บทที่ 4
สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและเอ็มอีเอที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการเตรียมและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมด้วยกระบวนการต่างๆ เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้า ส่วนที่สองเป็นการเตรียมและพัฒนาการประกอบเอ็มอีเอที่มีประสิทธิภาพสูงโดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้า 700 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การพอกพูนแพลทินัมบนชั้นแก๊สแพร่ที่มีชั้นรองรับเป็นผงคาร์บอนและชั้นแก๊สแพร่ที่เป็นผ้าคาร์บอนจะมีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยามีความสม่ำเสมอและทั่วถึงและให้สมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูง เนื่องจากการชั้นรองรับที่เป็นผงคาร์บอนมีความพรุนและมีพื้นที่ผิวสูงจึงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้มีพื้นที่ผิวของแพลทินัมในการเกิดปฏิกิริยาสูง มีการจัดการน้ำที่ดี ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัมที่เตรียมด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วงให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มได้ดีกว่าการเตรียมด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบคงที่ ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีขนาดอนุภาคเล็ก โดยภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการให้กระแสไฟฟ้าแบบเป็นช่วง คือ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดในการพอกพูนแต่ละช่วง 200 มิลลิแอมแปร์ต่อ ตารางเซนติเมตร (รอบทำงานร้อยละ 5) ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า 2 คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการให้กระแสไฟฟ้า 0.05 วินาที เวลาในการหยุดให้กระแสไฟฟ้า 0.95 วินาที และความถี่ 1 เฮิรตซ์ ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 318.30 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรที่ค่าความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ซึ่งยังคงมีสมรรถนะต่ำกว่าเอ็มอีเอทางการค้าอยู่พอสมควร (569.80 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรที่ค่าความต่างศักย์ 0.6 โวลต์) และเมื่อนำภาวะที่เหมาะสมที่ได้ในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัมบริสุทธิ์ดังกล่าวมาทดลองใช้ในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัม-โคบอลต์ โดยไม่มีขั้นตอนการรีดิวซ์ด้วยการผ่านแก๊สไฮโดรเจน พบว่าโคบอลต์กับแพลทินัมสามารถพอกพูนบนขั้วอิเล็กโทรดได้ในรูปของโลหะผสม ผลและให้ประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัมบริสุทธิ์ที่เตรียมโดยวิธีเดียวกัน ดังนั้นการใช้โลหะผสมแพลทินัม-โคบอลต์ น่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง

ชนิดพีอีเอ็ม เนื่องจากสามารถลดการใช้โลหะราคาแพงอย่างแพลทินัมโดยการใช้โลหะราคาถูกมาแทนบางส่วน โดยที่ยังคงหรือแม้กระทั่งเพิ่มสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน

4.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า

4.2.1 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีรีดักชันด้วยแอลกอฮอล์

จากการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิริยาแพลทินัมสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน พบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แอมโมเนียมเฮกซะคลอโรแพลทิเนตจะให้ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับการใช้กรดเฮกซะคลอโรแพลทินิก ภาวะการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือการเตรียมด้วยวิธีรีดักชันด้วยเมทานอลที่ความเข้มข้น 5.0 โมลต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 1 และใช้เวลาในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 นาโนเมตร มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ มีพื้นที่ผิวทางเคมีไฟฟ้าเท่ากับ 39.66 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK และเมื่อนำขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมได้ไปทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวโดยขั้วแอโนดเป็นขั้วอิเล็กโทรดทางการค้าของบริษัท E-TEK และขั้วแคโทดเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมขึ้นจากตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท E-TEK หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น และใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นเนฟิออน 212 พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวจะให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 535 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.6 โวลต์หรือมีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.32 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

4.2.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีรีดักชันด้วยฟอร์มัลดีไฮด์

จากการศึกษาพบว่าภาวะในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมบัติต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิว และลักษณะความเป็นผลึกของโลหะ ซึ่งภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ คือ ความเข้มข้นของสารละลายแพลทินัม 10 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ 0.15 โมลต่อลิตร ระยะเวลาในการพอกพูน 2 ชั่วโมง และจำนวนครั้งในการเติมฟอร์มัลดีไฮด์ 7 ครั้ง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติดีที่สุด คือ ขนาดอนุภาคโลหะแพลทินัม 2.93 นาโนเมตร พื้นที่ผิวของโลหะ 95.47 ตารางเมตรต่อกรัม และตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวดี ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าของ Electrochem, Inc.. การแคลไซน์และรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นและพื้นที่ผิวโลหะและพื้นที่ผิวของแพลทินัมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีน้อยลง ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้อง

ปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าโดยการแคลไซน์และรีดิวซ์

การศึกษาโพลาไรเซชันพบว่าเอ็มอีเอที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมในงานวิจัยนี้ จะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าเอ็มอีเอที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดทางการค้า ในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ (น้อยกว่า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งเป็นช่วงโพลาไรเซชันทางเคมี ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ พื้นที่ผิวของแพลทินัมในการเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นช่วงโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน พบว่าเอ็มอีเอที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้เองนั้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเอ็มอีเอที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดทางการค้าของบริษัท E-TEK และเอ็มอีเอทางการค้าของบริษัท Electrochem, Inc. อาจเนื่องมาจากขั้นตอนในการเตรียมเอ็มอีเอที่แตกต่างกัน โดยเอ็มอีเอที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยการพอกพูนโดยไม่ใช้ไฟฟ้าให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 366 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ที่ปริมาณแพลทินัม 1 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นจึงควรศึกษาในส่วนของการประกอบเอ็มอีเอต่อไป

4.3 ผลการพัฒนาชั้นแก๊สแพร่และเอ็มอีเอ

จากผลการศึกษาพัฒนาชั้นแก๊สแพร่และเอ็มอีเอ พบว่าชนิดของชั้นแก๊สแพร่ ชนิดของเมมเบรน องค์ประกอบในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและชั้นรองรับมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ชั้นแก๊สแพร่ที่เป็นผ้าคาร์บอนจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่ากระดาษคาร์บอน อิเล็กโทรดที่มีชั้นรองรับจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าที่ไม่มีชั้นรองรับ โดยองค์ประกอบชั้นรองรับที่เหมาะสมคือ เทฟลอนร้อยละ 6 ผงคาร์บอนเป็น HICON Black และมีปริมาณชั้นรองรับประมาณ 2 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณสารละลายเนฟิออนที่เหมาะสมในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ ร้อยละ 33 ในช่วงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม 0.3 – 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนชนิดเมมเบรนพบว่า เมมเบรนเนฟิออน 212 จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเนฟิออน 115 เนื่องจากมีความหนาน้อยกว่าทำให้ความต้านทานของเซลล์ลดลง เอ็มอีเอที่เตรียมจากภาวะที่เหมาะสมนี้จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 858 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ ในภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิเซลล์ หม้อความชื้นด้านแอโนดและหม้อความชื้นด้านแคโทดเท่ากับ 60, 65 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่ความดันบรรยากาศ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนเท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่ภาวะมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ (700 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์)

4.4 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการใน 2 ส่วน คือ เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงและการประกอบเอ็มอีเอ เพื่อลดการนำเข้าส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์รวมถึงสามารถลดต้นทุนการผลิตเซลล์ได้ในอนาคต จากการวิจัยทั้งหมด คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. จากการศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมที่เตรียมโดยวิธีการพอกพูนโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า พบว่าได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติ อาทิเช่น ขนาดตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยา ใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้าที่ใช้กันทั่วไป ดังนั้นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการนี้ จึงน่าจะได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้เอง ซึ่งลดการนำเข้าตัวเร่งปฏิกิริยาจากต่างประเทศ อย่างไรก็ตามในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การศึกษาวิจัยในโครงการนี้ ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า ยังให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ต่ำอยู่ จึงควรต้องศึกษา ปรับแต่งค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

2. การใช้เมมเบรนเนฟิออน 212 เป็นอิเล็กโทรไลท์ซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีความหนาน้อยกว่าเมมเบรนเนฟิออน 115 จะช่วยการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มมากขึ้น แต่มีข้อเสียประเด็นหนึ่งที่น่าสังเกตคืออาจเกิดปรากฏการณ์แก๊สข้ามผ่านเมมเบรนได้ ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วงจรเปิดมีค่าต่ำลงกว่าในกรณีที่ใช้เมมเบรนที่มีความหนามากกว่า ดังนั้นในการเลือกใช้เมมเบรนควรต้องพิจารณาสมบัติของเมมเบรนในส่วนของค่าการซึมผ่านของแก๊สด้วย

3. การประกอบเอ็มอีเอ ณ ภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ เซลล์เชื้อเพลิงให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 810 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ (700 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) จากการทบทวนเอกสารพบว่า ยังมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถพัฒนาเอ็มอีเอให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นกว่าที่ได้ ณ ขณะนี้ ดังนั้นประเด็นนี้เป็นประเด็นหนึ่งที่น่าศึกษาต่อไปว่าถ้าต้องการสมรรถนะที่สูงกว่านี้ จะต้องนำปัจจัยใดเข้ามาเกี่ยวข้องอีกบ้าง นอกจากนี้ถ้าต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อไปใช้งานจริงควรศึกษาการพัฒนาเอ็มอีเอที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากในทางปฏิบัติเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานจริงจะมีขนาด 50 100 150 ตารางเซนติเมตรหรือมากกว่า ซึ่งจากประสบการณ์ของนักวิจัยส่วนใหญ่พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมักจะลดลงอย่างมากเมื่อทำการขยายขนาดของเอ็มอีเอ เนื่องจากการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สม่ำเสมอ คุณภาพของการประกอบเอ็มอีเอที่กำกับดูแลยากขึ้น ส่งผลให้ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลง จึงควรมีการศึกษาและพัฒนาในขั้นต่อไปสำหรับวิธีการเตรียมเอ็มอีเอ

ขนาดใหญ่ รวมไปถึงวิธีการทำและการประกอบเซลล์ในรูปของเซลล์แถว (Stack cell) เพื่อเพิ่มค่าความศักย์ไฟฟ้า