การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าแพลทินัมบนคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

นายกฤษณะ ลีลารุจิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

301247

PREPARATION OF Pt/C ELECTROCATALYST FOR OXYGEN REDUCTION REACTION IN PEM FUEL CELL

Mr. Kritsana Leelaruji

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 2007

Copyright of Chulalongkorn University

501207

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าแพลทินัมบนคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
โดย	นายกฤษณะ ลีลารุจิ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. นิสิต ตัณฑวิเชฐ)

กฤษณะ ลีลารุจิ : การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าแพลทินัมบนคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. (PREPARATION OF Pt/C ELECTROCATALYST FOR OXYGEN REDUCTION REACTION IN PEM FUEL CELL) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. มะลิ หุ่นสม, 111 หน้า.

ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมถือได้ว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้สำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมโดยใช้ตัวรองรับเป็นผงคาร์บอนวัลแคน (Carbon Vulcan) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการใช้แอมโมเนียมเฮกซะคลอโรแพลทิเนต (Ammonium hexachloroplatinate, $(NH_4)_2PtCl_6$) เป็นสารตั้งต้นนั้นให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้สารตั้งต้นเป็นกรดเฮกซะคลอโรแพลทินิก (Hexachloroplatinic acid, H_2PtCl_6) โดยวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือวิธีรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจึงทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและปริมาณแพลทินัมของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการใช้เมทานอลเป็นสารรีดิวซ์จะให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดอนุภาคของแพลทินัมเล็กกว่าและมีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอกว่าการใช้เอทานอลและ 2-โพรพานอล อีกทั้งยังมีปริมาณแพลทินัมที่สูงกว่า เมื่อทำการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเริ่มต้น พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมในสารละลายกรดจะให้ลักษณะสัณฐานวิทยาที่เหมาะสมกว่าการเตรียมในสารละลายเบสและมีปริมาณของแพลทินัมที่สูงกว่า ส่วนการศึกษาผลของความเข้มข้นของเมทานอลและเวลาที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและปริมาณของแพลทินัมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้ภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่สุดคือ เตรียมในสารละลาย เมทานอลที่มีความเข้มข้น 5.0 โมลต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 1 และใช้เวลาในการเตรียมทั้งหมด 1 ชั่วโมง มาทดสอบประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้า พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมีพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical surface area, ECA) เท่ากับ 39.66 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK ประมาณ 1.89 เท่า นอกจากนี้ที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.6 โวลต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 535 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและ 0.32 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....กฤษณะ ลีลารุจิ.....

สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา .....2550.....

4872212423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD: PLATINUM / ELECTROCATALYST / OXYGEN REDUCTION REACTION / ALCOHOL REDUCTION

KRITSANA LEELARUJI : PREPARATION OF Pt/C ELECTROCATALYST FOR OXYGEN REDUCTION REACTION IN PEM FUEL CELL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. MALI HUNSOM, 111 pp.

Platinum electrocatalyst is usually used in PEM fuel cell due to its high activity for oxygen reduction reaction. In this work, the Pt/C electrocatalyst was prepared by using carbon Vulcan XC-72 as a supporter. The preliminary results showed that the catalyst prepared using ammonium hexachloroplatinate ($(NH_4)_2PtCl_6$) as the Pt precursor provided a similar catalytic efficiency as that prepared by using hexachloroplatinic acid (H_2PtCl_6) as Pt precursor. The Pt/C electrocatalyst prepared using alcohol reduction method provided the best performance compared with others. The effects of parameters on the morphology and the Pt content of Pt/C electrocatalyst were also explored. The Pt/C electrocatalyst prepared using methanol as reducing agent provided the smallest platinum particle size, uniform distribution in nanometer range with the good particle dispersion and higher Pt contents compared with that prepared using ethanol and 2-propanol. The electrocatalyst prepared in the acid solution provided a smaller platinum particle size and a higher Pt contents than that prepared in the basic solution. In addition, the alcohol concentration and reaction time had slightly affected to the Pt particle size and the Pt contents of obtained catalyst. Consequently, the electrochemical performance of the Pt/C electrocatalyst that prepared by using optimized conditions (5 M of methanol, the solution initial pH of 1 and reaction time of 1 hour) was tested. The results showed that the prepared Pt/C electrocatalyst gave an electrochemical surface area (ECA) of 39.66 m^2/g. This ECA value was larger than the commercial Pt/C electrocatalyst. Finally, from the polarization curve at 0.6 V, the prepared Pt/C electrocatalyst gave a current density and power density of 535 mA/cm^2 and 0.32 W/cm^2, respectively.

Department.....Chemical Technology..... Student's signature..Kritsana Leelaruji.....
Field of study....Chemical Technology..... Advisor's signature.....Mali Hunsom.....
Academic year .....2007.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่านในกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และทบวงมหาวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

1.4 ขั้นตอนการวิจัย..... 2

2 วารสารปริทัศน์..... 4

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง และวิวัฒนาการของเซลล์เชื้อเพลิง..... 4

2.1.1 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง..... 5

2.1.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์..... 5

2.1.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก..... 6

2.1.1.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง..... 6

2.1.1.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอม..... 7

2.1.1.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม..... 7

2.1.1.6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมทานอลโดยตรง..... 7

2.2 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม..... 9

2.2.1 ขั้วไฟฟ้า..... 9

2.2.1.1 ประเภทของขั้วไฟฟ้า..... 10

2.2.1.1.1 ขั้วไฟฟ้าแบบพรุน (Porous electrode)..... 10

2.2.1.1.2 ขั้วไฟฟ้าแบบโลหะพรุน (Porous metal electrode)... 10

2.2.1.1.3 ขั้วไฟฟ้าสกรีนแบบพรุน (Porous screen electrode)... 10

2.2.1.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า..... 11

2.2.1.2.1 การพ่นละออง (Spray)..... 11

บทที่ หน้า

2.2.1.2.2 การพิมพ์หรือการระบาย..... 12
2.2.1.2.3 การพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition)... 13
2.2.2 เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน..... 13
2.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 15
2.2.3.1 กลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 15
2.2.3.2 การจำแนกระบบของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 16
2.2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 17
2.2.3.3.1 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 17
2.2.3.3.2 ปริมาตรช่องว่างและความหนาแน่นของของแข็ง..... 17
2.2.3.3.3 การกระจายตัวของขนาดของรูพรุนของตัวรองรับ.... 18
2.2.3.3.4 ระดับการกระจายตัวของโลหะ..... 19
2.2.3.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา..... 20
2.2.3.4.1 วิธีการแพร่ซึม..... 20
2.2.3.4.2 วิธีการพอกพูนโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า (Electroless deposition)..... 21
2.3 หลักการทำงานและปฏิกิริยาพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม..... 25
2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน..... 26
2.5 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง..... 30
2.5.1 ประเภทของประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง..... 30
2.5.1.1 ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์..... 30
2.5.1.2 ประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้า..... 31
2.5.1.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน..... 31
2.5.1.4 ประสิทธิภาพรวม..... 32
2.5.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง..... 32
2.5.2.1 ไซคลิกโวลแทมเมทรี..... 32
2.5.2.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์..... 34
2.5.2.3 กราฟโพลาไรเซชัน..... 34
2.5.2.3.1 โพลาไรเซชันทางเคมี (Chemical Polarization)..... 36
2.5.2.3.2 โพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization)..... 38
2.5.2.3.3 โพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration

บทที่		หน้า
	Polarization).....	38
	2.5.2.4 การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า.....	39
	2.5.2.4.1 ตัวต้านทาน.....	43
	2.5.2.4.2 ตัวเก็บประจุ.....	44
	2.5.2.4.3 เอลิเมนต์เฟสคงที่.....	44
	2.5.2.4.4 วาร์เบิร์กอิมพีแดนซ์.....	45
	2.5.2.4.5 ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	45
	2.5.2.5 วงจรไฟฟ้าสมมูล.....	45
	2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม.....	46
	2.5.3.1 ปริมาณน้ำ.....	46
	2.5.3.2 ความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	47
	2.5.3.3 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	48
	2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	52
	3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	52
	3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	53
	3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	53
	3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	53
	3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	54
	3.5.1 การเตรียมแอมโมเนียมเฮกซะคลอโรแพลทิเนต.....	54
	3.5.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กรดเฮกซะคลอโรแพลทินิกเป็นสารตั้งต้น.....	54
	3.5.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีอิมเพรกเนชันแบบธรรมดา....	54
	3.5.2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีรีดักชันด้วยกรดฟอร์มิก.....	55
	3.5.2.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์.....	55
	3.5.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แอมโมเนียมเฮกซะคลอโรแพลทิเนตเป็นสารตั้งต้น.....	56
	3.5.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีอิมเพรกเนชันแบบธรรมดา....	56
	3.5.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีรีดักชันด้วยกรดฟอร์มิก.....	56
	3.5.3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์.....	56
	3.5.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	57

บทที่ หน้า

3.5.4.1 การเตรียมชั้นของการแพร่..... 57
3.5.4.2 การเตรียมชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 58
3.5.5 การปรับปรุงคุณภาพของเยื่อแผ่น..... 58
3.5.6 การเตรียมขั้วไฟฟ้าประกอบเยื่อแผ่น..... 59
3.6 การทดสอบการทำงานในเซลล์เชื้อเพลิง..... 60
3.6.1 การประกอบเซลล์เดี่ยวสำหรับทดสอบการทำงานในเซลล์เชื้อเพลิง.... 60
3.6.2 การเตรียมความพร้อมของเซลล์เชื้อเพลิงในหน่วยทดสอบก่อนทำการทดสอบ..... 60
3.6.3 การทดสอบหากราฟโพลาไรเซชัน..... 61
3.6.4 การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์เชิงเคมีไฟฟ้า..... 61
3.6.5 การวิเคราะห์แบบไซคลิกโวลแทมเมทรีในเซลล์เชื้อเพลิง..... 61
3.6.6 การปิดระบบของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง..... 62
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 63
4.1 ผลของชนิดของสารตั้งต้นแพลทินัม..... 63
4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากแอมโมเนียมเฮกซะคลอโรแพลทิเนต..... 70
4.2.1 ผลของชนิดของแอลกอฮอล์..... 70
4.2.2 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของสารละลาย..... 74
4.2.3 ผลของความเข้มข้นของแอลกอฮอล์..... 78
4.2.4 ผลของเวลาในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา..... 82
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 85
4.3.1 ไซคลิกโวลแทมเมทรี..... 85
4.3.2 การทดสอบกราฟโพลาไรเซชัน..... 86
4.3.3 การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้า..... 89
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 92
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 92
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 93
รายการอ้างอิง..... 94
ภาคผนวก..... 97
ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF..... 98
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ X-rays diffraction..... 102
ภาคผนวก ค การคำนวณหาพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า..... 103

บทที่ หน้า

ภาคผนวก ง การคำนวณอิมพีแดนซ์..... 105

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 111

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง.....	8
2.2	องค์ประกอบของวงจรไฟฟ้าสมมูล.....	43
4.1	ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้สารตั้งต้นและวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน.....	65
4.2	ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้แอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ กัน.....	71
4.3	ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นค่าต่าง ๆ.....	75
4.4	ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้เมทานอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน.....	79
4.5	ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้เวลาในการเตรียมที่แตกต่างกัน.....	83
4.6	ค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ โดยเฉลี่ยจากการทดสอบขั้วไฟฟ้าประกอบเยื่อแผ่น.....	90
ก.1	ข้อมูลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF.....	99
ง.1	ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่าง ๆ.....	110

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม.....	9
2.2	กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพ่นละออง.....	12
2.3	กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์หรือการระบาย.....	12
2.4	โครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน.....	14
2.5	เส้นทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	16
2.6	ลักษณะโครงสร้างแบบคิวโบออกตะฮีดรอลของแพลทินัม.....	24
2.7	(ก) การกกระจายตัวโดยมวลเฉลี่ย และ(ข) การกระจายตัวโดยพื้นผิวเฉลี่ย.....	25
2.8	การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	26
2.9	แบบจำลองแสดงการดูดซับของออกซิเจนและวิถีทางการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน.....	29
2.10	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมทั่วไป.....	33
2.11	แสดงวงจร Potentiostatic อย่างง่ายโดยที่ WE CE และ REF แทนขั้วอิเล็กโทรดทำงานขั้วอิเล็กโทรดสวนทาง และขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงของเซลล์เคมีไฟฟ้าตามลำดับ ขณะที่ E_d คือศักย์ไฟฟ้าเพิ่มเติมที่ป้อนและ E_m คือศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อ Potentiostat ทำหน้าที่ปรับทั้งสองค่านี้ให้เท่ากัน.....	34
2.12	โพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	35
2.13	โพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อเปลี่ยนแปลงที่ใช้อุณหภูมิในการทำงาน.....	37
2.14	โพลาไรเซชันแสดงการเปรียบเทียบค่าโพลาไรเซชันทางเคมี เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนต่าง ๆ.....	38
2.15	กราฟกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี.....	39
2.16	(ก) Nyquist plot และ (ข) Bode plot.....	41
2.17	วงจรสมมูลของเซลล์เคมีไฟฟ้าและการแยกย่อย Z_f เป็น R_s และ C_s หรือ R_{ct}และ Z_w.....	46
2.18	ปรากฏการณ์ของน้ำที่เกิดขึ้นทุกกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม.....	46
2.19	ผลกระทบของการเพิ่มความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	47
2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมเลกุลกับค่าพลังงานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป	49
4.1	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้สารตั้งต้นเป็นกรดเฮกซะคลอโรแพลทินิกและเตรียมด้วย (ก) วิธีรีดักชันด้วยเมทานอล (ข) วิธีรีดักชันด้วยกรดฟอร์มิก และ (ค) วิธีอิมเพรกเนชันแบบธรรมดา	64
4.2	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้	

ภาพประกอบ หน้า

สารตั้งต้นเป็นแอมโมเนียมเฮกซะคลอโรแพลทิเนตและเตรียมด้วย (ก) วิธีรีดักชันด้วยเมทานอล (ข) วิธีรีดักชันด้วยกรดฟอร์มิก และ (ค) วิธีอิมเพรกเนชันแบบธรรมดา..... 64

4.3 ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้สารตั้งต้นเป็น (ก) กรดเฮกซะคลอโรแพลทินิกและ (ข) แอมโมเนียมเฮกซะคลอโรแพลทิเนต และใช้ (1) วิธีอิมเพรกเนชันแบบธรรมดา (2) วิธีรีดักชันด้วยกรดฟอร์มิก และ (3) วิธีรีดักชันด้วยเมทานอล..... 66

4.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแพลทินัมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้วิธีรีดักชันด้วยกรดฟอร์มิกและวิธีรีดักชันด้วยเมทานอลและใช้สารตั้งต้นของแพลทินัมชนิดต่าง ๆ..... 67

4.5 กราฟโพลาไรเซชันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีรีดักชันด้วยกรดฟอร์มิกและวิธีรีดักชันด้วยเมทานอล และใช้สารตั้งต้นของแพลทินัมชนิดต่าง ๆ..... 68

4.6 กราฟโพลาไรเซชันบริเวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีรีดักชันด้วยกรดฟอร์มิกและวิธีรีดักชันด้วยเมทานอล และใช้สารตั้งต้นของแพลทินัมชนิดต่าง ๆ..... 68

4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้แอลกอออล์ชนิดต่าง ๆ กันคือ (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล และ (ค) 2-โพรพานอล.... 71

4.8 ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้แอลกอออล์ชนิดต่าง ๆ กันคือ (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล และ (ค) 2-โพรพานอล..... 72

4.9 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแพลทินัมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้แอลกอออล์ชนิดต่าง ๆ กัน..... 73

4.10 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่าง ๆ กัน โดยที่ (ก) 1 (ข) 2 (ค) 4 (ง) 7 และ (จ) 9..... 75

4.11 ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่าง ๆ กัน โดยที่ (ก) 1 (ข) 2 (ค) 4 (ง) 7 และ (จ) 9..... 77

4.12 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแพลทินัมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่าง ๆ กัน..... 78

4.13 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้

ภาพประกอบ หน้า

เมทานอลที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน โดยที่ (ก) 3.0 โมลต่อลิตร (ข) 4.0 โมลต่อลิตร (ค) 5.0 โมลต่อลิตร และ (ง) 6.0 โมลต่อลิตร 79

4.14 ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้เมทานอลที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน โดยที่ (ก) 3.0 โมลต่อลิตร (ข) 4.0 โมลต่อลิตร (ค) 5.0 โมลต่อลิตร และ (ง) 6.0 โมลต่อลิตร 80

4.15 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแพลทินัมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้เมทานอลที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน 81

4.16 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เวลาในการเตรียมที่แตกต่างกัน โดยที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง (ค) 3 ชั่วโมง และ (ง) 4 ชั่วโมง..... 83

4.17 ภาพถ่ายจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เวลาในการเตรียมที่แตกต่างกัน โดยที่ (ก) 1 ชั่วโมง (ข) 2 ชั่วโมง (ค) 3 ชั่วโมง และ (ง) 4 ชั่วโมง..... 84

4.18 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแพลทินัมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เวลาในการเตรียมแตกต่างกัน 84

4.19 กราฟไซคลิกโวลแทมเมทรีของตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น 86

4.20 กราฟโพลาไรเซชันของขั้วไฟฟ้าประกอบเยื่อแผ่นที่ขั้วไฟฟ้าเตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น และใช้เยื่อแผ่นที่แตกต่างกัน 87

4.21 กราฟโพลาไรเซชันบริเวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำของขั้วไฟฟ้าประกอบเยื่อแผ่นที่ขั้วไฟฟ้าเตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น และใช้เยื่อแผ่นที่แตกต่างกัน 87

4.22 กราฟ Nyquist plot จากการทดสอบอิมพีแดนซ์ของขั้วไฟฟ้าประกอบเยื่อแผ่นที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.8 โวลต์ โดยที่ขั้วไฟฟ้าเตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น และใช้เยื่อแผ่นที่แตกต่างกัน 89

4.23 วงจรไฟฟ้าสมมูลของระบบเซลล์เชื้อเพลิง 90

ค.1 พื้นที่ใต้กราฟในช่วงที่เกิดการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนจากกราฟไซคลิกโวลแทมเมทรี 101

ง.1 กราฟ Nyquist plot และตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ 105

ง.2 ขั้นตอนการเรียกข้อมูล 108

ง.3 การเลือกคำสั่ง Find circle 108

ภาพประกอบ หน้า

ง.4 การกำหนดตำแหน่งของส่วนโค้ง..... 108

ง.5 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม FRA..... 109