สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อ ..... ค
ABSTRACT ..... จ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ด

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ทฤษฎีและแนวความคิด 3
1.4.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและเอ็มอีเอ 3
1.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 5
1.4.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า 6
1.5 ข้อมูล เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
1.5.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 7
1.5.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า 10
1.5.3 การพัฒนาประสิทธิภาพของเอ็มอีเอ และเซลล์เชื้อเพลิง 13
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 18

บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย 19
2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัม และโลหะผสมแพลทินัม-โคบอลต์ด้วยการพอกพูน ด้วยกระแสไฟฟ้า 20
2.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนด้วย กระแสไฟฟ้า20
2.1.2 การศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 20
2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า 23
2.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยวิธีรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์ 24

2.2.2 การศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์ 24
2.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการรีดักชันด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 25
2.2.4 การศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการรีดักชันด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 26
2.3 การพัฒนาชั้นแก๊สแพร่ และเอ็มอีเอ 27
2.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับศึกษาการพัฒนาชั้นแก๊สแพร่ และเอ็มอีเอ 27
2.3.2 การศึกษาพัฒนาชั้นแก๊สแพร่ และเอ็มอีเอ 28
2.4 การวิเคราะห์ ทดสอบ สมบัติและประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้วอิเล็กโทรด และเอ็มอีเอ 29
2.4.1 การวิเคราะห์ ทดสอบ สมบัติและประสิทธิภาพของชั้นแก๊สแพร่ และขั้วอิเล็กโทรด 29
2.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพของเอ็มอีเอในเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว 29

บทที่ 3 ผลและการอภิปรายผลการวิจัย 31
3.1 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 31
3.1.1 ผลการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัมด้วยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า . 31
3.1.2 ผลการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัม-โคบอลต์ด้วยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 57
3.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า 61
3.2.1 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์ 61
3.2.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการรีดักชันด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 71
3.3 ผลการพัฒนาชั้นแก๊สแพร่ และเอ็มอีเอ 97
3.3.1 ผลการศึกษาผลของปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรดโดยยังไม่มีชั้นย่อย 97
3.3.2 ผลการศึกษาการพัฒนาชั้นแก๊สแพร่ 101
3.3.3 ผลของความหนาของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน 103
3.3.4 ผลของอุณหภูมิและความดันในการดำเนินการ 106

บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย 109
4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 109
4.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า 110
4.2.1 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์ 110
4.2.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการรีดักชันด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 110
4.3 ผลการพัฒนาชั้นแก๊สแพร่และเอ็มอีเอ 111
4.4 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย 112

บรรณานุกรม 115

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ภาวะต่างๆ ในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรดโดยวิธีการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 22
ตารางที่ 2.2 ภาวะต่างๆ ในการเตรียมขั้วอิเล็กโทรด โดยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วงๆ..... 23
ตารางที่ 3.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ของขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ 37
ตารางที่ 3.2 ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมจากการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ ที่ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า 4 คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ 40
ตารางที่ 3.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ของขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนด้วยความหนาแน่นประจุไฟฟ้าต่างๆ 44
ตารางที่ 3.4 ปริมาณแพลทินัม ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมได้จากการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าต่างๆ 46
ตารางที่ 3.5 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ของขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ 49
ตารางที่ 3.6 ปริมาณแพลทินัม ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมได้จากการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ .. 50
ตารางที่ 3.7 ปริมาณแพลทินัม ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมได้จากการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความถี่ต่างๆ..... 52
ตารางที่ 3.8 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ของขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนด้วยการหยุดให้กระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ 54
ตารางที่ 3.9 ปริมาณแพลทินัม ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมได้จากการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วง ด้วยการหยุดให้กระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ 55
ตารางที่ 3.10 ขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัมจากการทดสอบโดยใช้เทคนิค TEM และ XRD 57
ตารางที่ 3.11 ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้สารตั้งต้นและวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน 62
ตารางที่ 3.12 ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้แอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ กัน 63

ตารางที่ 3.13 ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นค่าต่าง ๆ 65
ตารางที่ 3.14 ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้เมทานอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 66
ตารางที่ 3.15 ขนาดอนุภาคของแพลทินัมโดยเฉลี่ยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้เวลาในการเตรียมที่แตกต่างกัน 67
ตารางที่ 3.16 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวโลหะแพลทินัมของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนที่เตรียมได้จากสารละลายแพลทินัมความเข้มข้นต่างกัน..... 72
ตารางที่ 3.17 ค่าร้อยละของ Relative intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนที่เตรียมจากแพลทินัมความเข้มข้นต่างกัน 74
ตารางที่ 3.18 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวโลหะแพลทินัมของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนที่เตรียมจากฟอร์มัลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างกัน..... 75
ตารางที่ 3.19 ค่าร้อยละของ Relative Intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนที่เตรียมจากฟอร์มัลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างกัน 77
ตารางที่ 3.20 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย พื้นที่ผิวโลหะ และปริมาณแพลทินัมของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนที่ระยะเวลาในการพอกพูนต่างกัน..... 78
ตารางที่ 3.21 ค่าร้อยละของ Relative Intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนที่ระยะเวลาในการพอกพูนต่างกัน 81
ตารางที่ 3.22 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวโลหะแพลทินัมของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนที่จำนวนครั้งในการเติมฟอร์มัลดีไฮด์ต่างกัน 83
ตารางที่ 3.23 ค่าร้อยละของ Relative Intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนที่ต่างกันที่จำนวนครั้งในการเติมฟอร์มัลดีไฮด์ต่างกัน 84
ตารางที่ 3.24 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวโลหะแพลทินัมของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนที่เตรียมในงานวิจัยเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า 85
ตารางที่ 3.25 ค่าร้อยละของ Relative Intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนที่เตรียมในงานวิจัยเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า 86
ตารางที่ 3.26 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าที่ผ่านการแคลไซน์และรีดิวซ์..... 87
ตารางที่ 3.27 พื้นที่ผิวของแพลทินัมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่ใช้กระดาษคาร์บอนเป็นชั้นแก๊สแพร่และมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์และรีดิวซ์..... 89
ตารางที่ 3.28 พื้นที่ผิวของแพลทินัมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า 90

ตารางที่ 3.29 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเอ็มอีที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ 97
ตารางที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนของผงคาร์บอนชนิดต่างๆที่ใช้เป็นชั้นย่อย.. 102

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน 3
รูปที่ 1.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแลกเปลี่ยนโปรตอน 5
รูปที่ 2.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 19
รูปที่ 3.1 ภาพถ่าย SEM (x 5000) ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 31
รูปที่ 3.2 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นประจุไฟฟ้า 4 คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร บนกระดาษคาร์บอนที่ไม่มีตัวรองรับและมีตัวรองรับ 32
รูปที่ 3.3 ภาพถ่าย SEM (x 50) ของพื้นผิวผ้าคาร์บอนและกระดาษคาร์บอน 34
รูปที่ 3.4 ภาพถ่าย SEM (x 300) แสดงภาพตัดขวาง (Cross-section) ของผ้าคาร์บอนและกระดาษคาร์บอน 34
รูปที่ 3.5 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วอิเล็กโทรดต่างชนิดกันที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นประจุไฟฟ้า4 คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร บนชั้นการแพร่แก๊สที่แตกต่างกัน 35
รูปที่ 3.6 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ ที่ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า 4 คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ 36
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ ที่ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า 4 คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ 37
รูปที่ 3.8 ภาพ SEM (x 15000) ของขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมจากการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า 4 คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน 39
รูปที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมจากการเตรียมที่ความหนาแน่นกระแส ไฟฟ้าแตกต่างกัน 40
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างกราฟการทดสอบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีของขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมจากการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า 4 คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร 41
รูปที่ 3.11 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าต่างๆ 42

รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่ประกอบจากขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นประจุไฟฟ้าแตกต่างกันจาก 2- 6 คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร 43
รูปที่ 3.13 ภาพ SEM (x 5000) ของขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมจากการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและความหนาแน่นประจุไฟฟ้าแตกต่างกัน 45
รูปที่ 3.14 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากจากขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วง ที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ 49
รูปที่ 3.15 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความถี่ต่างๆ 51
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความถี่ต่างๆ 51
รูปที่ 3.17 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วอิเล็กโทรดที่พอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วง ที่ระยะเวลาในการให้กระแสไฟฟ้า 0.05 วินาที ที่ระยะเวลาในการหยุดให้กระแสไฟฟ้าต่างๆ ... 54
รูปที่ 3.18 ภาพจาก SEM (x 5000) แสดงขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของโลหะแพลทินัมจากการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 56
รูปที่ 3.19 ภาพจาก TEM แสดงขนาดอนุภาคของโลหะแพลทินัมจากการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 57
รูปที่ 3.20 การวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 59
รูปที่ 3.21 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่เตรียมจากขั้วไฟฟ้าที่พอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า 60
รูปที่ 3.22 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น 62
รูปที่ 3.23 กราฟไซคลิกโวลแทมเมทรีของตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น 69
รูปที่ 3.24 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่ขั้วอิเล็กโทรดเตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น โดยใช้เมมเบรนที่แตกต่างกัน 70
รูปที่ 3.25 กราฟ Nyquist plot จากการทดสอบอิมพีแดนซ์ของเอ็มอีเอที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.8 โวลต์ โดยที่ขั้วอิเล็กโทรดเตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยใช้เมมเบรนที่แตกต่างกัน 71
รูปที่ 3.26 ภาพถ่าย TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20% Pt/C ที่เตรียมได้จากสารละลายแพลทินัมความเข้มข้นต่างๆ 72
รูปที่ 3.27 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนที่เตรียมจากสารละลายแพลทินัมความเข้มข้นต่างๆ 73

รูปที่ 3.28 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนที่เตรียมจากสารละลายแพลทินัมความเข้มข้นต่างกัน 74
รูปที่ 3.29 ภาพถ่าย TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20% Pt/C ที่เตรียมได้จากฟอร์มัลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างๆ 75
รูปที่ 3.30 ภาพถ่าย TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Pt/C ที่ระยะเวลาในการพอกพูนต่างกัน 78
รูปที่ 3.31 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนที่ระยะเวลาในการพอกพูนต่างกัน 80
รูปที่ 3.32 ภาพถ่าย TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Pt/C ที่จำนวนครั้งในการเติมฟอร์มัลดีไฮด์ต่างกัน 82
รูปที่ 3.33 ภาพถ่าย TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Pt/C 84
รูปที่ 3.34 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน 86
รูปที่ 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้เองเปรียบเทียบกับเอ็มอีเอที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดทางการค้าและเอ็มอีเอทางการค้า (ปริมาณแพลทินัม 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) 92
รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่ใช้ชั้นแก๊สแพร่ต่างกัน (ปริมาณแพลทินัม 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) 93
รูปที่ 3.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้เอง (ปริมาณแพลทินัม 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร)เปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทางการค้า (ปริมาณแพลทินัม 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร) 94
รูปที่ 3.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของเอ็มอีเอที่เตรียมได้เองเปรียบเทียบกับเอ็มอีเอที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดทางการค้า 95
รูปที่ 3.39 การวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดทางการค้าโดยเทคนิค XRD 97
รูปที่ 3.40 การวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์โดยเทคนิค XRD 98
รูปที่ 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทางการค้า 99
รูปที่ 3.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์เปรียบเทียบกับเอ็มอีเอทางการค้า 100
รูปที่ 3.43 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่ประกอบจากขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ผงคาร์บอนต่างชนิดกันมาเตรียมเป็นชั้นรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา 102
รูปที่ 3.44 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่มีปริมาณเทฟลอนในชั้นรองรับต่างกัน 103
รูปที่ 3.45 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่ใช้เมมเบรนเนฟิออน 212 และ 115 105

รูปที่ 3.46 กราฟ Nyquist plot แสดงผลการทดสอบอิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ของเอ็มอีเอเมื่อใช้เมมเบรนเนฟิออน 115 และเมมเบรนเนฟิออน 212 105
รูปที่ 3.47 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่ความดันต่างๆ และอุณหภูมิเซลล์ แอโนด และแคโทด 60, 65 และ 60 ตามลำดับ 106
รูปที่ 3.48 กราฟโพลาไรเซชันของเอ็มอีเอที่อุณหภูมิเซลล์ต่างๆ และความดัน 10 psig อุณหภูมิแอโนด และแคโทด 65 และ 60 ตามลำดับ 107