

ผลของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมรรถนะการทำงาน
ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน



นางสาวสุกัญญา ทองคำ

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ภาควิชา เคมีเทคนิค


คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-5975-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF CATALYTIC ELECTRODE ON PERFRMANCE OF PROTON
EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL



Miss Sukanya Thongkam

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-5975-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์
เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

โดย นางสาวสุกัญญา ทองคำ

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกี้ยวลี พุกษาทร

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต)

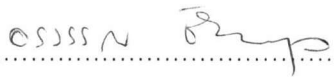
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. กัทธรพรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกี้ยวลี พุกษาทร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรวรรณ ชัยลากุล)

นางสาวสุกัญญา ทองคำ: ผลของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมรรถนะการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน. (EFFECT OF CATALYTIC ELECTRODE ON PERFORMANCE OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี 117 หน้า. ISBN 974-17-5975-4.

สมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขึ้นกับสมบัติของขั้วไฟฟ้า เช่น ความหนา ความต้านทาน ตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า เป็นต้น สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาจะดีขึ้นเมื่อระยะเวลาในการผ่านแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ใช้คาร์บอน Gigantic เป็นตัวรองรับและผ่านแก๊สไฮโดรเจนที่ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงตามด้วย 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เพื่อความเข้าใจหลักการทำงานของขั้วไฟฟ้าจึงทำการศึกษสมบัติต่างๆของขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการเตรียมขั้วไฟฟ้า 2 วิธี คือ การพิมพ์และการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้กระดาษคาร์บอนเป็นตัวรองรับ จากการศึกษาพบว่าความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาตามเทคนิคพิมพ์เท่ากับ 20 – 80 ไมครอน และความต้านทานของขั้วไฟฟ้า 50 - 250 มิลลิโอมห์ต่อตารางเซนติเมตร ความหนาของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อองค์ประกอบของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าความหนาของขั้วไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง ความต้านทานของขั้วไฟฟ้า 50 - 300 มิลลิโอมห์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาจัดได้ว่าทั้งสองวิธีมีการกระจายตัวที่ดีและพบว่าประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากันนั้นสามารถเรียงประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $Pt/C > Pt-Ru/C > Pt-Co/C > Pt-Ni/C$ และพบว่าขั้วไฟฟ้าจากเตรียมด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าให้ประสิทธิภาพการทำงานต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากการพิมพ์

ภาควิชา ...เคมีเทคนิค...
สาขาวิชา ...เคมีเทคนิค...
ปีการศึกษา ...2547...

ลายมือชื่อนิสิต..... สุกัญญา ทองคำ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4472449523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: PEMFC / ELECTRODE / CATALYST / PLATINUM / ELECTRODEPOSITION

SUKANYA THONGKAM: EFFECT OF CATALYST ELECTRODE ON PERFORMANCE OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASST. PROF. SANGOB TIP PONGSATABODEE 117 pp. ISBN 974-17-5975 -4.

The efficiency of catalytic electrode of the proton exchange membrane fuel cell depends on the characteristic of electrode such as thickness, resistance, catalyst and electrode preparation, etc. The catalyst has a good characteristic when residence time in the step of hydrogen reducing is increased. In this work, the higher efficiency of catalyst is prepared in hydrogen reducing step at 250°C for 4 hours and at 350°C for 1 hour and used carbon Gigantic supporter. To understand the electrode mechanism, we have to study the characteristic of electrode prepared by painting and electrodeposition methods on carbon paper supporter. The result shows that the thickness of catalyst layer from the painting method was 20-80 micron and the electrode resistant was 50-250 mohm/cm². The thickness increase with the increasing of composition of catalyst layer. For the electrodeposition method, the thickness of electrode didn't change and the resistant was 50-300 mohm/cm². The good dispersion of catalyst was found in these 2 methods. The efficiency of catalytic electrode increase when the quantity of catalytic increase. At the same quantity of catalyst, the efficiency of electrode can be categorized as Pt/C < Pt-Ru/C < Pt-Co/C < Pt-Ni/C. The electrode prepared by electrodeposition method has a lower efficiency than that by painting method.

Department ...Chemical Technology...

Student's signature.....*Sukanya Thongkam*.....

Field of study ...Chemical Technology...

Advisor's signature.....*Kejvalee Pruksathorn*.....

Academic year ...2004...

Co-advisor's signature.....*Sangobtip Pongsatabodee*.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์ชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. สบทิพย์ พงศ์สถาปตี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตตานต์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการเตรียมตัวเร่งปฏิบัติการ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี

ขอขอบคุณ ทบวงมหาวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณทรงวุฒิ นิธิยศศิลป์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกการทำวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
2. ทฤษฎีบท	
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.1.1 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	4
2.1.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง.....	5
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน	6
2.2.1 อิเล็กโทรไลต์.....	7
2.2.2 ขั้วไฟฟ้า.....	10
2.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	13
2.3 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า.....	17
2.3.1 ชนิดของตัวรองรับ.....	18
2.3.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	19
2.3.3 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ.....	19
2.3.4 ปริมาณของสารละลายเทฟลอน.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.5 ปริมาณของสารละลายเนฟิออน.....	20
2.3.6 อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	21
2.3.7 โครงสร้างและองค์ประกอบของชั้นแพร่.....	22
2.3.8 การสัมผัสกันของตัวเร่งปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์ในชั้นปฏิกิริยา.....	23
2.3.9 วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	24
2.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	24
2.4.1 การสเปรย์.....	24
2.4.2 การพิมพ์หรือการระบาย.....	25
2.4.3 การพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	25
2.5 การแพร่และการเกิดปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยาพรุน.....	26
2.6 การแพร่ในขั้วไฟฟ้าแบบพรุน.....	27
2.6.1 ปริมาณสารโดยเฉลี่ย.....	28
2.6.2 จลนพลศาสตร์ในขั้วไฟฟ้า.....	28
2.7 โพลาริเซชัน.....	30
2.8 Electrochemical Impedance Spectroscopy.....	33
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
3. บทที่ 3	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	40
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	40
3.4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
3.4.2 การปรับปรุงกระดาษคาร์บอน.....	40
3.4.3 การปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่น.....	41
3.4.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	41
3.5 การเตรียมMEA (Membrane Electrode Assembly).....	43

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 การวิเคราะห์สมบัติของขั้วไฟฟ้า.....	44
3.6.1 ความหนา.....	44
3.6.2 ความต้านทาน.....	44
3.6.3 การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	45
3.6.4 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน.....	45
3.7 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	46
3.7.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	46
3.7.2 ขั้นตอนภายหลังการทดลอง.....	49
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบพิมพ์.....	50
4.1.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	50
4.1.2 องค์ประกอบภายในขั้วไฟฟ้า.....	55
4.1.2.1 ผลของปริมาณเนฟลอน.....	55
4.1.2.2 ผลของปริมาณเทฟลอน.....	57
4.1.3 ปริมาณและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม.....	59
4.1.4 ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาบนกระดาษคาร์บอน.....	64
4.1.5 ความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	66
4.1.6 ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์.....	67
4.1.7 การศึกษาการออกซิเดชันของไฮโดรเจน.....	69
4.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	74
4.2.1 ความต้านทานของขั้วไฟฟ้า.....	74
4.2.2 การเกาะติดและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า.....	75
4.2.3 ความหนาของขั้วไฟฟ้า.....	76
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน..	76
4.3.1 ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าจากการเตรียมแบบพิมพ์.....	76
4.3.2 ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าจากการเตรียมแบบพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	83

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง	86
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	90
ก-1 การคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า.....	90
ก-2 การคำนวณคูลงน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง	92
ก-3 การคำนวณจำนวนประจุจากการเกิดออกซิเดชันของไฮโดรเจนในสาร ละลายกรดซัลฟูริก.....	96
ก-4 การคำนวณการนำไฟฟ้าจากการออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจน.....	99
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ EDX ของขั้วไฟฟ้า.....	100
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนชนิดต่างๆ ด้วยวิธี Pulse Chemisorptions.....	51
4.2	ผลของระยะเวลาการผ่านแก๊สไฮโดรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนคาร์บอน(Gigantic) ด้วยวิธี Pulse Chemisorptions.....	52
4.3	ผลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากการวิเคราะห์ EDX และดุลมวล.....	60
4.4	ผลการวิเคราะห์ Cyclic voltammetry ของขั้วไฟฟ้าในสารละลาย H ₂ SO ₄ 1 M, H ₂ 30 sccm เทียบกับ Saturated Calomel electrode.....	72
4.5	การเปรียบเทียบการนำไฟฟ้าจากการศึกษาการออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนกำลังไฟฟ้าสูงสุดของขั้วไฟฟ้าแพลทินัมที่ปริมาณต่างๆ.....	73
4.6	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด.....	79
4.7	เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	80
4.8	กำลังไฟฟ้าสูงสุดของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด.....	82
ค1	ผลการศึกษาชนิดของคาร์บอนที่ใช้เป็นตัวรองรับในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	103
ค2	ผลของระยะเวลาในการผ่านแก๊สไฮโดรเจนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	103
ค3	ผลของเนฟลอนต่อค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า.....	104
ค4	ผลของเนฟลอนต่อค่าความหนาของขั้วไฟฟ้า.....	104
ค5	ผลของเทฟลอนต่อค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า.....	105
ค6	ผลของเทฟลอนต่อค่าความหนาของขั้วไฟฟ้า.....	105
ค7	ผลการเปรียบเทียบการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	106
ค8	ผลการวิเคราะห์ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าเมื่อเตรียมด้วยวิธีพิมพ์.....	106
ค9	ผลการวิเคราะห์ Cyclic voltammetry ของขั้วไฟฟ้าที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ..	107
ค10	สมบัติของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem.....	107
ค11	ผลการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีดุลมวล.....	108
ค12	ผลการคำนวณปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการวิเคราะห์ EDX.....	109
ค13	ผลการวิเคราะห์ความหนาของขั้วไฟฟ้าเมื่อเตรียมด้วยวิธีพิมพ์.....	110

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ค14	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าแพลทินัม ด้วยวิธีการพิมพ์.....	111
ค15	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสกับกำลังไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแพลทินัมด้วย วิธีการพิมพ์.....	112
ค16	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าแพลทินัม อัลลอยด์ด้วยวิธีการพิมพ์.....	113
ค17	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสกับกำลังไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแพลทินัมอัล ลอยด์ด้วยวิธีการพิมพ์.....	114
ค18	แสดงปริมาณความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดย การพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	115
ค19	แสดงปริมาณการสะสมน้ำในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมด้วยวิธีการพิมพ์.....	116

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการทํางานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	7
2.2	โครงสร้างของเอทิลีนและเตตระฟลูออโรเอทิลีน.....	8
2.3	โครงสร้างของซิลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน.....	8
2.4	โครงสร้างของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่มีการดูดซึมนํ้าเอาไว้.....	9
2.5	รูปแบบเริ่มแรกของขั้วไฟฟ้าแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนกับรูปแบบใหม่ของขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถทําให้ปริมาณความต้องการของแพลทินัลดลง 10 เท่า.....	12
2.6	องค์ประกอบของขั้วไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบต่างๆ ในเซลล์เชื้อเพลิง.....	18
2.7	การทํางานของเชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่อุณหภูมิการทำงาน 80°C, H ₂ /O ₂ 1 atm ขั้วไฟฟ้ามี่ปริมาณแพลทินั่ม 0.4 mg/cm ² : (□) 10, (o) 20, (Δ) 30, (▽) 40, (◇) 60 และ (+) 80wt%Pt/C.....	20
2.8	ผลของปริมาณเนฟิออน (PFSI) ในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้า มีปริมาณแพลทินั่ม 0.5 mg/cm ² เซลล์ทํางานที่ 50 °C, 0.1 MPa.....	21
2.9	โพลาริเซชันของขั้วไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเจนรีดักชันที่ 25°C ใน H ₂ SO ₄ ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เมื่อปริมาณ PTFE บนชั้นแพรร่ต่างๆ โดยที่ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณแพลทินั่ม 0.11mg/cm ²	23
2.10	กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการสเปรย์.....	24
2.11	กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์.....	25
2.12	ตัวเร่งปฏิกิริยาพอรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม.....	27
2.13	แพรร่และปฏิกิริยาที่เกิดในช่องว่างในตัวเร่งปฏิกิริยา.....	27
2.14	โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	31
2.15	(a) วงจรไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี (b) ลักษณะอิมพีแดนซ์ใน faradic process.....	33
2.16	ลักษณะของกราฟอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำ.....	34

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
2.17 แสดงการศึกษาอิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูง (ก) วงจรไฟฟ้า (ข) กราฟอิมพีแดนซ์ของวงจรไฟฟ้า.....	35
2.18 Nyquit plot ของระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	35
2.19 Nyquit plot ของระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ก) ปฏิกิริยา $Zn^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Zn(Hg)$ (b) ปฏิกิริยา $Hg_2^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Hg$	36
3.1 การต่อเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	43
3.2 เซลล์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของขั้วไฟฟ้า.....	45
3.3 การต่อเซลล์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน.	46
4.1 การวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C 20 wt%(Electrochem).....	53
4.2 การวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C 20 wt% เตรียมโดยใช้ตัวรองรับคาร์บอน gigantic ผ่าน H_2 ที่ $250^\circ C$ 4 ชั่วโมง.....	54
4.3 การวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C 20 wt% เตรียมโดยใช้ตัวรองรับคาร์บอน gigantic ผ่าน H_2 ที่ $250^\circ C$ 4 ชั่วโมง และ $350^\circ C$	54
4.4 ผลของปริมาณเนฟลอนต่อค่าความหนาของขั้วไฟฟ้า.....	56
4.5 ผลของปริมาณเนฟลอนต่อค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า.....	57
4.6 ผลของปริมาณเทฟลอนต่อค่าความหนาของขั้วไฟฟ้า.....	58
4.7 ปริมาณของเทฟลอนต่อค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า.....	58
4.8 ปริมาณของโลหะบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าที่ปริมาณ Pt 0.67 mg/cm^2 .	60
4.9 การกระจายตัวของแพลทินัมที่ปริมาณต่างๆ (ก) 0.12 mg/cm^2 (ข) 0.40 mg/cm^2 (ค) 0.67 mg/cm^2 โดยที่ภาพซ้ายแสดงผิวหน้าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ภาพขวาแสดงการกระจายตัวของแพลทินัม.....	63
4.10 การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าโดยอัตราส่วนของ Pt:M เท่ากับ 1:1 (ก) Pt-Ru/C 0.59 mg/cm^2 (ข) Pt-Co/C 0.51 mg/cm^2 (ค) Pt-Ni/C 0.60 mg/cm^2	65
4.11 ขนาดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาบนกระดาษคาร์บอน : (ก) ขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem (ข) ขั้วไฟฟ้าจากการเตรียมด้วยวิธีการพิมพ์.....	66

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อรีดิวซ์ไฮโดรเจน 1 ชั่วโมง (□) และ 4 ชั่วโมง (Δ).....	67
4.13	แสดงความต้านทานของขั้วไฟฟ้าต่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วย H ₂ 4 ชั่วโมง.....	68
4.14	ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์โดยอัตราส่วนของ Pt:M เท่ากับ 1:1 (ก) Pt-Ru/C 0.59 mg/cm ² (ข) Pt-Co/C 0.51 mg/cm ² (ค) Pt-Ni/C 0.60 mg/cm ² เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแพลทินัม 0.59 mg/cm ²	69
4.15	Cyclic Voltammetry ของขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณแพลทินัมต่างกัน: (ก) Pt/C 1 mg/cm ² (Electrochem) (ข) Pt/C 0.59 mg/cm ² (ค) Pt/C 0.33 mg/cm ² และ (ง) Pt/C 0.21 mg/cm ² (จ) Pt/C 0.74 mg/cm ² ในสารละลาย H ₂ SO ₄ 1 M, H ₂ 30 sccm เทียบกับ Saturated Calomel electrode	70
4.16	การเกิดออกซิเดชันของไฮโดรเจนที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 30, 50 และ 80 sccm, อัตราการไหลของไนโตรเจนเท่ากับ 50 sccm, scan rate 50 mV/s; (ก) เซลล์เชื้อเพลิงจากบริษัท Electrochem (ข) ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C ที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วย H ₂ ที่ 250°C 4 ชั่วโมงและที่ 350°C 1 ชั่วโมง	73
4.17	ความสัมพันธ์ปริมาณแพลทินัมต่อความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจากการเตรียมด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	74
4.18	การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ปริมาณแพลทินัม 0.54 mg/cm ² (A) การเกาะติดของแพลทินัม (B) การกระจายตัวของแพลทินัม.....	75
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ กัน โดย Pt/C ผ่านการรีดิวซ์ด้วย H ₂ ที่ 250°C 4 ชั่วโมง เทียบกับขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrchem (** Pt/C ที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วย H ₂ ที่ 250°C 4 ชั่วโมง และที่ 350°C 1 ชั่วโมง).....	77
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ กัน เทียบกับขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem.....	78

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและกำลังไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์ชนิดต่างๆ.....	82
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ กัน.....	83
ก-1	Cyclic voltammogram ของแพลทินัมในสารละลาย KOH ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่ 20 °C และอัตราการป้อนความต่างศักย์ 100 mV/s.....	96
ก-2	การออกซิเดชันของไฮโดรเจนในสารละลาย H ₂ SO ₄ ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร.....	97
ข1	EDX ของขั้วไฟฟ้า Pt/C แบบการระบายที่ปริมาณ 0.59 mg/cm ²	100
ข2	EDX ของขั้วไฟฟ้า Pt/C แบบการระบายที่ปริมาณ 0.33 mg/cm ²	100
ข3	EDX ของขั้วไฟฟ้า Pt/C แบบการระบายที่ปริมาณ 0.21 mg/cm ²	101
ข4	EDX ของขั้วไฟฟ้า Pt-Ru/C แบบการระบายที่ปริมาณ 0.59 mg/cm ²	101
ข5	EDX ของขั้วไฟฟ้า Pt-Co/C แบบการระบายที่ปริมาณ 0.51 mg/cm ²	102
ข6	EDX ของขั้วไฟฟ้า Pt-Ni/C แบบการระบายที่ปริมาณ 0.60 mg/cm ²	102