ๆ [Kinoshita, 1992]

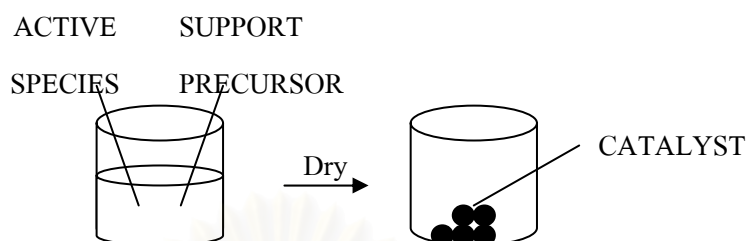
2.8 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา [Bond, 1987]

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีหลายวิธี แต่ที่สำคัญมี 2 วิธี คือ วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-Precipitation) และวิธีการแพร่ซึม (Impregnation)

2.8.1 วิธีการตกตะกอนร่วม

การเตรียมโดยวิธีการตกตะกอนร่วมนั้น สารเร่ง โพรโมเตอร์ และตัวรองรับจะถูกผสมเข้าด้วยกันในรูปแบบสารละลาย จากนั้นทำการระเหยเอาตัวทำละลายออกเพื่อให้ของผสมตกตะกอนออกมาตามรูปที่ 2.11 ข้อดีของวิธีนี้คือ การกระจายตัวของสารเร่งเป็นไปอย่างสม่ำเสมอในระดับโมเลกุล ข้อเสียของวิธีนี้คือสารเร่งบางส่วนจะฝังอยู่ภายในเนื้อของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ถ้าหากตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารเร่งตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ในการเตรียมจะต้องพิจารณาอัตราเร็วในการตกตะกอนของเกลือโลหะที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้

การควบคุมการตกตะกอนทำได้โดยการเลือกใช้เกลือที่เหมาะสม ค่าความเป็นกรด-เบส และ อุณหภูมิของสารละลาย



รูปที่ 2.11 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม [Bond, 1987]

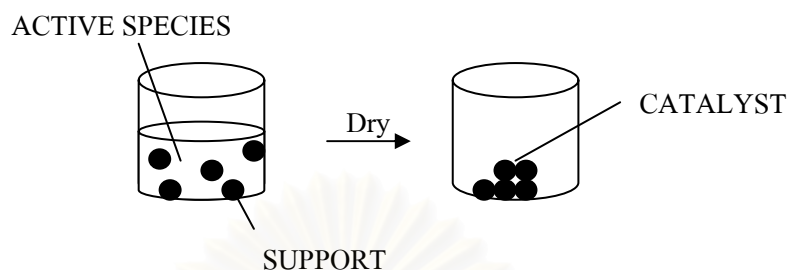
2.8.2 วิธีการแพร่ซึม

การเตรียมด้วยวิธีการแพร่ซึมเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ในวิธีการนี้จะนำเอาตัวรองรับ ซึ่งมักเป็นวัสดุที่มีรูพรุนมาสัมผัสกับสารละลายที่มี Active species ละลายอยู่ ข้อดีของวิธีการนี้คือ ตัวรองรับแต่ละตัวจะได้รับ Active species สม่ำเสมอ สามารถควบคุมการกระจายตัวของ Active phase ให้อยู่เพียงแคผิวบนหรือแพร่เข้าไปถึงภายในของตัวรองรับได้ ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะใช้วิธีนี้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ข้อเสียของวิธีการนี้คือ การตกตะกอนที่ไม่พร้อมกันของเกลือของโลหะตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป นอกจากนี้อาจเกิดการละลายของตัวรองรับขึ้นได้ ซึ่งสามารถควบคุมการละลายนี้ได้โดยการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแพร่ซึมบนตัวรองรับ สามารถแบ่งขั้นตอนการเตรียมที่สำคัญได้ 4 ขั้นตอนดังนี้ [Bond, 1987]

2.8.2.1 การเตรียมสารตั้งต้นและ Active phase

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีแพร่ซึมเริ่มจากนำตัวรองรับใส่ลงในสารละลายที่เหมาะสมที่มี Active species ต่อจากนั้นทำการระเหยออกโดยการควบคุมอุณหภูมิหรือปรับค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายไปพร้อมกันเพื่อให้ Active species ตกค้างอยู่บนตัวรองรับตามรูปที่ 2.12 โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของโลหะที่เตรียมได้นั้นจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย ถ้าสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูงจะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้าม ถ้าสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะต่ำจะทำให้อนุภาคมีขนาดเล็ก สำหรับการเตรียมตัวเร่ง

ปฏิกิริยาควรที่จะเตรียมให้อนุภาคของสารมีขนาดเล็กที่สุด เนื่องจากอัตราเร็วของปฏิกิริยา
 ค่ะตะไลซิสจะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวของส่วนที่เป็น Active phase



รูปที่ 2.12 การเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชัน [Bond, 1987]

ส่วนตัวรองรับที่เปียกน้ำหรือมีออกซิเจนดูดซับบนพื้นผิวจะทำให้เกิดแรงแคปิลารี (Capillary force) ที่จะดึงน้ำเข้าไปในรูพรุน เช่น อะลูมินา ซิลิกาและถ่านกัมมันต์หลายชนิด สำหรับตัวรองรับที่ไม่เปียกน้ำหรือไม่มียุติออกซิเจนดูดซับบนพื้นผิว อาจต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์แทนการใช้น้ำและใช้การทำสุญญากาศช่วย เวลาที่ของเหลวใช้ในการซึมเข้าไปในรูพรุนจะมีลักษณะทำนองเดียวกับการซึมเข้าไปในหลอดรูเล็ก เช่น คาร์บอนที่มีความเป็นแกรไฟต์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

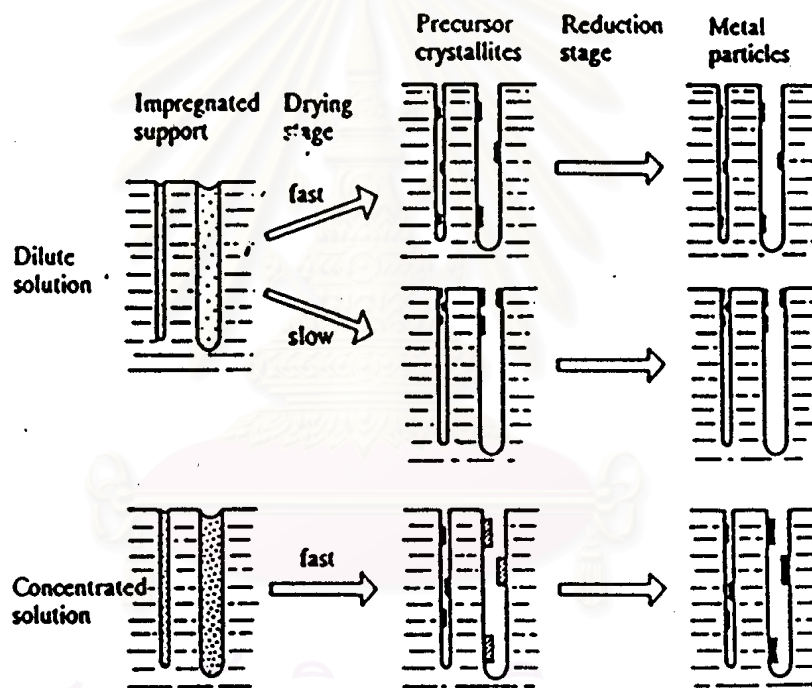
$$t = \frac{4\mu x^2}{\gamma d} \quad (2.10)$$

โดยที่

- t คือ เวลาที่ของเหลวซึมเข้าไปในรูพรุน (วินาที)
- μ คือ ความหนืดของของเหลว (ปอยส์)
- γ คือ แรงตึงผิว (นิวตันต่อเมตร)
- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (เมตร)
- x คือ ระยะทางที่ของเหลวเคลื่อนที่เข้าไปในหลอดรูเล็ก (เมตร)

2.8.2.2 การอบแห้ง

การอบแห้งเป็นการระเหยเอาตัวทำละลายที่ใช้ออกจนหมด อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่สูงมากประมาณ 50-230 องศาเซลเซียส เมื่อตัวทำละลายถูกระเหยออกไปจะทำให้เกิดการตกตะกอนของสารละลายที่เหลืออยู่ ซึ่งการอบแห้งสามารถควบคุมการกระจายตัวของ Active species ถ้าหากการอบแห้งเป็นไปอย่างช้าๆ จะทำให้เกลือของโลหะที่เติมลงไปถูกเคลื่อนย้ายมาบริเวณปากกรูพรุน ทำให้การกระจายตัวของโลหะบนผิวของตัวรองรับไม่สม่ำเสมอ แต่ถ้าต้องการให้ Active species เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ (Uniform distribution) บนตัวรองรับ ควรระเหยไล่ตัวทำละลายอย่างรวดเร็วตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลของอัตราเร็วในการอบแห้งที่มีต่อการกระจายตัวของ Active species [Bond, 1987]

2.8.2.3 การเผาให้เป็นเถ้า

การเผาให้เป็นเถ้า (Calcination) เป็นขั้นตอนเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนหรือสิ่งที่ไม่ต้องการ ที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป เช่น ประจุบวกหรือลบที่ไม่เสถียรหรือระเหยง่าย แต่เหตุผลที่สำคัญที่สุดคือ ต้องการเปลี่ยนองค์ประกอบของ Active phase ที่เกาะอยู่บนตัวรองรับให้อยู่ในรูป

โลหะออกไซด์โดยการให้ความร้อนในภาวะที่มีอากาศที่อุณหภูมิมากกว่า 230 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานในรูปแบบของโลหะมักจะเตรียมขึ้นในสภาพนี้ก่อน เพราะสภาพออกไซด์มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาต่ำในขณะที่สภาพที่เป็นโลหะจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศสูง ดังนั้นการเผาให้เป็นเตาจึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความปลอดภัยในการขนย้ายและบรรจุ

2.8.2.4 การรีดิวซ์

ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับคือ การรีดิวซ์ ซึ่งการรีดิวซ์เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของ Active phase จากโลหะออกไซด์ให้เป็นโลหะ โดยขั้นตอนนี้จะทำเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะเท่านั้น แก๊สที่นิยมใช้รีดิวซ์คือ แก๊สไฮโดรเจนหรือแก๊สผสมระหว่างแก๊สไนโตรเจนกับแก๊สไฮโดรเจนเพื่อเหตุผลในแง่ความปลอดภัย นอกจากนี้อาจพ่นสารอื่นลงไปอีกแล้วแต่ชนิดของโลหะออกไซด์ ความเร็วของแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้จะต้องสูงเพียงพอเพื่อสามารถพาไอน้ำที่เกิดขึ้นออกไปให้หมดเพราะไอน้ำเป็นตัวหน่วงอัตราเร็วของการรีดักชันโดยเกิดไฮดรอกไซด์ (Hydroxylate) ที่ผิว อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการรีดิวซ์จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปกติแล้วควรใช้อุณหภูมิการรีดิวซ์ต่ำสุด เพื่อลดการเกิดการหลอมตัวและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีพื้นที่ผิวของโลหะมากที่สุด

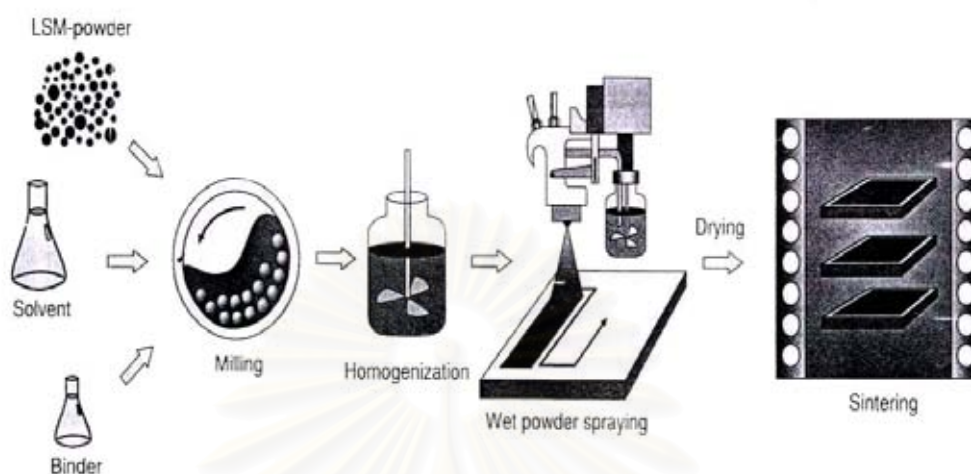
2.9 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า

การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้ามีวิธีการเตรียมหลายวิธีด้วยกัน เช่น การสเปรย์ (Spray) การพิมพ์หรือการระบาย (Painting or Brushing) และการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition)

2.9.1 การสเปรย์ [Veilstich, 2003]

สารละลายที่ใช้จะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ตัวเร่งปฏิกิริยามีความละเอียดผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปสเปรย์บนแผ่นรองรับ แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่มีก็ได้ โดยทั่วไปมักจะใช้กระดาษคาร์บอน ขั้นตอนการทำแสดงตามรูปที่ 2.14 เริ่มจากนำผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับตัวทำละลายและส่วนผสมอื่นให้เข้ากัน สมบัติที่สำคัญของสารผสมคือ ความหนืด (Viscosity) และระยะเวลาในการแห้ง (Drying rate) นำสารละลายผสมที่ได้ทำการสเปรย์ด้วยหัวฉีด

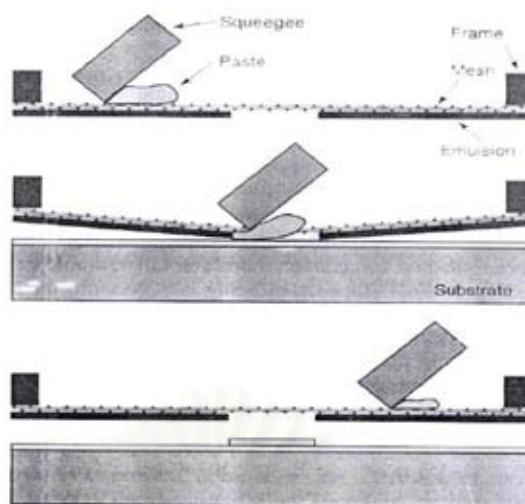
ให้เกิดเป็นละอองจับกับแผ่นรองรับ ความชื้นที่เหลือในสารผสมจะต้องมีความหนืดต่ำ เพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นนำไประเหยให้แห้ง



รูปที่ 2.14 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการสเปรย์ [Veilstich, 2003]

2.9.2 การพิมพ์หรือการระบาย [Veilstich, 2003]

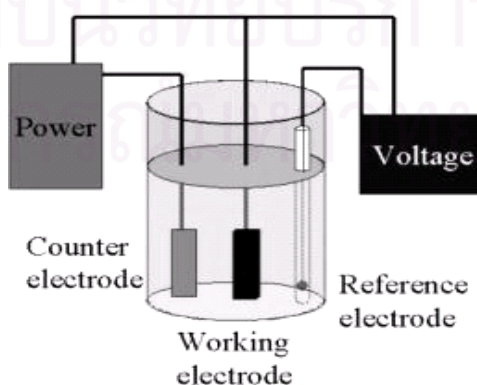
สารละลายที่ใช้มีส่วนผสมเหมือนกับการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการสเปรย์ แต่สารผสมนั้นจะต้องมีความหนืดสูงกว่าแบบสเปรย์และต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง โดยนำสารผสมไปพิมพ์หรือระบายบนแผ่นรองรับด้วยแม่พิมพ์หรือแปรง แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่ก็ได้ แผ่นรองรับที่มีความพรุนที่นิยมใช้ได้แก่ กระดาษคาร์บอน ผ้าคาร์บอน เป็นต้น ถ้ามีการใช้แผ่นรองรับขั้วไฟฟ้าจะมีชั้นแพร่ (Diffusion layer) เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงและรักษาระดับน้ำในเซลล์เชื้อเพลิง แต่ถ้าไม่ใช้แผ่นรองรับหรือใช้แผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุน โดยทั่วไปแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะเป็นพวกพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอน (Teflon) เมื่อทำการอัดขั้วไฟฟ้าเข้ากับเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะต้องนำแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนออก โดยมีขั้นตอนการทำแสดงตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์ [Veilstich, 2003]

2.9.3 การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า [เพ็ญศรี, 2542]

วิธีการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าอาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้าคือ การทำให้โลหะไปเกาะบนผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการ ในที่นี้คือขั้วไฟฟ้าหรือกระดาษคาร์บอน การพอกพูนเริ่มจากจุ่มกระดาษคาร์บอนลงในสารละลายที่มีโลหะที่ต้องการให้เกิดการพอกพูน จากนั้นป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันเพื่อให้ชั้นโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพอกพูนบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าตามรูปที่ 2.16 จากนั้นจึงนำไปล้างให้ปราศจากไอออนต่าง ๆ แล้วทำให้แห้ง เพื่อใช้ประกอบเป็นหน่วยประกอบเชื่อมแผ่นและขั้วไฟฟ้าต่อไป โดยวิธีการนี้จะทำให้โลหะที่พอกพูนมีแรงยึดเกาะกับขั้วไฟฟ้าที่แข็งแรง เรียบ สม่ำเสมอและได้ความหนาหรือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามต้องการ



รูปที่ 2.16 กระบวนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระแสไฟฟ้า [McDermott, 1972]

2.10 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscopy

เครื่อง Scanning Electron Microscopy มีหลักการทำงานโดยอาศัยการโฟกัสลำอิเล็กตรอนกราดลงบนผิวชิ้นงาน โดยที่ชิ้นงานนั้นจะต้องเสถียรภาพที่สุญญากาศ (High vacuum) สัญญาณที่เกิดขึ้นจากอัตรากิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับผิวชิ้นงานจะถูกถ่ายทอดผ่านระบบตรวจวัดและอิเล็กตรอนิกส์ปรากฏบนจอภาพ กล้องจุลทรรศน์ที่ทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สัญญาณที่ใช้ในการสร้างภาพมีหลายชนิด เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนกระเจิงกลับหรือรังสีเอ็กซ์ เป็นต้น โดยความเข้มของลำอิเล็กตรอนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น ๆ ซึ่งสามารถใช้บอกการกระจายของอนุภาคได้ ทำให้เทคนิคนี้สามารถใช้สำหรับศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน สภาพผิวของชิ้นงาน ขนาดของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร จุดบกพร่องบริเวณใกล้ผิวชิ้นงาน และหากมีตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ลักษณะเฉพาะก็สามารถวิเคราะห์ส่วนประกอบเคมีในระดับจุลภาพวิเคราะห์ได้

$$\text{ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยจากจำนวน} \quad \bar{d}_n = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad (2.11)$$

$$\text{ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยจากพื้นที่} \quad \bar{d}_s = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (2.12)$$

$$\text{ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยจากปริมาตร} \quad \bar{d}_v = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3} \quad (2.13)$$

โดยที่ d_i คือ ขนาดของอนุภาค n_i คือ จำนวนของอนุภาคที่มีขนาด d_i

2.11 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [สุกัญญา, 2547]

การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทดสอบได้โดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat และแสดงผลในรูปแบบกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเมื่อเซลล์เชื้อเพลิงถูกต่อเข้ากับวงจรภายนอก เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจะมีค่าที่ลดลง (ความต่างศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี 1.229 โวลต์) ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกิน (Overpotential) หรือโพลาริเซชัน (Polarization) โดยการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะเกิดขึ้น

ทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.14)

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cell}}^0 - |\varepsilon_c| - |\varepsilon_a| - IR \quad (2.14)$$

โดยที่

E_{cell}^0 คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (โวลต์)

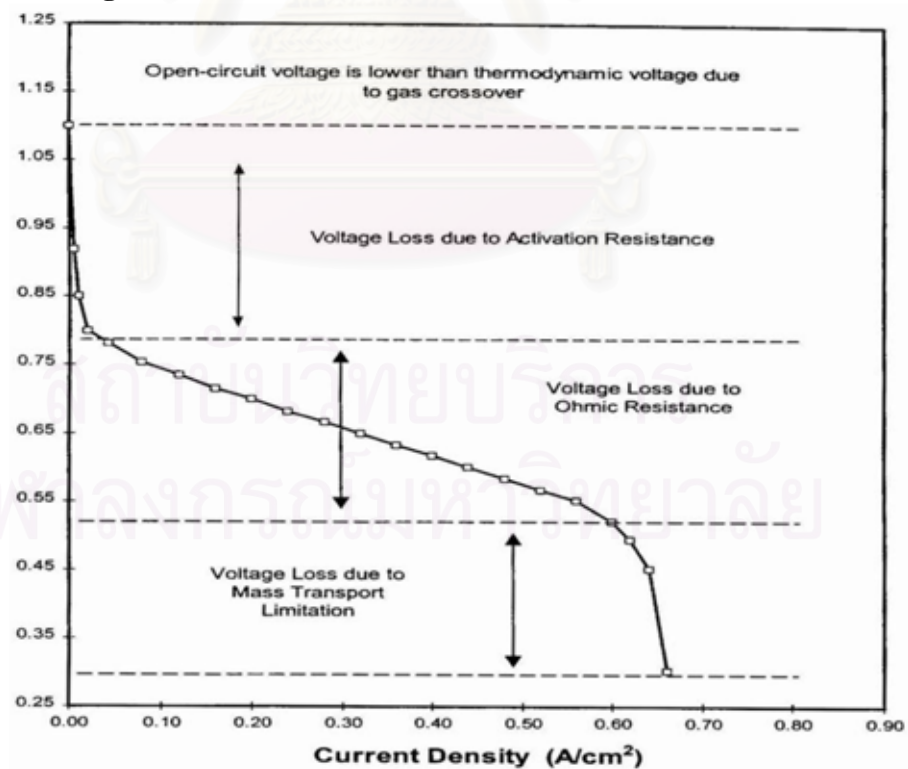
ε_c คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด (โวลต์)

ε_a คือ ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด (โวลต์)

IR คือ เทอมของศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่เกิดจากความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิง (โวลต์)

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงมาเขียนกราฟโพลาริเซชัน แสดงได้ตามรูปที่ 2.17

Cell Voltage



รูปที่ 2.17 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเชื้อเพลิงเปลี่ยนโปรตอน [สุกัญญา, 2547]

จากรูปที่ 2.17 ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้จะเรียกว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น ซึ่งพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี ซึ่งเกิดจากการแพร่ข้ามฝั่งของแก๊ส (Cross over) ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.17 จะเกิดการลดลงของศักย์ไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการเกิดโพลาไรเซชัน โดยเมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าสามารถแบ่งช่วงการเกิดโพลาไรเซชันออกได้เป็น 3 ช่วงคือ โพลาไรเซชันทางเคมี (Chemical polarization) โพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance polarization) และโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration polarization)

2.11.1 โพลาไรเซชันทางเคมี

โพลาไรเซชันทางเคมีหรือแอคติเวชันโพลาไรเซชัน (Activation polarization) จะเกิดในช่วงแรกของการลดลงของความต่างศักย์คร่อมเซลล์ตามรูปที่ 2.17 เนื่องจากอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมี ถ้าอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะเกิดโพลาไรเซชันในทางเคมีมาก ในทางตรงข้ามถ้าอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมีค่าสูงจะเกิดโพลาไรเซชันในทางเคมีน้อย

2.11.2 โพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน

โพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานเกิดขึ้นจากความต้านทานที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงในแต่ละส่วน เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณขั้วไฟฟ้าและที่บริเวณแผ่นช่องทางการไหล ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่น โดยเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะมีค่าความต้านทานมาก เพราะว่าเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนำไอออนได้น้อยกว่าสารละลายกรดหรือเบส วิธีในการลดโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานในส่วนของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวสะสมกระแสไฟฟ้าให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ๆ เพื่อลดแรงต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่วนของอิเล็กโทรไลต์ควรออกแบบให้มีขนาดบางเพื่อลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอนหรือเพิ่มความชื้นในอิเล็กโทรไลต์ ทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเป็นไปได้ง่าย

2.11.3 โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น

โพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงหรือตัวออกซิไดส์ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ทำให้ความเข้มข้นหรือความดันของสารตั้งต้นลดลง เนื่องจากสารไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นต่าง ๆ เข้าไปที่ผิวขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยาเป็นผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามสมการของเนิร์นสต์ (Nerst's equation) การลดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นสามารถทำได้โดยการใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ แต่เมื่อใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์จะเกิดโพลาริเซชันมาก เนื่องจากในอากาศมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิไดส์จำเป็นจะต้องมีการออกแบบช่องทางเดินแก๊สให้อากาศสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่เพื่อให้ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศสามารถแพร่เข้าไปยังบริเวณขั้วไฟฟ้าให้มากที่สุดทางด้านไฮโดรเจนก็มีโอกาสที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้เช่นกัน เกิดจากในกรณีที่ไฮโดรเจนที่ใช้เป็นไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิง (Reforming) ที่ไม่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบได้อย่างต่อเนื่องทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าลดลงทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินมากขึ้น

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhou et al. (2005) ได้ทำการหาอุณหภูมิในการรีดิวซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ นิกเกิล และโคบอลต์นิกเกิล โดยใช้ตัวรองรับคาร์บอน ผลการทดลองพบว่าพีคการใช้ไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์คือ 320-460 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลคือ 280-430 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์นิกเกิลคือ 290-390 องศาเซลเซียส

Moreira et al. (2004) ได้ทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาพลาเดียมโดยใช้วิธีแพร่ซึมในการเตรียม สารตั้งต้นที่ใช้คือ พลาเดียมทูอะซิไทลอะซีโตน (Pd (II) acetylacetonate) และไอโซอะซีโตน (Acetone) เป็นตัวทำละลาย ซึ่งทำการเตรียมที่ความเข้มข้น 2% และ 4% ของพลาเดียมโดยใช้คาร์บอนและ Vulcan เป็นตัวรองรับ เมื่อนำไปทดสอบสมรรถนะโดยดูจาก Polarization curve จะพบว่า Pd/Vulcan จะให้ประสิทธิภาพดีกว่า Pd/C ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากัน และที่ความเข้มข้น 4% จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าที่ความเข้มข้น 2% แต่ถ้าต้องการลดการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีและโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานควรเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของพลาเดียม 10-20%

Tian et al. (2004) ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ชนิดของตัวรีดิวซ์ ปริมาณแพลทินัม อุณหภูมิในการเตรียม และการใช้ผงคาร์บอนที่ผ่าน

การทำความสะอาดและไม่ทำความสะอาด ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบสมรรถนะโดยดูจากกราฟ โพลาริเซชันจะ พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่ดีที่สุดจะต้องมีชนิดของตัวรีดิวซ์คือ สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) 0.15 โมลต่อลิตรปริมาณแพลทินัม 0.01 กรัมต่อมิลลิตร ในสารละลาย H_2PtCl_6 และอุณหภูมิในการเตรียมที่ 313 เคลวิน จากผลของตัวรองรับจะพบว่า เมื่อใช้ Carbon black Vulcan xc-72 แบบทางการค้าที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดจะให้ประสิทธิภาพ ต่ำกว่าเมื่อผ่านการทำความสะอาดโดย Carbon black Vulcan xc-72 ที่ผ่านการทำความสะอาดจะให้ ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับของบริษัท Johnson Matthey

Verde et al. (2004) ทำการศึกษาความแตกต่างของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C และการใช้ผงคาร์บอนที่ผ่านการทำความสะอาดและไม่ทำความสะอาด โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สารตั้งต้นคือ $(NH_4)_2PtCl_6$ ทั้งแบบเตรียมขึ้นและแบบ ทางการค้าจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสารตั้งต้น $Pt(NH_3)_4Cl_2$ เมื่อใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง เป็นผลเนื่องมาจากขนาดของอนุภาคแพลทินัมที่ใช้สารตั้งต้นเป็น $(NH_4)_2PtCl_6$ อยู่ในระดับ นาโนเมตร

Lefevre et al. (2000) ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ 2 วิธี โดยใช้ปริมาณเหล็กและ อุณหภูมิในการเตรียมที่แตกต่างกัน วิธีที่หนึ่งโดยไพโรไลซิส Fe^{II} acetate หรือ Cl-FeTMPP คู่ซับบน Perylene tetracarboxylic dianhydride (PTCDA) วิธีที่สองโดยนำ Fe^{II} acetate และ Cl-FeTMPP คู่ซับบนไพโรไลซ์ Perylene tetracarboxylic dianhydride (PTCDA) ต่อจากนั้น ทำการทดสอบตัวเร่งที่เตรียมโดยใช้เครื่องมือ Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (ToF SIMS) เพื่อดูค่าความเข้มสัมพัทธ์ของ Secondary Ion หนึ่งตัวหรือหลาย ๆ ตัว

Gojkovic et al. (1999) ทำการศึกษากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา FeTMPp-Cl คู่ซับลง คาร์บอนดำ และทำการ Heat-treated ที่อุณหภูมิ 200-1000 องศาเซลเซียส จากการศึกษาได้ผลการ ทดลองว่าการเพิ่ม Heat-treated ของตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ ออกซิเจน และพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เตรียมในเบสจะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม แต่ถ้าเตรียมในกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กจะไม่ดีเท่าแพลทินัม

Faubert et al. (1998) ได้ทำการศึกษากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กโดยการรีดิวซ์และ คู่ซับลงบนคาร์บอนดำในแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้นทำการ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในไอของอะซิโตไนล์ (Acetonitrile) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400-1000 องศาเซลเซียส จากการทดสอบพบว่าการไพโรไลซิสในไอของ Acetonitrile จะต้องทำที่อุณหภูมิ น้อยที่สุดอยู่ที่ 600 องศาเซลเซียส โดยการทำทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กจะทำการทดสอบด้วยไฟฟ้า แบบหมุน และทดสอบในขั้วไฟฟ้าที่มีการแพร่แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน (GDE) โดยใช้ เครื่องมือ XRD, TEM, XPS และ ToF-SIMS

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ชื่อสาร	บริษัท
โคบอลต์ทูอะซีติลอะซีโตนัต (Cobalt (II) acetylacetonate 99%)	Acros
คอปเปอร์ทูอะซีติลอะซีโตนัต (Copper (II) acetylacetonate 99.99+%)	Aldrich
นิกเกิลทูอะซีติลอะซีโตนัต (Nickel (II) acetylacetonate 95%)	Aldrich
โกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต (Gold chloride trihydrate)	Aldrich
อะซีโตน (Acetone 99.5%)	BDH
เอทานอล (Ethanol 97%)	Carlo
ผงคาร์บอน	Gigantic
เอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ (Ethylene glycol dimethyl ether)	Fluka
เนฟิออน (5%wt Nafion 117)	Electrochem
พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (60%wt Polytetrafluoroethylene)	Aldrich
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30%wt Hydrogen peroxide)	Merck
กรดซัลฟูริก (98.08%wt Sulfuric acid)	BDH
แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen 99.999%)	Praxair
แก๊สออกซิเจน (Oxygen 99.999%)	Praxair
แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen 99.99%)	Praxair

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204-S ของบริษัท Mettler-Toledo
2. เครื่องอ่างไอน้ำ รุ่น 1083 ของบริษัท GFL
3. ตู้อบของบริษัท Sanyo
4. เตาเผาของบริษัท Carbolite
5. เครื่องอัลตราโซนิก รุ่น B-521 ของบริษัท Branson
6. ไมโครปิเปต

7. โถดูดความชื้น
8. เครื่องแก้วอื่นๆ ในห้องปฏิบัติการ

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Compression Model รุ่น LP 20 ของบริษัท Labtech Engineering Company Ltd.,
2. Temperature Programmed Reduction รุ่น TPDR0 1100 ของบริษัท Thermofinnigan
3. Scanning Electron Microscope รุ่น JSM 6400 ของบริษัท Jeol
4. Transmission Electron Microscope รุ่น JEM-200CX ของบริษัท Jeol
5. X-Ray fluorescence รุ่น PW 2400 ของบริษัท Philips
6. Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท AULOLAB

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแพร่ซึม

1. ละลายโคบอลต์ทูลอะซีติลอะซีโตน 0.0768, 0.1222, 0.1745 กรัม (10, 15, 20wt%) ในอะซีโตน 100 มิลลิลิตร ตามลำดับและกรองส่วนที่ตกตะกอน
2. นำผงคาร์บอนที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จำนวน 0.1600 กรัม เติมลงในสารละลายข้างต้น
3. ระเหยตัวทำละลายออกด้วยความร้อนโดยใช้เครื่องอังไอน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเป็นผง
4. นำผงตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำผงตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปผ่านกระบวนการเผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการรีดักชันภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนด้วยอัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. ทำซ้ำข้อ 1-5 ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทองแดง นิกเกิลและทอง

3.4.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยการพิมพ์

1. ชั่งน้ำหนักกระดาษคาร์บอน
2. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักของคาร์บอน ใส่ในขวดที่มีฝาปิด
3. เติมเอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอีเทอร์ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการระเหย ทำให้เข้ากันในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. เติมสารละลายเนฟออนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร ลงในขวดตัวอย่างเขย่าเบา ๆ ทำให้เข้ากันในอ่างอัลตราโซนิกอีกครั้งเป็นเวลา 10 นาที
5. เติมสารละลายพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ลงในขวดตัวอย่างปริมาตร 0.01 มิลลิลิตร ทำให้เข้ากันในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
6. นำแผ่นกระดาษคาร์บอนที่ชั่งแล้วข้างต้นวางบนจานแก้ว ใช้ฟู่กันจุ่มสารตัวอย่างทาบนกระดาษคาร์บอน ทิ้งให้แห้งแล้วจึงทาซ้ำทำจนกระทั่งสารตัวอย่างหมด
7. นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
8. ชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามภาคผนวก ก เก็บขั้วไฟฟ้าไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอการใช้งาน

3.4.3 การปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

1. นำเยื่อแผ่นแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำเยื่อแผ่นจากข้อ 1. แช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์
3. นำเยื่อแผ่นจากข้อ 2. แช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดไอออนของโลหะ
4. นำเยื่อแผ่นจากข้อ 3. แช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อดังกล่าวดังกล่าว
5. รอให้แห้งและเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อรอการใช้งาน

3.4.4 การเตรียมหน่วยประกอบเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า

1. นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้และขั้วไฟฟ้าแพลทินัมทาดด้วยสารละลายเนฟิออนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และประกบกับเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน
2. อัดด้วยความร้อนโดยใช้ความดัน 65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 นาที
3. อัดด้วยความเย็น โดยใช้ความดัน 65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 นาที
4. นำชุด MEA ที่เตรียมได้ออกจากเครื่องอัดและนำไปหารอยแตกโดยวัดค่าความต้านทาน ไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (Multimeter) หากชุด MEA แตกจะมีค่าความต้านทานเข้าใกล้ศูนย์
5. เก็บชุด MEA ที่เตรียมได้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอการทดสอบสมรรถนะ

3.5 การวิเคราะห์อุณหภูมิในการรีดิวซ์

ศึกษาหาอุณหภูมิในการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ โดยใช้เครื่อง Temperature Programmed Reduction

3.6 การวิเคราะห์สมบัติของขั้วไฟฟ้า

ศึกษาขนาดของอนุภาคโลหะโดยใช้เครื่อง TEM ที่กำลังขยาย 1 ล้านเท่า และการกระจายตัวของโลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับขนาด 1 ตารางเซนติเมตร โดยใช้เครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 250 เท่า และปริมาณของธาตุต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง XRF

3.7 การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

3.7.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. นำ MEA ที่เตรียมได้มาประกอบในเซลล์เชื้อเพลิง โดยอัดที่ความดัน 40 ปอนด์แรงต่อตารางนิ้ว

2. นำเซลล์เชื้อเพลิงที่ประกอบแล้วมาต่อเข้ากับหน่วยทดสอบโดยเสียบปลั๊กไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 110 โวลต์ ต่อข้อต่อแก๊สขาเข้าและขาออกที่ขั้วแอมโนดและแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิง
3. ทำการต่อสายไฟจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat มายังขั้วทั้งสองของเซลล์เชื้อเพลิงและทำการต่อเทอร์โมคัปเปิลให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ สำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง
4. ตรวจสอบวาล์วขาเข้าของแก๊สแต่ละชนิดให้ปิด-เปิดอยู่ในทิศทางการไหลของแก๊สในโตรเจนและวาล์วขาออกให้อยู่ในตำแหน่งปิด
5. เปิดสวิทช์เครื่อง Potentiostat/Galvanostat เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาที ก่อนทำการทดลองและกดปุ่ม Cell enable ให้อยู่ในตำแหน่งปิด พร้อมเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับทำหน้าที่บันทึกข้อมูลจากเครื่อง Potentiostat/Galvanostat
6. เปิดสวิทช์ที่แผงสวิทช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้าที่สวิทช์หลัก (Main switch) แล้วจึงเปิดสวิทช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่ 60 องศาเซลเซียส และเปิดสวิทช์ของตัวให้ความร้อนที่ขั้วแอมโนดและแคโทดที่ 60 องศาเซลเซียส
7. เปิดสวิทช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 15 นาที ก่อนทำการทดลอง
8. ตั้งค่าอัตราการไหลที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส โดยใช้แก๊สในโตรเจนทั้งสอง Channel ที่ 200 sccm ก่อนด้วยสาเหตุดังนี้
 - เพื่อเป็นการไล่สิ่งสกปรกค้างอยู่ในหน่วยทดสอบออก
 - เพื่อตรวจสอบการรั่วของแก๊ส โดยใช้น้ำยาในการตรวจสอบการรั่วภายในหน่วยทดสอบ
 - เพื่อใช้วัดค่าความชื้นภายในแก๊สก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ส่วนวัดความชื้น
9. ทำการป้อนแก๊สในโตรเจนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง โดยเปิดที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออก 20 psi แล้วจึงมาเปิดสวิทช์ที่เครื่องวัดอัตราการไหลทั้งสอง Channel เพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบประมาณ 20 นาทีและอุณหภูมิได้ตามที่กำหนด
10. ปิดสวิทช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล แล้วจึงปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สในโตรเจน
11. เปิดวาล์วขาออกทั้งสองตัว เพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอจนกระทั่งเกจที่วัดความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลง จนถึง 0 แล้วจึงเปิดวาล์วขาออกทั้งสอง

12. ทำการสลับวาล์วขาเข้าของแก๊สให้อยู่ในทิศทางการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน และวาล์วขาออกให้อยู่ในตำแหน่งปิด
13. ตั้งค่าอัตราการไหลที่เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส ซึ่ง Channel 1 คือแก๊สไฮโดรเจนที่ 100 sccm และ Channel 2 คือแก๊สออกซิเจนที่ 100 sccm
14. ทำการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง โดยเปิดที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันขาออก 20 psi แล้วจึงมาเปิดสวิตซ์ที่เครื่องวัดอัตราการไหลทั้งสอง Channel เพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ
15. เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งค่าความต่างศักย์ในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง (Open circuit voltage) ที่ได้มีค่าคงที่ กดปุ่ม Cell Enable ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat จึงกดปุ่ม Start ที่โปรแกรม GPES เพื่อเริ่มบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ ณ ที่ค่าความต่างศักย์ต่าง ๆ ที่ตั้งไว้
16. การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในรูปโพลาริเซชัน โดยวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยใช้โปรแกรม GPES เลือกวิธีแบบ Chrono method (Interval time > 0.1 sec) และเลือกวิธีแบบ Amperometry แล้วจึงตั้งค่าความต่างศักย์เพื่อให้เครื่องวัดค่ากระแสจากเซลล์เชื้อเพลิง นำผลการทดลองไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์

3.7.2 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง

1. เมื่อเสร็จสิ้นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้
2. ปิดสวิตซ์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล แล้วจึงปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน
3. เปิดวาล์วขาออกทีละตัว เพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอจนกระทั่งเกจที่วัดความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลงจนถึง 0 แล้วจึงเปิดวาล์วขาออกของแก๊สอีกถังหนึ่งและทำในลักษณะเดียวกัน
4. เมื่อลดความดันในท่อแก๊สหมด จึงทำการปิดวาล์วขาออกของแก๊สทุกตัว
5. ปิดสวิตซ์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผงสวิตซ์ควบคุมแหล่งไฟฟ้า แล้วจึงปิดสวิตซ์หลัก

6. ปิดโปรแกรม GPES แล้วจึงปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ ต่อจากนั้นปิดสวิทซ์ที่เครื่อง Potentiostat/Galvanostat



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษาก็คือ โคบอลต์ ทองแดง นิกเกิลและทอง โดยทำการศึกษาผลตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 350 และ 600 องศาเซลเซียส ชนิดของตัวรองรับคาร์บอนไอแกนติก (Gigantic) และแกรไฟต์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 7.6-34.0 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนโดยอะตอมของโลหะผสมทองต่อนิกเกิลในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 3:1 1:1 และ 1:3 รวมทั้งศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้าได้แก่ ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้า

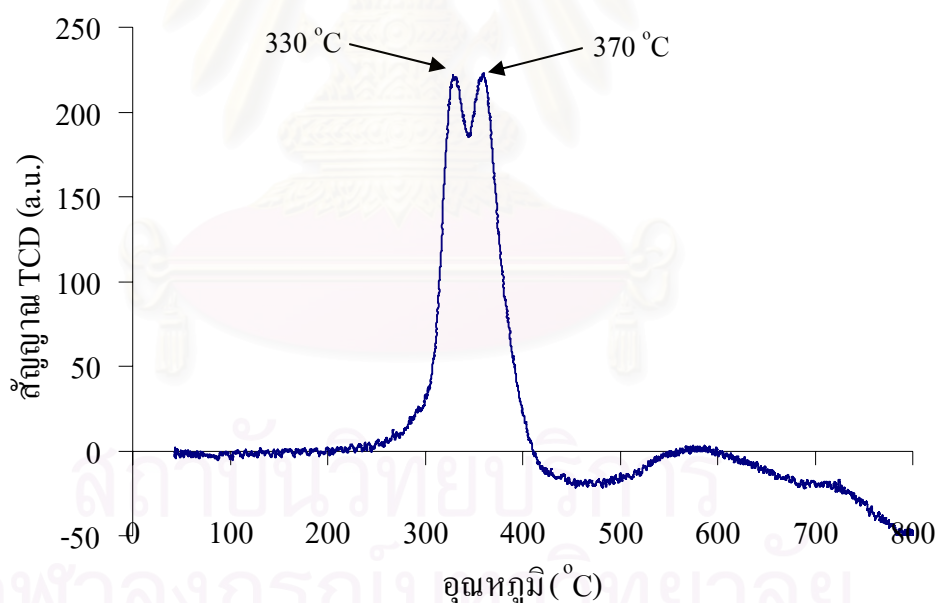
4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนั้นประสิทธิภาพการทำงานจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวด้วยกัน เช่น ขั้วไฟฟ้า เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนและตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่สำคัญ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ดูดซับแก๊ส ส่งผ่านอิเล็กตรอน และที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นที่เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องเตรียมให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการทำงาน โดยพิจารณาจากขนาดของอนุภาค การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา จากการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าดังกล่าวคือ ชนิดของตัวรองรับ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของโลหะผสมและอุณหภูมิในการรีดิวซ์ ซึ่งขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับคือ การรีดิวซ์ โดยการรีดิวซ์เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของ Active phase จากโลหะออกไซด์ให้เป็นโลหะได้ด้วยการผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งอุณหภูมิในการรีดิวซ์ที่เหมาะสมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิดต่าง ๆ บนตัวรองรับนั้นจะมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิในการรีดิวซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีแปรซึมจากเครื่อง Temperature Programmed Reduction (TPR) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะโคบอลต์ ทองแดง นิกเกิลและทอง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่ใช้นั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนแบบ 2 อิเล็กตรอนคือ ออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาไปเป็นไฮโดรเจน

เปอร์ออกไซด์ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นน้ำ ดังสมการที่แสดงไว้ในบทที่ 2 (สมการ 2.7-2.8)

4.2 อุณหภูมิในการรีดิวซ์

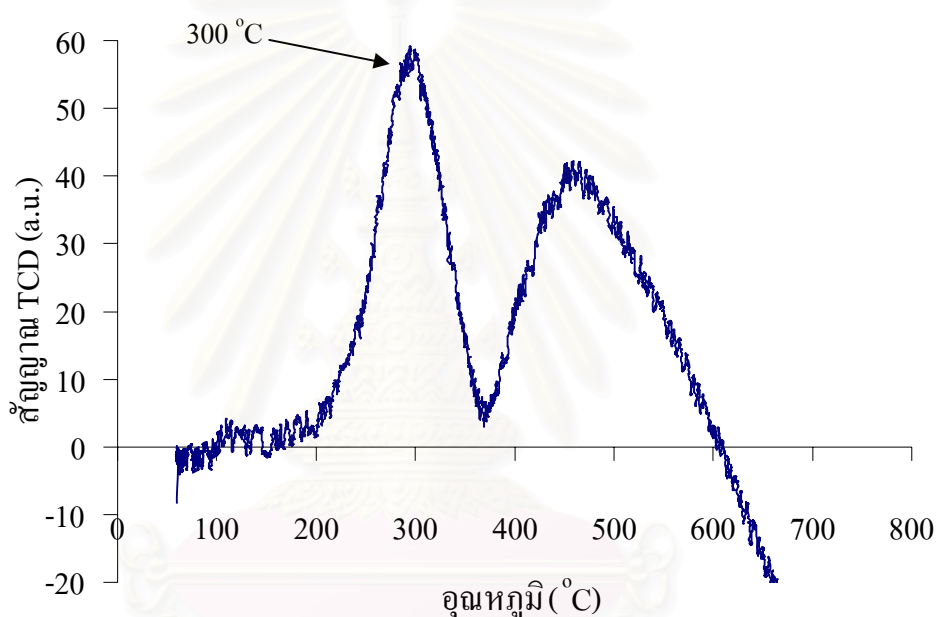
TPR เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาหาอุณหภูมิในการรีดิวซ์ที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีหลักการทำงานโดยการผ่านแก๊สไฮโดรเจนไปยังผงตัวเร่งปฏิกิริยาและทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เพื่อดูว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการดึงแก๊สไฮโดรเจนไปใช้ในช่วงอุณหภูมิใด ซึ่งพิก (Peak) ที่เกิดขึ้นก็คือ พิกของการเกิดรีดักชันจากโลหะออกไซด์ไปเป็นโลหะ สำหรับการทดลองนี้จะทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปโลหะบนตัวรองรับ เนื่องจากโลหะบนตัวรองรับนั้นมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์ที่สูงกว่าช่วงพิกของการเกิดรีดักชันจากโลหะออกไซด์ไปเป็นโลหะขึ้นไปเพียงเล็กน้อยในการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น เพราะถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงมากจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการหลอมตัว (Agglomeration) และทำให้พื้นที่ผิวลดลง



รูปที่ 4.1 TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Co/C ที่ร้อยละ 14.6 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.1 แสดง TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ในภาวะไฮโดรเจนที่ปริมาณโลหะร้อยละ 14.6 โดยน้ำหนักบนตัวรองรับคาร์บอนไอแกนดิก โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า จะเริ่มเกิดพิกของการเกิด

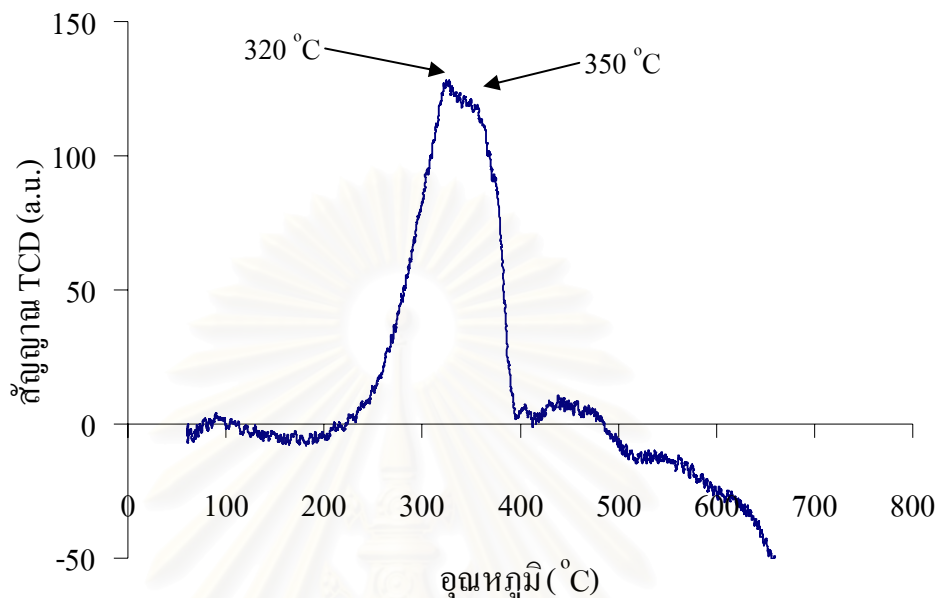
รีดักชันจากโลหะออกไซด์ไปเป็นโลหะ ในช่วงอุณหภูมิ 260-410 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดพีค 2 ตำแหน่งซ้อนทับกันคือ ที่อุณหภูมิประมาณ 330 องศาเซลเซียส และ 370 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Zhou และคณะ (2005) ที่ศึกษาการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนตัวรองรับคาร์บอนขนาด 40-48 เมช พบว่าอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดพีคของการเกิดรีดักชันจากโลหะออกไซด์ไปเป็นโลหะจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 320-460 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก TPR ของงานวิจัยนี้ แสดงว่าอุณหภูมิสำหรับการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์บนตัวรองรับคาร์บอนโจแกนติกที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิที่สูงกว่าหรือเท่ากับ 460 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ที่ 460 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/C ที่ร้อยละ 13.1 โดยน้ำหนัก

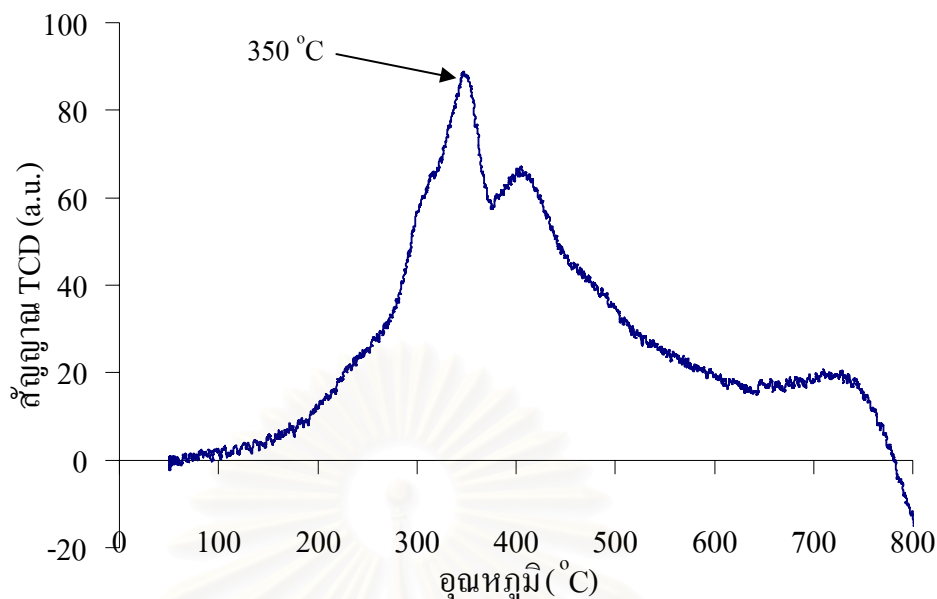
รูปที่ 4.2 แสดง TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยาทองแดงบนตัวรองรับคาร์บอนโจแกนติกที่ปริมาณโลหะร้อยละ 13.1 โดยน้ำหนัก โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเพอร์ซิมและผ่านการเผาในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าจะเริ่มเกิดการรีดักชันในช่วงอุณหภูมิ 200-370 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดสัญญาณ TCD สูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Dandekar และคณะ (2005) ที่ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทองแดงบนตัวรองรับคาร์บอน AC-ASIS ที่มีพื้นที่ผิว 800 ตารางเมตรต่อกรัม โดยศึกษาอุณหภูมิในการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 150-400 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดิวซ์โลหะออกไซด์ไปเป็นโลหะทองแดงคือ 400 องศาเซลเซียส ซึ่ง

สอดคล้องกับผลการทดลอง TPR ของงานวิจัยนี้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาทองแดงบนตัวรองรับคาร์บอนคือ 400 องศาเซลเซียส



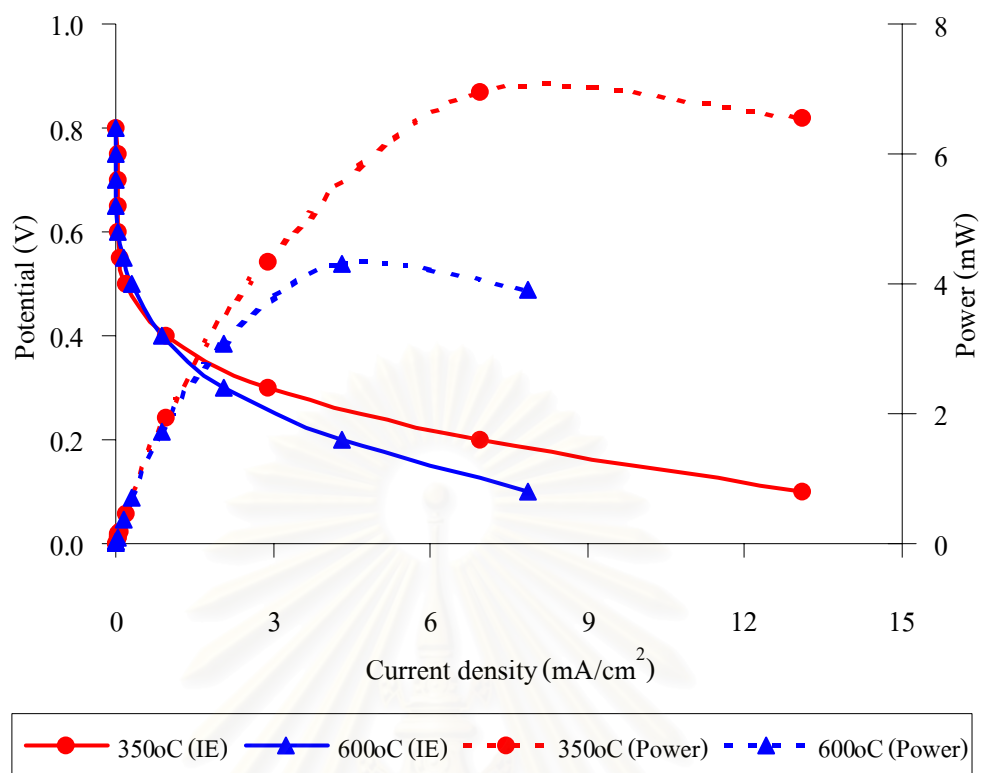
รูปที่ 4.3 TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/C ที่ร้อยละ 16.0 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.3 แสดง TPR ในภาวะไฮโดรเจนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่ปริมาณโลหะร้อยละ 16.0 โดยน้ำหนักบนตัวรองรับคาร์บอนใจแกนดิก โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าจะเริ่มเกิดพีคของการเกิดรีดักชันจากโลหะออกไซด์ไปเป็นโลหะ ในช่วงอุณหภูมิ 230-390 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดพีค 2 ตำแหน่งคือ ที่อุณหภูมิประมาณ 320 องศาเซลเซียส และ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Zhou และคณะ (2005) ที่ศึกษาการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนขนาด 40-48 เมช พบว่าอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดพีคของการเกิดรีดักชันจากโลหะออกไซด์ไปเป็นโลหะจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 280-430 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก TPR ของงานวิจัยนี้ แสดงว่าอุณหภูมิสำหรับการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอนที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิที่สูงกว่าหรือเท่ากับ 430 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ที่ 430 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยา Au/C ที่ร้อยละ 13.8 โดยน้ำหนัก

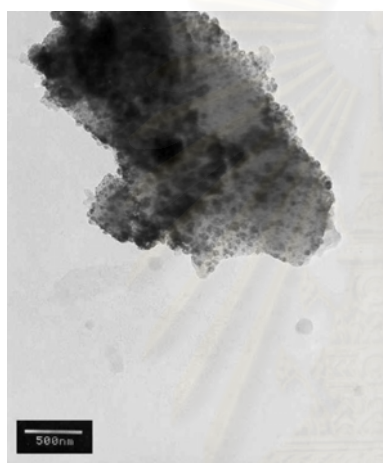
รูปที่ 4.4 แสดง TPR ของตัวเร่งปฏิกิริยาของบนตัวรองรับคาร์บอนไอแกนติก ที่ปริมาณโลหะร้อยละ 13.8 โดยน้ำหนัก โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยวิธีแพร์ซิมและการเผาในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าจะเริ่มเกิดช่วงของการรีดักชันในช่วงอุณหภูมิ 250-430 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดสัญญาณ TCD สูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Damirel และคณะ (2005) ที่ใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะของบนตัวรองรับคาร์บอน Black Pearls 2000 ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคือ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง TPR ของงานวิจัยนี้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะของบนตัวรองรับคาร์บอนไอแกนติก ใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์ที่ 350 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส ตามงานวิจัยของ Damirel และผลการทดลอง TPR ตามลำดับ เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองด้วย การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยใช้เครื่องวัด Potentiostat/Galvanostat สำหรับขั้วแอโนดคือ ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมจากบริษัท Electrochem และขั้วไฟฟ้าแคโทดคือ ขั้วไฟฟ้าโลหะที่ได้จากการเตรียม ภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ที่ 350 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้นั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งเกิดโพลาไรเซชันทางเคมีมาก โดยจะเห็นได้จากกราฟในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาคือที่ 0.6-0.7 โวลต์ นั้นกราฟที่ได้จะมีการลดลงเป็นอย่างมาก เมื่อสังเกตกราฟกำลังไฟฟ้าจะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกันคือ 0.2 โวลต์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองที่รีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.0 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และกำลังไฟฟ้าคือ 7.0 มิลลิวัตต์ ซึ่งให้ค่าที่มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองที่รีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคือ 4.3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และกำลังไฟฟ้าคือ 4.3 มิลลิวัตต์ ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมและผ่านการรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่และพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมและผ่านการรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ตามผลการวิเคราะห์ TEM แสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งทำการถ่ายภาพกำลังขยายสูง 1 ล้านเท่า พบว่าขนาดของอนุภาคโลหะที่เตรียมได้นั้นจะมีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้การสุ่มนับขนาดของอนุภาค

โลหะ (จุดสีดำ) (ภาคผนวก ก-3) ผลการคำนวณพบว่าที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 350 องศาเซลเซียส อนุภาคโลหะมีขนาดประมาณ 94 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 3.30 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 600 องศาเซลเซียส อนุภาคโลหะมีขนาดประมาณ 350 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.89 ตารางเมตรต่อกรัม ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ต่ำอนุภาคจะไม่เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็ก แต่ถ้าใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์สูงอนุภาคจะเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและหลอมรวมตัวกันทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่ ดังนั้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองสำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์คือ 350 องศาเซลเซียส



(ก) อุณหภูมิรีดิวซ์ 350 องศาเซลเซียส



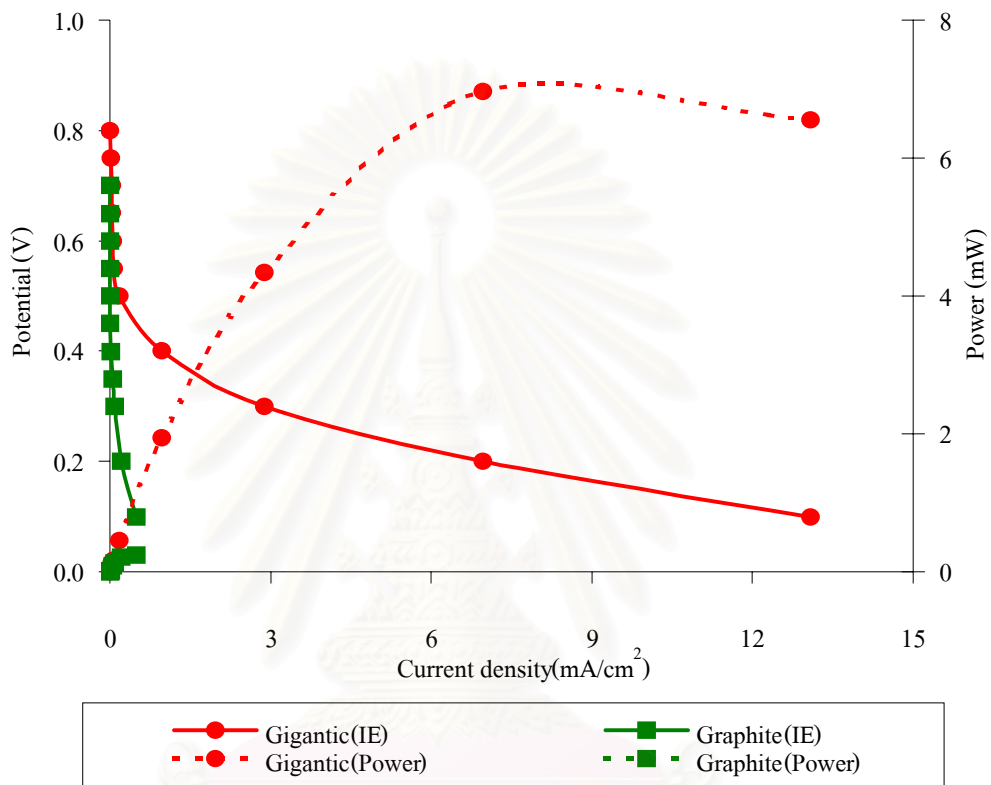
(ข) อุณหภูมิรีดิวซ์ 600 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.6 สันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทองเมื่อใช้อุณหภูมิรีดิวซ์ต่างกัน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ที่กำลังขยาย 1 ล้านเท่า

4.3 ผลของตัวรองรับ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามักนิยมเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ เนื่องจากตัวรองรับจะมีพื้นที่ผิวสูงซึ่งจะช่วยให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาและช่วยลดการเกิดการหลอมรวมตัวกันของ Active species ในเซลล์เชื้อเพลิงตัวรองรับที่นิยมใช้คือ คาร์บอน เนื่องจากคาร์บอนมีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าและมีความพรุนสูงจึงช่วยในการเคลื่อนที่ของแก๊สเชื้อเพลิงและอิเล็กตรอน แต่คาร์บอนมีด้วยกันหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีผลต่อสมบัติและประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของคาร์บอนได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากใจแกนตึกและแกรไฟต์ โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีแพร่ซึมบนตัวรองรับคาร์บอนใจแกนตึกและแกรไฟต์ เพื่อทดสอบ

ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของตัวรองรับคาร์บอน ใจแกนติกและแกรไฟต์

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้นั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเกิดโพลาไรเซชันทางเคมีมาก และเมื่อสังเกตจากกราฟโพลาไรเซชันและกำลังไฟฟ้าของตัวรองรับที่ต่างกันจะพบว่าตัวรองรับที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่นที่ 0.2 โวลต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ตัวรองรับใจแกนติกให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ตัวรองรับแกรไฟต์ โดยตัวรองรับใจแกนติกให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคือ 7.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.0 มิลลิวัตต์ ซึ่งสูงกว่าตัวรองรับแกรไฟต์ที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคือ 0.2

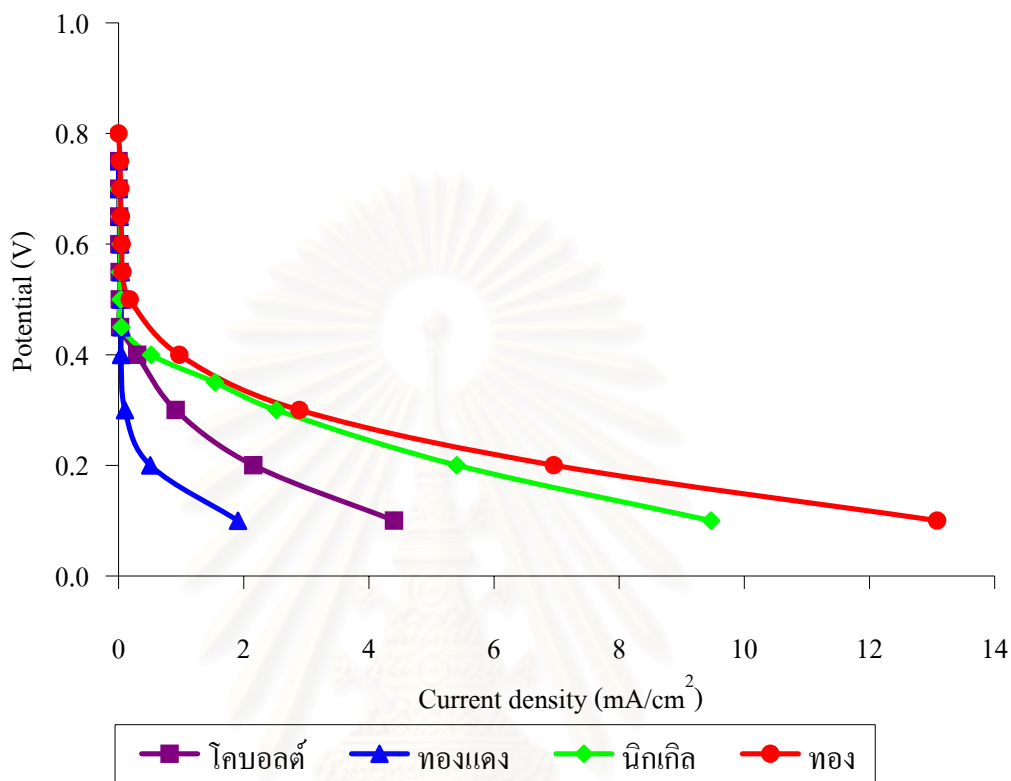
มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 0.2 มิลลิวัตต์ ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนไอแกนดิกนั้นมีความหนาแน่นน้อยกว่า 56 นาโนเมตร ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าคาร์บอนแกรไฟต์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 104.3 ไมโครเมตร จึงทำให้การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวรองรับไอแกนดิกมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวรองรับแกรไฟต์ ดังนั้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะใช้ตัวรองรับคาร์บอนจากไอแกนดิกในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moreira และคณะ (2003) ที่สรุปว่าเมื่อใช้ตัวรองรับคาร์บอนที่แตกต่างกันในการเตรียมนั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

4.4 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เพียงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการรีดิวซ์และชนิดของตัวรองรับตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่ใช้ในการเตรียมด้วย เนื่องจากโลหะนั้นมีหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยโลหะแต่ละชนิดนั้นจะมีค่าอัตราการแลกเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Exchange current density, j_0) ต่างกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่มีค่า j_0 มาก จะทำให้การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงน้อย ในทางตรงกันข้ามตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่มีค่า j_0 น้อย การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงมาก ในการทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะต่าง ๆ ได้แก่ โคบอลต์ ทองแดง นิกเกิลและทอง โดยใช้อุณหภูมิรีดิวซ์จากข้างต้น เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง โดยสังเกตจากกราฟโพลาริเซชันจะเห็นว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้เรียงจากมากไปหาน้อยดังนี้ $Au/C > Ni/C > Co/C > Cu/C$ และค่าความต่างศักย์เริ่มต้น (Open circuit potential) ที่ได้เพียง 0.7-0.8 โวลต์เท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี 1.23 โวลต์ ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ ทองแดง นิกเกิลและทองมีการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน โดยเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นรวมของเซลล์ที่ได้จากปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนมีค่าต่ำกว่าปฏิกิริยาที่เกิดเพียง

ขั้นตอนเดียว และในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยา 0.6-0.7 โวลต์ นั้นกราฟที่ได้จะมีการลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นช่วงที่เซลล์ถูกควบคุมด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Activation control)

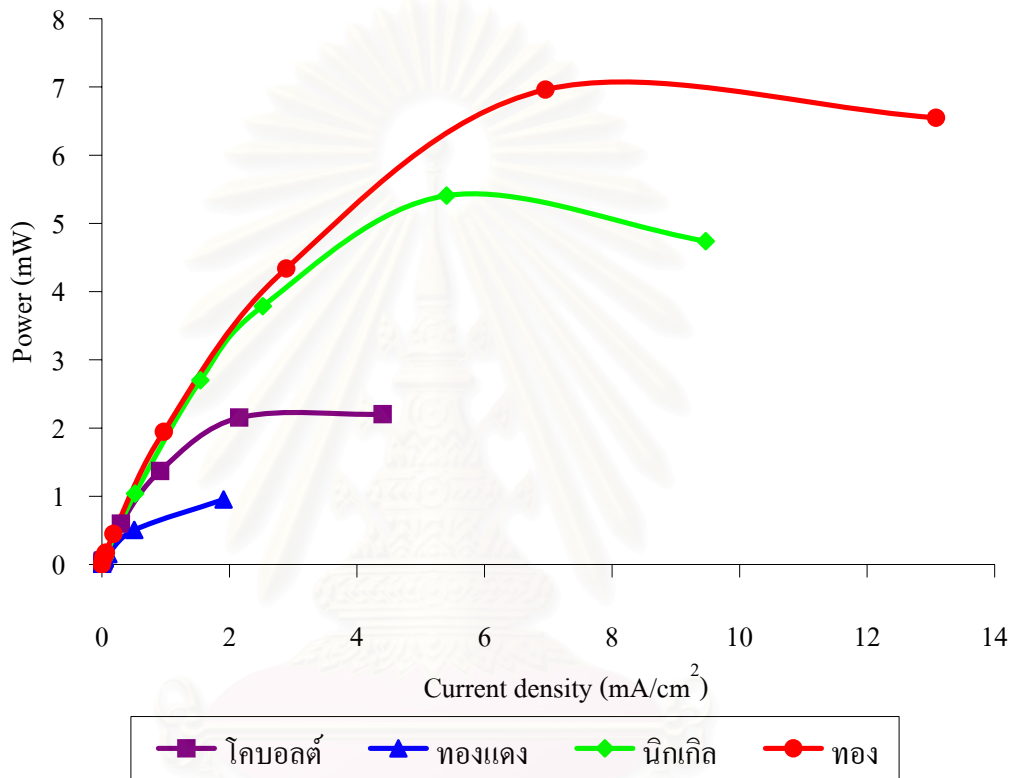


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิดต่าง ๆ

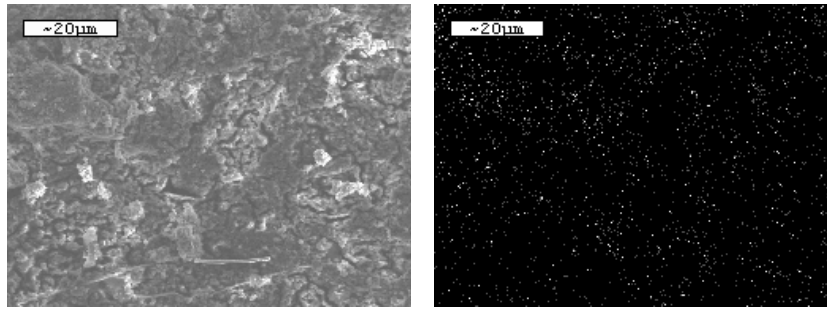
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าและหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ($Power_{max}$) พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเรียงจากมากไปหาน้อยเป็นดังนี้ $Au/C > Ni/C > Co/C > Cu/C$ ที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.2 โวลต์

รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของโลหะชนิดต่าง ๆ บนขั้วไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM โดยที่ภาพทางซ้ายมือแสดงผิวหน้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่กำลังขยาย 250 เท่า ส่วนภาพทางขวามือแสดงตำแหน่งของโลหะบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (จุดสีขาวแสดงตำแหน่งของอนุภาคโลหะ) พบว่ามีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอ และด้วยการกระจายตัวที่สม่ำเสมอนี้จึงไม่น่าที่จะเป็นปัจจัยที่ทำให้ผลผลิตกระแสไฟฟ้าได้แตกต่างกัน ส่วนรูปที่ 4.11 แสดงขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ พบว่าขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแต่ละชนิดที่เตรียมได้จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตรแต่จะมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน

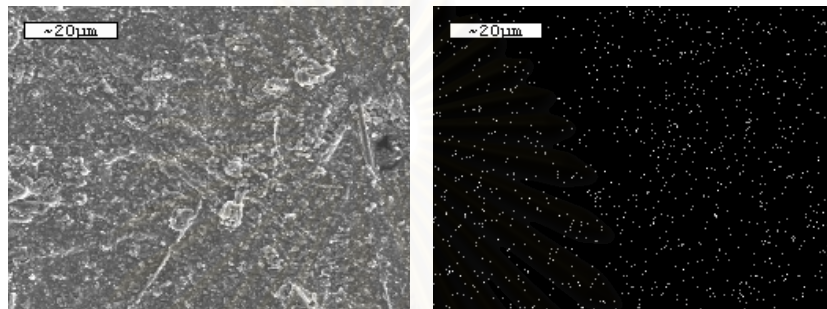
ผลการคำนวณพบว่าโลหะทอง นิกเกิล โคบอลต์และทองแดงมีขนาดอนุภาคประมาณ 94 102 112 และ 124 นาโนเมตรตามลำดับ ด้วยความแตกต่างของขนาดอนุภาคนี้อาจส่งผลให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้แตกต่างกัน เพราะประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กจะทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามาก แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่จะทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อย [Tian และคณะ, 2004]



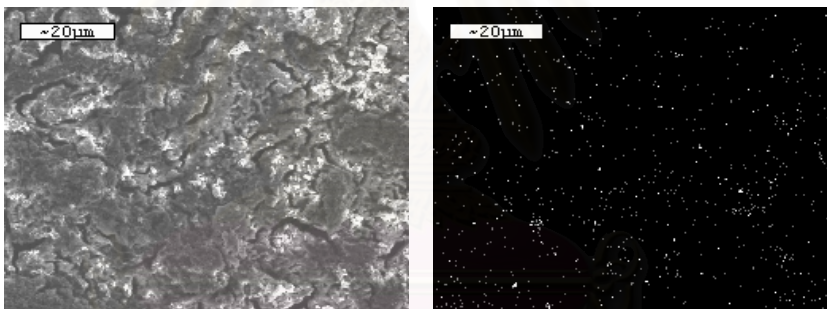
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิดต่าง ๆ



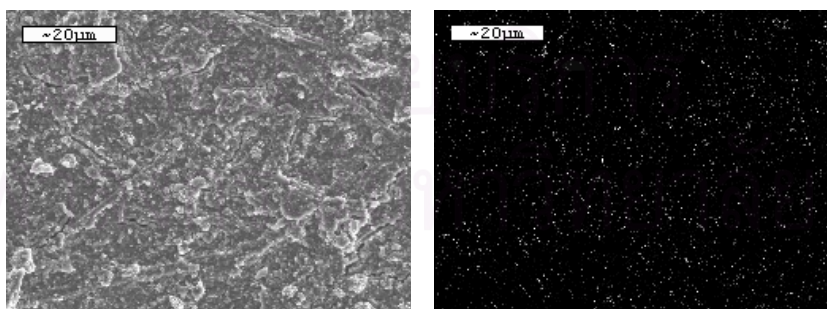
(ก) โคบอลต์



(ข) ทองแดง

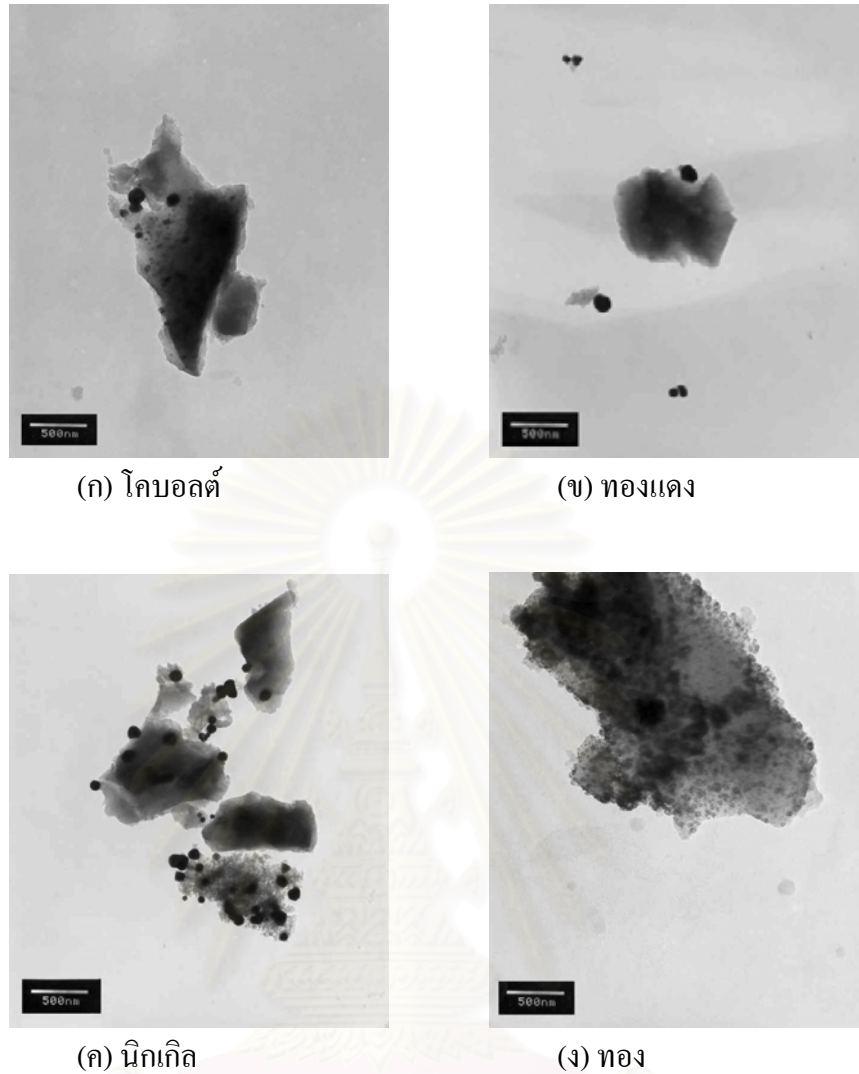


(ค) นิกเกิล



(ง) ทอง

รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 250 เท่า โดยที่ภาพซ้ายแสดงผิวหน้าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ภาพขวาแสดงการกระจายตัวของโลหะ



รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ที่กำลังขยาย 1 ล้านเท่า

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ ทองแดง นิกเกิลและทอง โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF (X-ray Fluorescence) พบว่าบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีธาตุที่วิเคราะห์ได้หลายธาตุด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียม ซิลิคอน คลอรีน เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากสารตั้งต้นและตัวรองรับคาร์บอนที่ใช้ในการเตรียมนั้นมีโลหะเจือปนอยู่หลายชนิดอย่างไรก็ดีจะพบว่า มีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าลดลง

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบผงตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ ทองแดง นิกเกิลและทอง

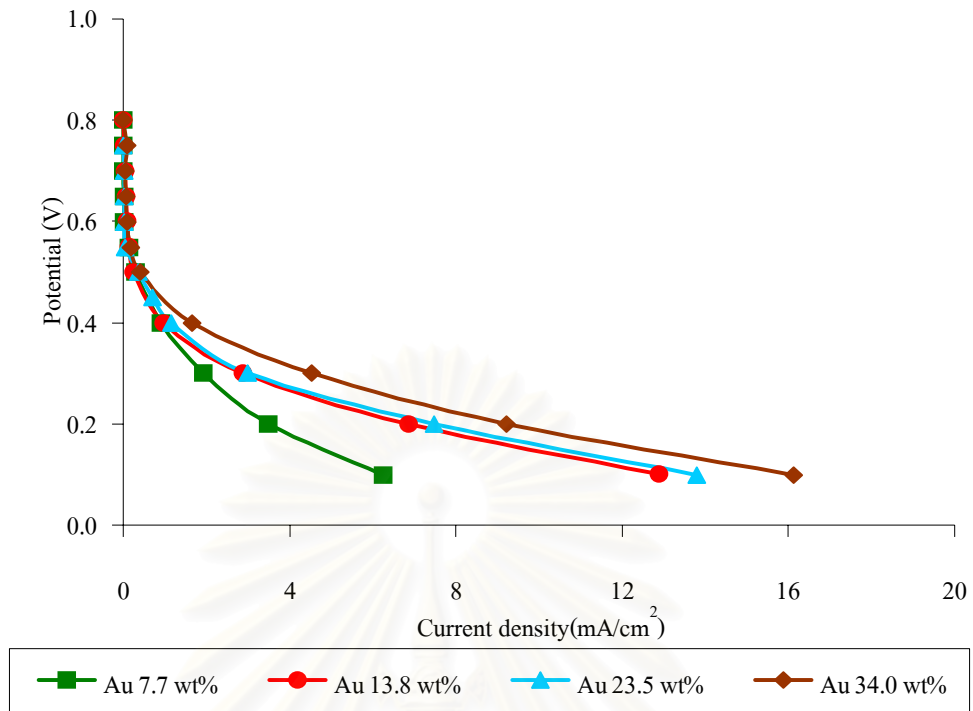
ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ							
โคบอลต์		ทองแดง		นิกเกิล		ทอง	
ธาตุ	ร้อยละ	ธาตุ	ร้อยละ	ธาตุ	ร้อยละ	ธาตุ	ร้อยละ
Al	0.656	Al	1.415	Si	0.248	Cl	3.373
Si	0.719	Si	1.669	Cl	0.479	K	1.999
Cl	0.560	K	1.890	K	2.296	Fe	0.102
K	2.104	Fe	0.614	Ni	16.044	Au	13.799
Ca	0.556	Cu	13.078				
Co	14.574						

จากการทดลองสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 7.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.0 มิลลิวัตต์ ขนาดอนุภาคโลหะทอง 94 นาโนเมตร ทั้งนี้เนื่องจากโลหะทองนั้นมีสมบัติใกล้เคียงกับโลหะแพลทินัมและเป็นโลหะตระกูลสูง ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงจากโลหะเป็นโลหะออกไซด์ ดังนั้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเตรียมชีวไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

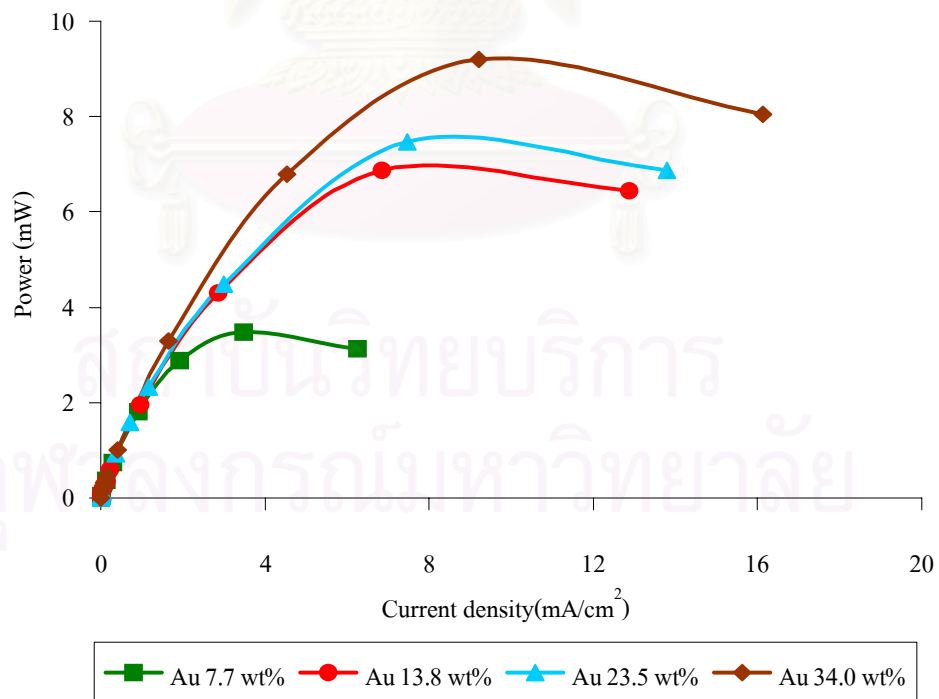
4.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงกราฟโพลาริเซชันและกำลังไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ 7.7-34.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักบนตัวรองรับคาร์บอนไอแกนติก ด้วยวิธีแพร่ซึมและศึกษาสมบัติของชีวไฟฟ้าได้แก่ ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและประสิทธิภาพการทำงานของชีวไฟฟ้า ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของชีวไฟฟ้าจะใช้ชีวไฟฟ้าแอโนดคือ ชีวไฟฟ้าแพลทินัมจากบริษัท Electrochem และชีวไฟฟ้าแคโทดคือ ชีวไฟฟ้าโลหะที่ได้จากการเตรียม ภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

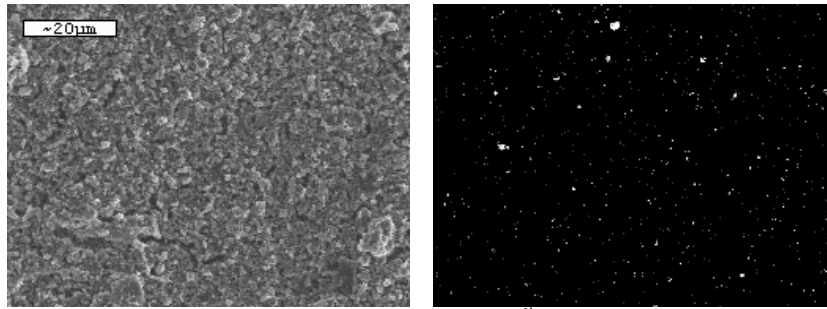
คือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณโลหะทองต่าง ๆ นั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองนั้นเกิดปฏิกิริยาได้ช้าทำให้เกิดโพลาริเซชันทางเคมีมาก โดยสังเกตได้จากกราฟโพลาริเซชันในช่วงเริ่มต้น 0.6-0.7 โวลต์ จะเห็นว่ากราฟมีการลดลงเป็นอย่างมากและเมื่อสังเกตในช่วงโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานจะพบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเดียวกันเมื่อปริมาณโลหะทองเพิ่มขึ้นจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเรียงจากมากไปหาน้อยดังนี้ Au/C ร้อยละ 34.0 โดยน้ำหนัก > Au/C ร้อยละ 23.5 โดยน้ำหนัก > Au/C ร้อยละ 13.8 โดยน้ำหนัก > Au/C ร้อยละ 7.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความต้านทานลดลงเมื่อปริมาณโลหะทองมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moreira และคณะ (2003) ที่สรุปว่าเมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเพิ่มขึ้นนั้นจะช่วยให้การสูญเสียค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันทางเคมีและโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน และเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM และ TEM พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่ปริมาณโลหะต่าง ๆ นั้นให้การกระจายตัวของโลหะบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทั่วบริเวณแผ่นขั้วไฟฟ้าและมีปริมาณรวมทั้งการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณโลหะทองที่เพิ่มขึ้นในการเตรียม โดยสังเกตได้จากจุดสีขาวมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นและการกระจายตัวทั่วบริเวณแผ่นขั้วไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 4.14 ภาพทางขวามือ แต่เมื่อพิจารณาผลของการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแต่ละชนิดที่เตรียมได้จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยโลหะทองที่ปริมาณร้อยละ 7.7, 13.8, 23.5 และ 34.0 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคประมาณ 99, 94, 51 และ 38 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีพื้นที่ผิวดัเร่งปฏิกิริยาประมาณ 3.14, 3.30, 6.09 และ 8.21 ตามลำดับ โดยที่ปริมาณโลหะทองร้อยละ 34.0 โดยน้ำหนักนั้นจะมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดจึงทำให้การเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีและให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากปริมาณของโลหะทองที่ใช้ในการเตรียมแตกต่างกัน โดยเมื่อใช้ปริมาณของโลหะทองน้อยก็มีความเข้มข้นของสารละลายที่ต่ำ ซึ่งต้องใช้เวลาในการระเหยสารละลายจนกระทั่งเป็นผงทำให้อนุภาคโลหะอาจเกิดการรวมตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ ในขณะที่ปริมาณของโลหะทองมากก็มีความเข้มข้นของสารละลายที่สูงจะใช้เวลาในการระเหยสารละลายจนกระทั่งเป็นผงทำให้อนุภาคโลหะที่ได้มีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามอนุภาคอาจเกิดการรวมตัวกันได้ในสารละลายจากการที่มีการถ่ายโอนมวลที่ไม่ดี



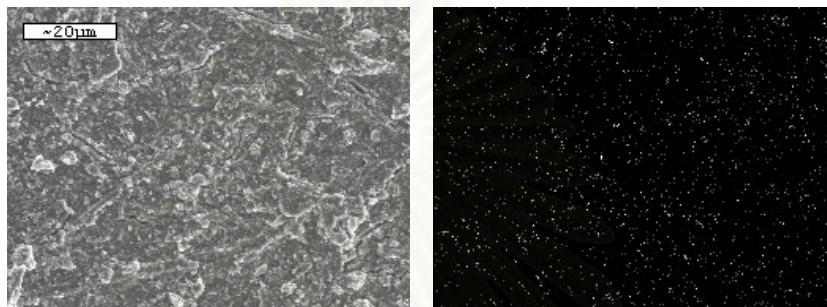
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ปริมาณทองต่าง ๆ



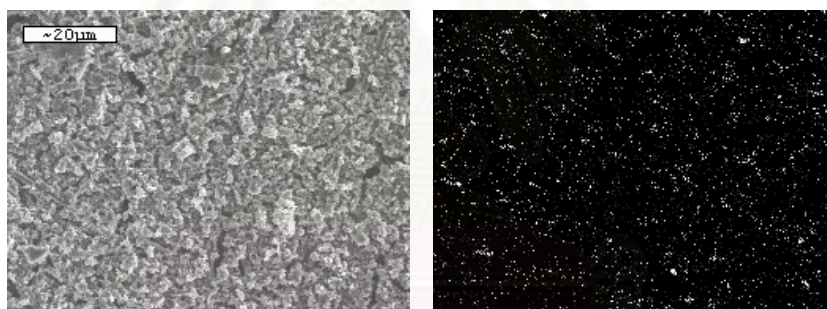
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ปริมาณทองต่าง ๆ



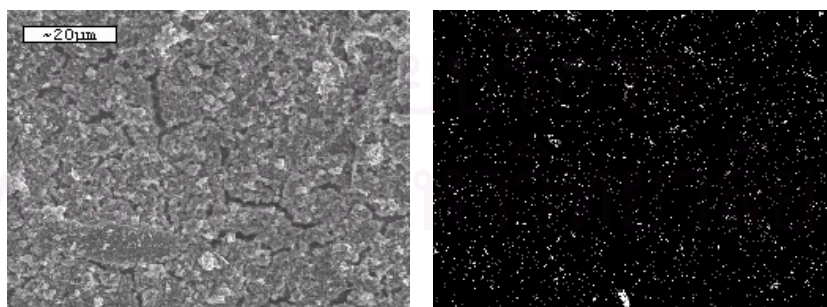
(ก) ทองร้อยละ 7.7 โดยน้ำหนัก



(ข) ทองร้อยละ 13.8 โดยน้ำหนัก

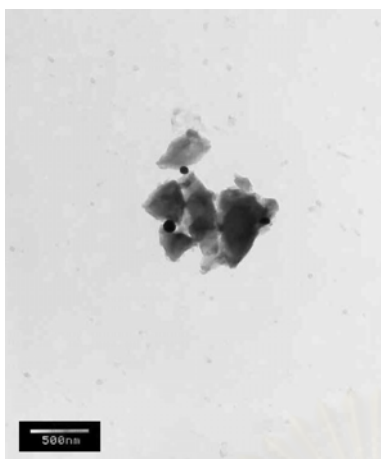


(ค) ทองร้อยละ 23.5 โดยน้ำหนัก

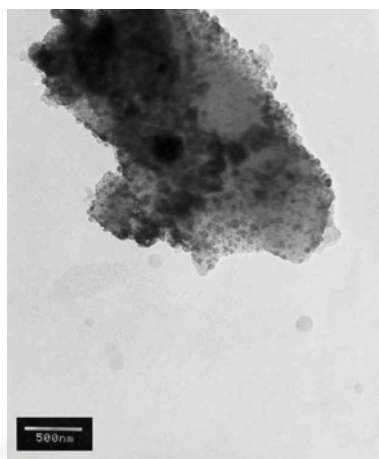


(ง) ทองร้อยละ 34.0 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ปริมาณต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 250 เท่า โดยที่ภาพซ้ายแสดงผิวหน้าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ภาพขวาแสดงการกระจายตัวของโลหะ



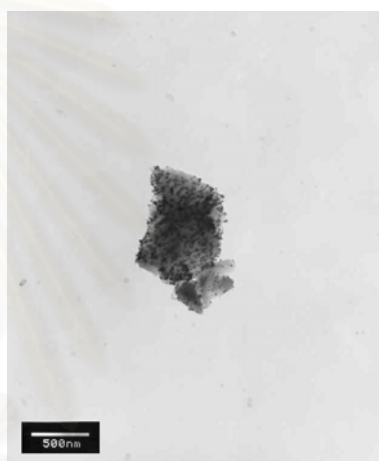
(ก) ทองร้อยละ 7.7 โดยน้ำหนัก



(ข) ทองร้อยละ 13.8 โดยน้ำหนัก



(ค) ทองร้อยละ 23.5 โดยน้ำหนัก



(ง) ทองร้อยละ 34.0 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.15 สันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ปริมาณต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM กำลังขยาย 1 ล้านเท่า

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ปริมาณโลหะทองร้อยละ 7.7, 13.8, 23.5 และ 34.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะแสดงธาตุและปริมาณ ผลการวิเคราะห์พบว่าบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีธาตุที่วิเคราะห์ได้หลายธาตุด้วยกัน ได้แก่ คลอรีน โพแทสเซียม เหล็ก เป็นต้น ซึ่งคลอรีนที่พบนั้นมาจากสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมคือ โกลด์คลอไรด์ไตรไฮเดรต ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าลดลง แต่จะพบว่ามีปริมาณเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบผงตัวเร่งปฏิกิริยาของที่ปริมาณโลหะทองร้อยละ 7.7, 13.8, 23.5 และ 34.0 โดยน้ำหนัก

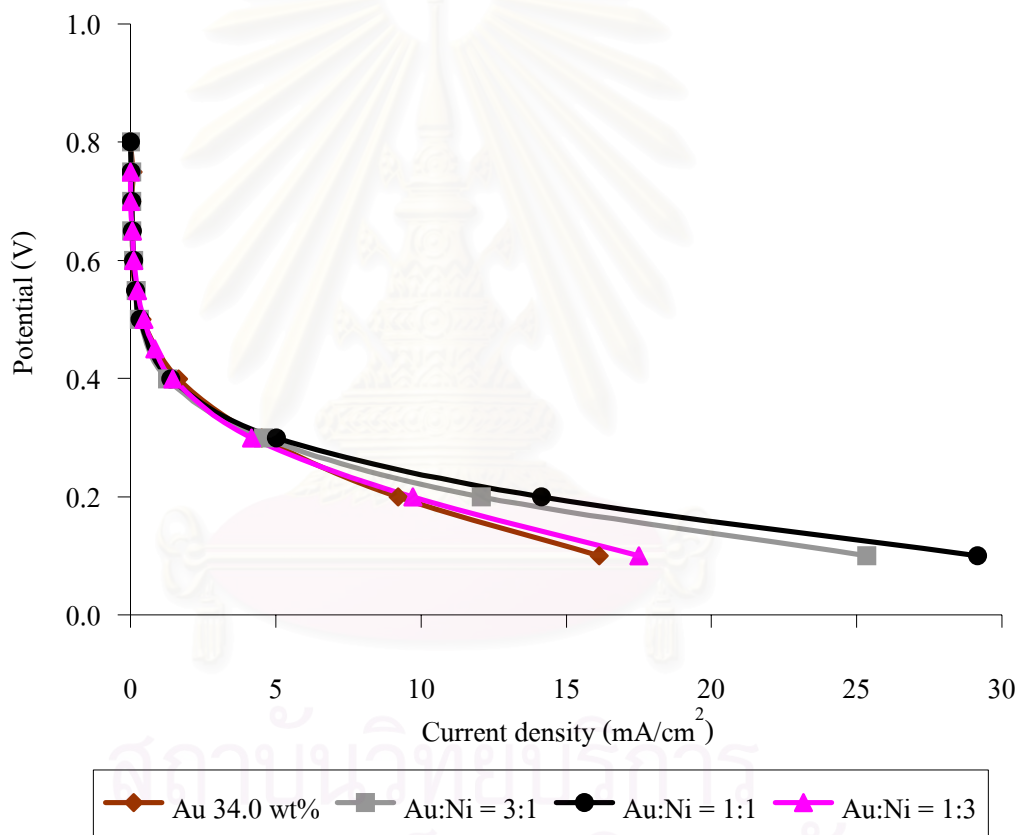
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณโลหะทองร้อยละ							
7.7 โดยน้ำหนัก		13.8 โดยน้ำหนัก		23.5 โดยน้ำหนัก		34.0 โดยน้ำหนัก	
ธาตุ	ร้อยละ	ธาตุ	ร้อยละ	ธาตุ	ร้อยละ	ธาตุ	ร้อยละ
Cl	1.342	Cl	3.373	Cl	2.212	Cl	4.449
K	0.668	K	1.999	K	1.121	K	0.884
Fe	0.133	Fe	0.102	Fe	1.364	Fe	0.283

จากการทดลองในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณโลหะทองร้อยละ 7.7, 13.8, 23.5 และ 34.0 โดยน้ำหนัก สามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณโลหะทองร้อยละ 34.0 โดยน้ำหนัก นั้นให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่าที่ปริมาณโลหะทองร้อยละ 7.7, 13.8 และ 23.5 ในการเตรียม โดยให้ค่ากำลังไฟฟ้า 9.2 มิลลิวัตต์ ดังนั้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาของสำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณโลหะทองร้อยละ 34.0 โดยน้ำหนักในการเตรียม

4.6 ผลของอัตราส่วนของโลหะผสม

จากการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองชนิดเดียว พบว่าประสิทธิภาพที่ได้ นั้นยังต่ำมาก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองนั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน 2 ขั้นตอน ซึ่งอาจมีขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งเกิดปฏิกิริยาได้ช้า ดังนั้นในการทดลองจึงได้ทำการเติมโลหะ นิกเกิลเข้าไปซึ่งคาดว่าจะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่เกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งจะทำการเตรียม ขั้วไฟฟ้าด้วยการผสมระหว่างโลหะทองที่ปริมาณโลหะร้อยละ 34.0 โดยน้ำหนักกับนิกเกิล โดยมี อัตราส่วนอะตอมของทองต่อนิกเกิล 3:1 1:1 และ 1:3 บนตัวรองรับคาร์บอน ด้วยวิธีแพร่ซึมและ ศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้าได้แก่ ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา และ ประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้า ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้าจะใช้ ขั้วไฟฟ้าแอโนดคือ ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมจากบริษัท Electrochem Ltd. และขั้วไฟฟ้าแคโทดคือ ขั้วไฟฟ้าโลหะที่ได้จากการเตรียม ภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน เท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ

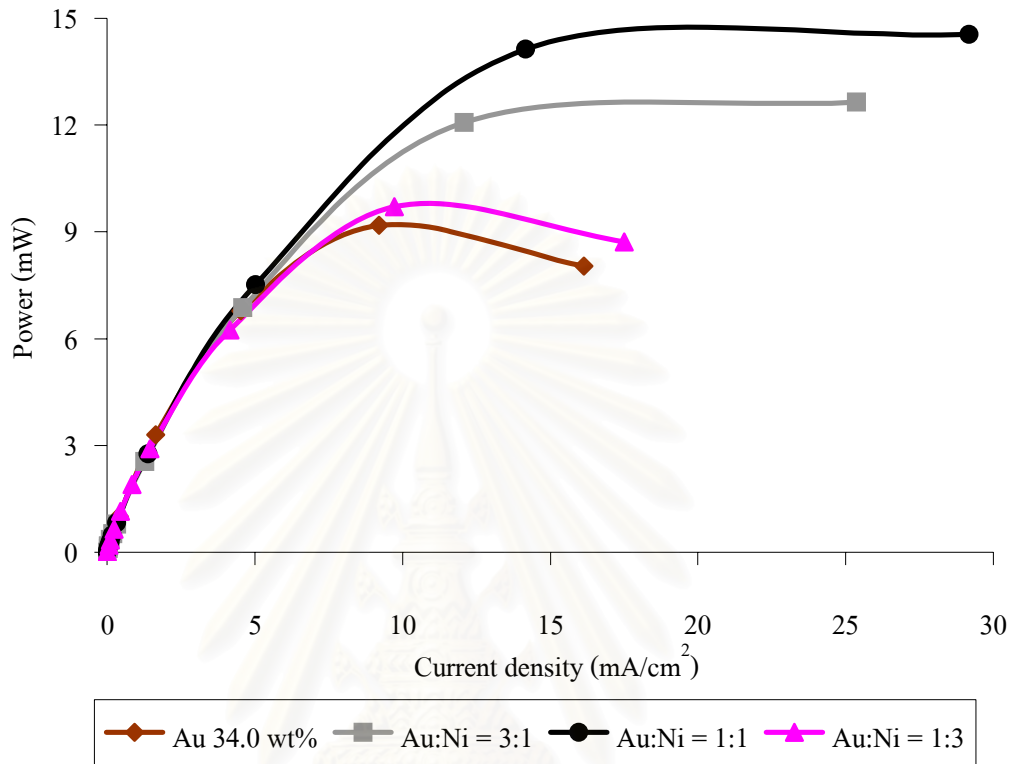
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าพบว่า เมื่อเติมโลหะนิกเกิลเข้าไปผสมกับโลหะทองนั้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งเกิดจากโพลาไรเซชันทางเคมีมากแต่จากกราฟพบว่าการเติมโลหะนิกเกิลเข้าไปที่อัตราส่วนของโลหะผสมระหว่างทองกับนิกเกิลจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน ซึ่งที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเดียวกันค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้เรียงจากมากไปหาน้อยของอัตราส่วนทองต่อนิกเกิลดังนี้ $\text{Au:Ni} = 1:1 > \text{Au:Ni} = 3:1 > \text{Au:Ni} = 1:3$ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณโลหะนิกเกิลเข้าไปในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลต่อขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่อัตราส่วนโลหะผสมต่าง ๆ

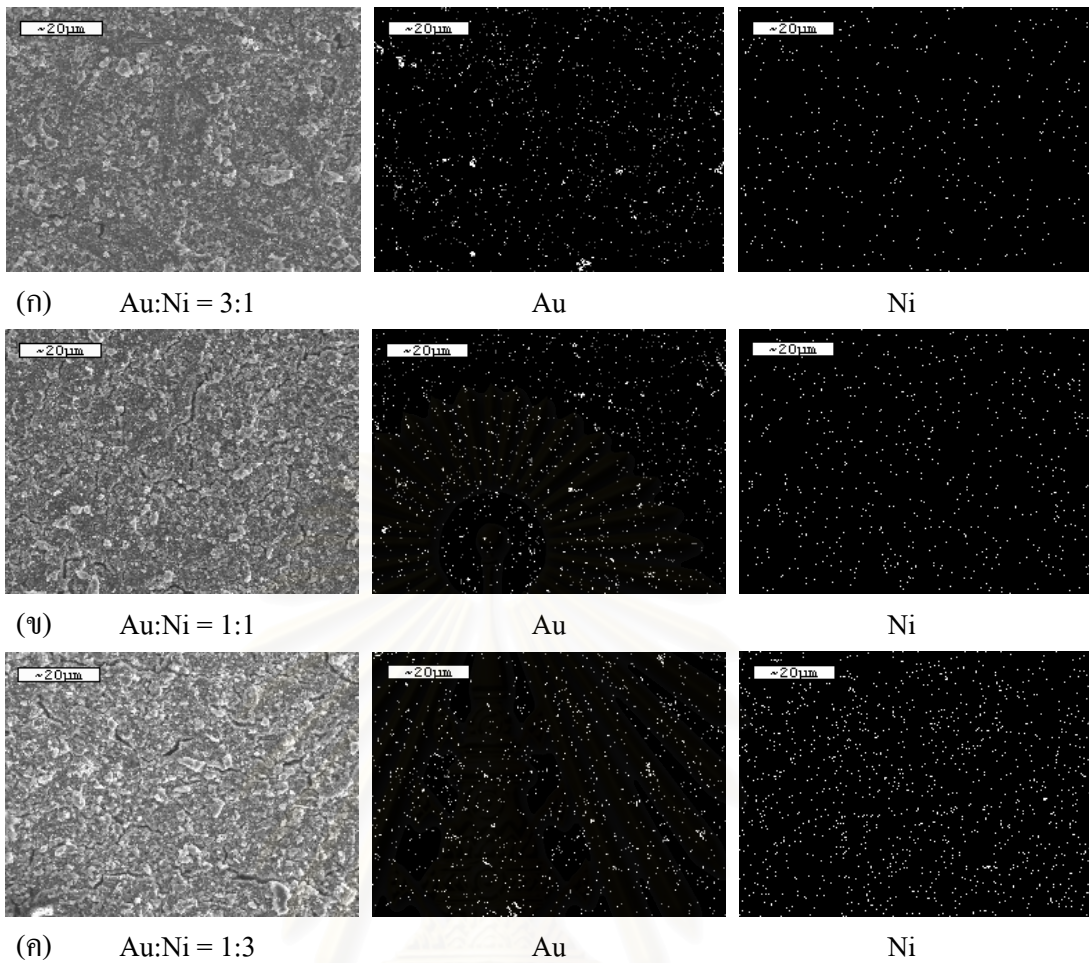
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าและหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ($\text{Power}_{\text{max}}$) พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลลอยด์เรียงจากมากไป

หาน้อยเป็นดังนี้ $\text{Au:Ni} = 1:1 > \text{Au:Ni} = 3:1 > \text{Au:Ni} = 1:3$ ที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.2 โวลต์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมที่เตรียมได้

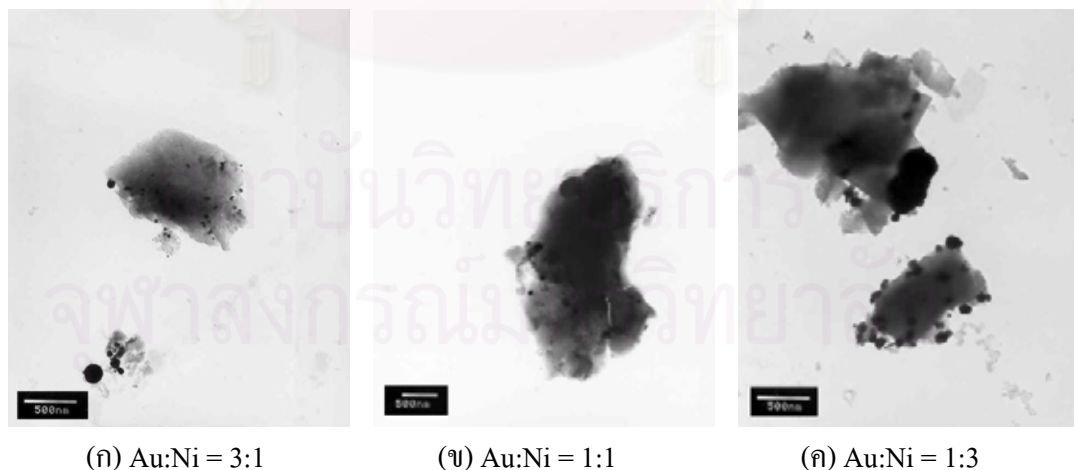


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่อัตราส่วนโลหะผสมต่าง ๆ

รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายตัวของโลหะชนิดต่าง ๆ บนขั้วไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM โดยที่ภาพทางซ้ายมือ แสดงผิวหน้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่กำลังขยาย 250 เท่า ภาพกลางแสดงตำแหน่งของโลหะทองบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและภาพทางขวามือแสดงตำแหน่งของโลหะนิกเกิลบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (จุดสีขาวแสดงตำแหน่งของอนุภาคโลหะ) พบว่ามีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้ามาน้อยกว่าที่สมควร และด้วยการกระจายตัวที่สม่ำเสมอจึงไม่น่าที่จะเป็นปัจจัยที่ทำให้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้แตกต่างกัน ส่วนรูปที่ 4.19 แสดงขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลลอยด์ที่อัตราส่วนโดยอะตอมต่าง ๆ พบว่าขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะอัลลอยด์ระหว่างทองกับนิกเกิลมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันเมื่อใช้ปริมาณโลหะนิกเกิลในการเตรียมที่ต่างกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาทองและนิกเกิลอัลลอยด์ที่อัตราส่วน 3:1 1:1 และ 1:3 มีขนาดอนุภาคประมาณ 82, 49 และ 104 นาโนเมตรตามลำดับ



รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมระหว่างทองคำกับนิกเกิลที่อัตราส่วนโดยอะตอมต่าง ๆ



รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะผสมทองคำและนิกเกิลที่อัตราส่วนต่าง ๆ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM ที่กำลังขยาย 1 ล้านเท่า

จากการทดลองสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนโลหะผสมทองต่อนิกเกิลที่อัตราส่วน 1:1 นั้นให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 11.9 มิลลิวัตต์ ดังนั้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเตรียม ขี้ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมทองต่อนิกเกิลที่อัตราส่วนอะตอม 1:1 ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าโดยไม่ใช้โลหะแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน เพื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนพบว่า มีตัวแปรอยู่หลายตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิในการรีดิวซ์ ชนิดของตัวรองรับคาร์บอน ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนของโลหะผสม เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแพร่ซึม โดยอุณหภูมิในการรีดิวซ์ที่เหมาะสมของโลหะโคบอลต์คือ 460 องศาเซลเซียส โลหะทองแดงคือ 400 องศาเซลเซียส โลหะนิกเกิลคือ 430 องศาเซลเซียส และโลหะทองคือ 350 องศาเซลเซียส

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงโดยภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 100 sccm อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 100 sccm ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 350 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าอุณหภูมิในการรีดิวซ์ 600 องศาเซลเซียส และตัวรองรับคาร์บอน ใจแกนดิกให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแกรไฟต์ โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ $Au > Ni > Co > Cu$ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดคือ ทอง และเมื่อทำการศึกษาผลของปริมาณโลหะทองพบว่า การเพิ่มปริมาณ โลหะทองเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น สำหรับโลหะผสมคือ ทองกับนิกเกิลจะให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงกว่าโลหะทอง ซึ่งที่อัตราส่วนโดยอะตอมของโลหะผสมทองต่อนิกเกิลจะให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ $1:1 > 3:1 > 1:3$ ดังนั้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าโดยไม่ใช้โลหะแพลทินัมสำหรับปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชันในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน โปรตอนนั้น ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมคือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมทองกับนิกเกิลที่อัตราส่วนโดยอะตอม 1:1 บนตัวรองรับคาร์บอน ใจแกนดิก โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองที่ปริมาณ โลหะร้อยละ 34.0 โดยน้ำหนัก และผ่านการเผาด้วยบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ

บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 28.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 14.4 มิลลิวัตต์ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.1 โวลต์ เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติของขั้วไฟฟ้าด้วยภาพถ่ายจาก TEM และ SEM พบว่าขนาดอนุภาคโลหะที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาค 49 นาโนเมตร และให้การกระจายตัวของโลหะที่ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

- โลหะที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีโลหะแพลทินัมหรือโลหะที่มีวิถีทางการเกิดปฏิกิริยา 4 อิเล็กตรอนเป็นองค์ประกอบ เพราะจะช่วยในการเร่งปฏิกิริยาได้ดี
- ในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้วิธีแพร่ซึมนั้นจะไม่สามารถกำหนดขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงควรศึกษาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีอื่น ๆ
- ในขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยใช้วิธีการระบายจะมีข้อเสียคือ สารผสมที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอาจหลุดเกาะติดไปกับฟุ้งกันหรืออุปกรณ์ ดังนั้นจึงควรหาวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีอื่น ๆ

รายการอ้างอิง

เอกสารภาษาไทย

- เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. กระดาษไลซิสแบบเฮทเทอโรจีเนียส-หลักทฤษฎีและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- สุกัญญา ทองคำ. ผลของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเชื้อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

เอกสารภาษาอังกฤษ

- Appleby, A.J., and Foulkes, F.R. Fuel Cell Handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- Bond, G.C. Heterogeneous Catalysis: Principles and Applications. 2nd ed. Oxford, U.K. Clarendon Press, 1987.
- Bossel, U. The birth of the fuel cell. Fuel Cell Handbook. 4th ed. edited by J.H., 2000.
- Dandekar, A., Baker, R.T.K., and Vannice, M.A. Carbon-supported copper catalysts. Journal of Catalysis 183(1999): 131-154.
- Demirel-Gulen, S., Lucas, M., and Claus, P. Liquid phase oxidation of glycerol over carbon supported gold catalysts. Journal of Catalysis Today 102-103(2005): 166-172.
- Faubert, G., Cote, R., Guay, D., Dodelet, J.P., Denes, G., Poleunis C., and Bertrand, P. Activation and characterization of Fe-based catalysts for the reduction of oxygen in polymer electrolyte fuel cells. Journal of Electrochimica Acta 43(1998): 1964-1984.
- Gojkovic, S.Lj., Gupta, S., and Savinell, R.F. Heat-treated iron (III) tetramethoxyphenyl porphyrin chloride supported on high-area carbon as an electrocatalyst for oxygen reduction. Journal of Electroanalytical Chemistry 462(1999): 63-72.

- Hou, Z., Yi, B., Yu, H., Lin, Z., and Zhang, H. CO tolerance electrocatalyst of PtRu-H_xMeO₃/C (Me = W, Mo) made by composite support method. Journal of Power Sources 123(2003): 116-125.
- Kinoshita, K. Electrochemical Oxygen Technology. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- Larminie, J., and Dicks, A. Fuel Cell Systems Explained. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- Lefevre, M., and Dodelet, J.P. O₂ reduction in PEM fuel cells: Activity and active site structural information for catalysts obtained by the pyrolysis at high temperature of Fe precursors. Journal of Physical Chemistry B 104(2000): 11238-11247.
- Lipkowsky, J., and Ross, P.N. Electrocatalysis. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- McDermott, J. Electroless Plating and Coating of Metals. New York: John Wiley & Sons, 1972.
- Mehta, V., and Cooper, J.S. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. Journal of Power Sources 114(2003): 32-53.
- Mennola, T. Design and Experimental Characterization of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. Degree of Licentiate of Technology. Department of Engineering Physics and Mathematics. Helsinki University of Technology, 2000.
- Moreira, J., Del Angel, P., Ocampo, A.L., Sebastian, P.J., Montoya, J.A., and Castellanos, R.H. Synthesis, Characterization and application of a Pd/Vulcan and Pd/C catalyst in a PEM fuel cell. Journal of Hydrogen Energy 29(2004): 915-920.
- Satterfield, C.N. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1980.
- Savagado, O. Theory Techniques and Applications.: In interfacial electrochemistry. New York: Marcel Dekker, 1999.
- Sopian, K., and Wan Daud, W.R. Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. Journal of Renewable Energy 31(2006): 719-727.
- Tian, J.H., Wang, F.B., Shan, ZH.Q., Wang, R.J., and Zhang, J.Y. Effect of preparation conditions of Pt/C catalysts on oxygen electrode performance in proton exchange membrane fuel cells. Journal of Applied Electrochemistry 34(2004): 461-467.
- Verde, Y., Alonso, G., Ramos, V., Zhang, H., Jacobson, A.J., and Keer A. Pt/C obtained from carbon with different treatments and (NH₄)₂PtCl₆ as a Pt precursor. Journal of Applied Catalysis 277(2004): 201-207.

- Vielstich, W., Gasteiger, H.A. and Lamm A. Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications. Vol. 1: Fundamentals and survey of systems. New York: John Willey & Sons, 2003.
- Vielstich, W., Gasteiger, H.A. and Lamm A. Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications. Vol. 2: Electrocatalysis. New York: John Willey & Sons, 2003.
- Vielstich, W., Gasteiger, H.A. and Lamm A. Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications. Vol. 4: Fuel cell technology and applications. New York: John Willey & Sons, 2003.
- Zhou, G., Jiang, Y., Xie, H., and Qiu, F. Non-noble metal catalyst for carbon monoxide selective oxidation in excess hydrogen. Journal Chemical Engineering 109(2005): 141-145.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

ก-1 การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอน

ตัวอย่างการคำนวณ 20 wt.% Co/C โดยใช้ปริมาณคาร์บอน 0.02 g

ขั้นตอนที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยา Co/C 100 %		
	ปริมาณ	C 80 %	Co 20 %
	ปริมาณ	C 0.02 g	Co $\frac{0.02 \times 20}{80} = 0.005 \text{ g}$
	ดังนั้นใช้	Co 0.005 g ต่อคาร์บอน 0.02 g เพื่อเตรียม 20 wt% Co/C	
ขั้นตอนที่ 2	เตรียมสารละลายโลหะ โดยใช้ 1 g ของ $C_{10}H_{14}CoO_4$ ปรับปริมาตรเป็น 25 ml		
	$C_{10}H_{14}CoO_4$	มีมวลโมเลกุล	257.15 g/gmole
	Co	มีมวลโมเลกุล	58.93 g/gmole
	น้ำหนักของสารตั้งต้น		
	Co	58.93 g/gmole	$C_{10}H_{14}CoO_4$ 257.15 g/gmole
	Co	0.005 g	$C_{10}H_{14}CoO_4$ $\frac{0.005 \times 257.15}{58.93} = 0.0218 \text{ g}$
	ปริมาตรของสารตั้งต้น		
	$C_{10}H_{14}CoO_4$	1 g	ปริมาตร 25 ml
	$C_{10}H_{14}CoO_4$	0.0218 g	ปริมาตร $0.0218 \times 25 = 0.545 \text{ ml}$

ดังนั้น 20 wt% Co/C เตรียมโดย ชั่งผงคาร์บอน 0.02 g และเปิดสารละลาย $C_{10}H_{14}CoO_4$ ที่มีความเข้มข้น 40 mg/ml ปริมาตร 0.545 ml

ก-2 การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมทองคำกับนิกเกิลบนตัวรองรับคาร์บอน

ตัวอย่างการคำนวณ 40 wt.% Au-Ni/C อัตราส่วน 3:1 โดยใช้ปริมาณคาร์บอน 0.02 g

ขั้นตอนที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยา Au/C 100 %	
	ปริมาณ C 60 %	Au 40 %
	ปริมาณ C 0.02 g	Au $\frac{0.02 \times 40}{60} = 0.0133$ g
	ดังนั้น Au/C = 0.0333 g	
ขั้นตอนที่ 2	เทียบอัตราส่วน โดยอะตอม	
	Au มีมวลโมเลกุล 196.97 g/gmole	
	Ni มีมวลโมเลกุล 58.69 g/gmole	
	เปลี่ยนจากกรัมเป็นอะตอม	
	Au = 0.0133 g = $0.0133 \times \frac{6.62 \times 10^{23}}{196.97}$ atom	= 4.47×10^{19} atom
	เทียบอะตอม	
	Au :	Ni
	3 :	1
	4.47×10^{19} :	Ni
	Ni = $\frac{4.47 \times 10^{19}}{3}$ atom	= 1.49×10^{19} atom
	เปลี่ยนจากอะตอมเป็นกรัม	
	Ni = 1.49×10^{19} atom = $1.49 \times 10^{19} \times \frac{58.69}{6.62 \times 10^{23}}$	= 0.0013 g
	เพราะฉะนั้นคิดเป็น Au = 0.0133 g	
	Ni = 0.0013 g	
ขั้นตอนที่ 3	เตรียมสารละลายโลหะ โดยใช้ 1 g ของ $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ปรับปริมาตรเป็น 25 ml	
	$\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ มีมวลโมเลกุล 393.83 g/gmole	
	Au มีมวลโมเลกุล 196.97 g/gmole	
	น้ำหนักของสารตั้งต้น	
	Au 196.97 g/gmole	$\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 393.83 g/gmole
	Au 0.0133 g	$\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ $\frac{0.0133 \times 393.83}{196.97} = 0.0266$ g

ปริมาณของสารตั้งต้น

$\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1 g	ปริมาตร	25 ml
$\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	0.0266 g	ปริมาตร	$0.0266 \times 25 = 0.65$ ml

เตรียมสารละลายโลหะ โดยใช้ 1 g ของ $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{NiO}_4$ ปรับปริมาตรเป็น 25 ml

$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{NiO}_4$ มีมวลโมเลกุล 256.91 g/gmole

Ni มีมวลโมเลกุล 58.69 g/gmole

น้ำหนักของสารตั้งต้น

Ni	58.69 g/gmole	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{NiO}_4$	256.91 g/gmole
Ni	0.0013 g	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{NiO}_4$	$\frac{0.0013 \times 256.91}{58.69} = 0.0057$ g

ปริมาณของสารตั้งต้น

$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{NiO}_4$	1 g	ปริมาตร	25 ml
$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{NiO}_4$	0.0057 g	ปริมาตร	$0.0057 \times 25 = 0.1425$ ml

ดังนั้น 40 wt% Au-Ni/C เตรียมโดย ชั่งผงคาร์บอน 0.02 g และปีเปตสารละลาย $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ที่มีความเข้มข้น 40 mg/ml ปริมาตร 0.65 ml และปีเปตสารละลาย $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{NiO}_4$ ที่มีความเข้มข้น 40 mg/ml ปริมาตร 0.1425 ml

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก-3 การคำนวณอนุภาคเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา (d_{av}) จากสูตร

$$d_{av} = \frac{\sum f_i d_i^3}{\sum f_i d_i^2}$$

d_i = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวเร่งปฏิกิริยา (นาโนเมตร)

f_i = จำนวนอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเท่ากับ d_i

ตัวอย่างการคำนวณขนาดอนุภาคของโลหะบรอน

ตารางที่ ก-1 แสดงขนาดอนุภาคของ Au/C ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 350 องศาเซลเซียส จากภาพถ่าย TEM

ขนาดอนุภาค (d_i , นาโนเมตร)	จำนวนอนุภาค (f_i)
167	2
83	9
63	5
42	20
21	28

$$d_{av} = \frac{(2 \times 167^3) + (9 \times 83^3) + (5 \times 63^3) + (20 \times 42^3) + (28 \times 21^3)}{(2 \times 167^2) + (9 \times 83^2) + (5 \times 63^2) + (20 \times 42^2) + (28 \times 21^2)}$$

เพราะฉะนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ Au/C ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 350 องศาเซลเซียส เท่ากับ 94.3 นาโนเมตร

ก-4 การคำนวณพื้นที่ผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา

การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาคำนวณได้จากสูตร [Hou และคณะ 2003]

$$S = \frac{6000}{\Phi\rho}$$

S = พื้นที่ผิวโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)

ρ = ความหนาแน่นของโลหะ (โคบอลต์ 8.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, ทองแดง 8.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, นิกเกิล 8.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ทอง 19.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

Φ = ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา (นาโนเมตร)

ตัวอย่างการคำนวณพื้นที่ผิวโลหะของ Au/C ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 350 องศาเซลเซียส

ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ โลหะของ Au/C ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 350 องศาเซลเซียส 94.3 นาโนเมตร

$$S = \frac{6000}{19.3 \times 94.3} = 3.30 \text{ m}^2/\text{g}$$

เพราะฉะนั้นพื้นที่ผิวโลหะของของ Au/C ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการรีดิวซ์ 350 องศาเซลเซียส เท่ากับ 3.30 ตารางเมตรต่อกรัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ตารางที่ ข1 แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ
ตัวเร่งปฏิกิริยาทองโดยใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์ที่ 350 และ 600 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของไฮโดรเจน	=	100	sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	=	100	sccm
อุณหภูมิของระบบให้ความชื้น	=	60	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง	=	60	องศาเซลเซียส
ความดัน	=	1	บรรยากาศ

E(V)	Reduce temperature 350 °C				Reduce temperature 600 °C			
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)
0.80					0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0020	0.0113	0.0424
0.70	0.0229	0.0858	0.0423	0.1586	0.0102	0.0358	0.0123	0.0429
0.65	0.0302	0.1058	0.0810	0.2834	0.0128	0.0415	0.0140	0.0454
0.60	0.0389	0.1266	0.0915	0.2974	0.0165	0.0495	0.0340	0.1018
0.55	0.0510	0.1531	0.1244	0.3731	0.0216	0.0594	0.1348	0.3702
0.50	0.0636	0.1748	0.1901	0.5223	0.0294	0.0734	0.2866	0.7158
0.40	0.9727	1.9452	0.9741	1.9477	0.0952	0.1903	0.8642	1.7263
0.30	2.8912	4.3367	2.8501	4.2751	0.3013	0.4513	2.0485	3.0687
0.20	6.9561	6.9596	6.7664	6.7698	1.6781	1.6755	4.3192	4.3113
0.10	13.0810	6.5470	12.6806	6.3466	3.6942	1.8408	7.8444	3.9081

ตารางที่ ข2 แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของ
ตัวเร่งปฏิกิริยาของบนตัวรองรับคาร์บอนไอแกนติกและแกรไฟต์

อัตราการไหลของไฮโดรเจน	=	100	sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	=	100	sccm
อุณหภูมิของระบบให้ความชื้น	=	60	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง	=	60	องศาเซลเซียส
ความดัน	=	1	บรรยากาศ

	Gigantic				Graphite			
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
E(V)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)
0.80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
0.75	0.0229	0.0858	0.0423	0.1586				
0.70	0.0302	0.1058	0.0810	0.2834	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.65	0.0389	0.1266	0.0915	0.2974	0.0011	0.0036	0.0025	0.0083
0.60	0.0510	0.1531	0.1244	0.3731	0.0007	0.0022	0.0017	0.0052
0.55	0.0636	0.1748	0.1901	0.5223	0.0002	0.0005	0.0031	0.0086
0.50	0.1795	0.4487	0.2985	0.7460	0.0008	0.0019	0.0055	0.0137
0.40	0.9727	1.9452	0.9741	1.9477	0.0127	0.0253	0.0104	0.0208
0.30	2.8912	4.3367	2.8501	4.2751	0.0235	0.0352	0.0861	0.1290
0.20	6.9561	6.9596	6.7664	6.7698	0.0471	0.0471	0.2136	0.2134
0.10	13.0810	6.5470	12.6806	6.3466	0.1075	0.0536	0.4923	0.2455

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข3 แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของชนิดของ
ตัวเร่งปฏิกิริยา (ครั้งที่ 1)

อัตราการไหลของไฮโดรเจน	=	100	sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	=	100	sccm
อุณหภูมิของระบบให้ความร้อน	=	60	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง	=	60	องศาเซลเซียส
ความดัน	=	1	บรรยากาศ

E(V)	Cobalt		Copper		Nickel		Gold	
	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)
0.80							0.0000	0.0000
0.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			0.0229	0.0858
0.70	0.0009	0.0031	0.0010	0.0036	0.0000	0.0000	0.0302	0.1058
0.65	0.0102	0.0333	0.0051	0.0165	0.0033	0.0108	0.0389	0.1266
0.60	0.0146	0.0437	0.0076	0.0228	0.0093	0.0278	0.0510	0.1531
0.55	0.0189	0.0521	0.0108	0.0296	0.0118	0.0324	0.0636	0.1748
0.50	0.0243	0.0608	0.0141	0.0352	0.0168	0.0420	0.1795	0.4487
0.40	0.2862	0.5723	0.0249	0.0498	0.5191	1.0380	0.9727	1.9452
0.30	0.9910	1.4865	0.1161	0.1740	1.3781	2.0671	2.8912	4.3367
0.20	2.1059	2.1069	0.4782	0.4777	2.9166	2.9181	6.9561	6.9596
0.10	3.5299	1.7667	0.9147	0.4563	4.0171	2.0105	13.0810	6.5470

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๔ แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของชนิดของ
ตัวเร่งปฏิกิริยา (ครั้งที่ 2)

อัตราการไหลของไฮโดรเจน	=	100	sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	=	100	sccm
อุณหภูมิของระบบให้ความชื้น	=	60	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง	=	60	องศาเซลเซียส
ความดัน	=	1	บรรยากาศ

E(V)	Cobalt		Copper		Nickel		Gold	
	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)
0.80							0.0000	0.0000
0.75	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			0.0423	0.1586
0.70	0.0002	0.0007	0.0025	0.0087	0.0000	0.0000	0.0810	0.2834
0.65	0.0094	0.0304	0.0151	0.0492	0.0181	0.0588	0.0915	0.2974
0.60	0.0138	0.0415	0.0250	0.0748	0.0321	0.0963	0.1244	0.3731
0.55	0.0169	0.0465	0.0354	0.0972	0.0237	0.0651	0.1901	0.5223
0.50	0.0207	0.0518	0.0417	0.1041	0.0335	0.0837	0.2985	0.7460
0.40	0.2990	0.5979	0.0416	0.0831	0.5195	1.0387	0.9741	1.9477
0.30	0.9131	1.3696	0.1012	0.1516	2.5237	3.7855	2.8501	4.2751
0.20	2.1532	2.1543	0.5070	0.5065	5.4042	5.4069	6.7664	6.7698
0.10	4.4031	2.2038	1.9088	0.9523	9.4682	4.7388	12.6806	6.3466

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข5 แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของปริมาณ
ของตัวเร่งปฏิกิริยาทอง (ครั้งที่ 1)

อัตราการไหลของไฮโดรเจน	=	100	sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	=	100	sccm
อุณหภูมิของระบบให้ความร้อน	=	60	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง	=	60	องศาเซลเซียส
ความดัน	=	1	บรรยากาศ

E(V)	7.7wt%		13.8wt%		23.5wt%		34.0wt%	
	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)
0.80			0.0000	0.0000			0.0000	0.0000
0.75	0.0000	0.0000	0.0229	0.0858	0.0000	0.0000	0.0898	0.3367
0.70	0.0077	0.0289	0.0302	0.1058	0.0127	0.0444	0.0430	0.1504
0.65	0.0106	0.0371	0.0389	0.1266	0.0116	0.0377	0.0615	0.1997
0.60	0.0125	0.0407	0.0510	0.1531	0.0174	0.0521	0.0844	0.2528
0.55	0.0166	0.0498	0.0636	0.1748	0.0420	0.1154	0.1704	0.4679
0.50	0.1365	0.3750	0.1795	0.4487	0.3685	0.9205	0.4050	1.0118
0.40	0.9055	1.8091	0.9727	1.9452	1.1635	2.3244	1.6525	3.3012
0.30	1.9247	2.8832	2.8912	4.3367	2.9920	4.4820	4.5292	6.7847
0.20	3.4904	3.4852	6.9561	6.9596	7.4736	7.4623	9.2094	9.1955
0.10	6.2548	3.1189	13.0810	6.5470	13.7928	6.8778	16.1342	8.0455

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๖ แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของปริมาณ
ของตัวเร่งปฏิกิริยาทอง (ครั้งที่ 2)

อัตราการไหลของไฮโดรเจน	=	100	sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	=	100	sccm
อุณหภูมิของระบบให้ความชื้น	=	60	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง	=	60	องศาเซลเซียส
ความดัน	=	1	บรรยากาศ

E(V)	7.7wt%		13.8wt%		23.5wt%		34.0wt%	
	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)
0.80			0.0000	0.0000			0.0000	0.0000
0.75	0.0000	0.0000	0.0423	0.1586	0.0000	0.0000	0.0717	0.2688
0.70	0.0179	0.0670	0.0810	0.2834	0.0043	0.0152	0.0391	0.1369
0.65	0.0224	0.0783	0.0915	0.2974	0.0140	0.0456	0.0523	0.1698
0.60	0.0157	0.0510	0.1244	0.3731	0.0179	0.0538	0.0496	0.1487
0.55	0.0406	0.1216	0.1901	0.5223	0.0246	0.0676	0.2055	0.5645
0.50	0.0785	0.2155	0.2985	0.7460	0.0378	0.0943	0.4354	1.0876
0.40	0.2124	0.4242	0.9741	1.9477	1.5302	3.0566	1.7490	3.4937
0.30	0.5384	0.8065	2.8501	4.2751	3.2421	4.8567	4.6982	7.0379
0.20	1.4684	1.4662	6.7664	6.7698	5.7044	5.6958	9.3868	9.3727
0.10	3.9943	1.9918	12.6806	6.3466	9.1588	4.5669	15.3959	7.6772

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข7 แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของอัตราส่วน โลหะผสมต่าง ๆ (ครั้งที่ 1)

อัตราการไหลของไฮโดรเจน	=	100	sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	=	100	sccm
อุณหภูมิของระบบให้ความร้อน	=	60	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง	=	60	องศาเซลเซียส
ความดัน	=	1	บรรยากาศ

E(V)	Au3:1Ni		Au1:1Ni		Au1:3Ni	
	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)
0.80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
0.75	0.0459	0.1721	0.0181	0.0677	0.0000	0.0000
0.70	0.0332	0.1161	0.0426	0.1491	0.0029	0.0102
0.65	0.0525	0.1703	0.0687	0.2231	0.0584	0.1895
0.60	0.1179	0.3532	0.1084	0.3250	0.1114	0.3338
0.55	0.1892	0.5197	0.1891	0.5193	0.2327	0.6391
0.50	0.3143	0.7850	0.3392	0.8474	0.4581	1.1443
0.40	1.2744	2.5460	1.2995	2.5964	1.4519	2.9001
0.30	4.5861	6.8700	4.9079	7.3540	4.1683	6.2442
0.20	12.0873	12.0691	13.9159	13.9020	9.7268	9.7122
0.10	25.3552	12.6434	28.8780	14.4043	17.5002	8.7265

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข8 แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของอัตราส่วน โลหะผสมต่าง ๆ (ครั้งที่ 2)

อัตราการไหลของไฮโดรเจน	=	100	sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	=	100	sccm
อุณหภูมิของระบบให้ความร้อน	=	60	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง	=	60	องศาเซลเซียส
ความดัน	=	1	บรรยากาศ

E(V)	Au3:1Ni		Au1:1Ni		Au1:3Ni	
	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)	j(mA/cm ²)	Power(mW)
0.80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
0.75	0.0497	0.1863	0.0176	0.0661	0.0000	0.0000
0.70	0.0369	0.1290	0.0458	0.1603	0.0029	0.0103
0.65	0.0571	0.1853	0.0745	0.2419	0.0610	0.1979
0.60	0.0883	0.2646	0.1158	0.3471	0.1208	0.3622
0.55	0.1555	0.4271	0.1989	0.5464	0.2412	0.6626
0.50	0.2730	0.6821	0.3498	0.8737	0.4790	1.1963
0.40	0.8470	1.6919	1.2121	2.4219	1.2936	2.5839
0.30	2.9018	4.3469	4.7974	7.1878	3.6941	5.5338
0.20	9.3370	9.3230	13.6764	13.6627	8.8776	8.8642
0.10	22.3121	11.1259	28.5857	14.2585	16.4301	8.1914

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอาทิตย์ กฤตยาสกุล เกิดวันที่ 30 สิงหาคม 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากศูนย์การศึกษานอกโรงเรียน สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าทำงานที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต ในตำแหน่งเจ้าหน้าที่อัตราจ้างประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย