บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน รวมถึงคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้า อันได้แก่ ความหนา ความต้านทาน การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า

4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบพิมพ์ (Printing)

การเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบพิมพ์มีตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติและการทำงานของขั้วไฟฟ้าหลายตัวด้วยกัน เช่น ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของสารละลายเนฟิออนและเทฟลอน เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงศึกษาผลของตัวแปรต่างๆนี้ที่มีต่อสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้

4.1.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีหน้าที่ 3 อย่างคือ ดูดซับแก๊ส (Adsorption) ส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transfer) และที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นที่เกิดปฏิกิริยา (Surface reaction) จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีโดยพิจารณาคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากค่าพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา (Surface active area) ขนาดของอนุภาค (active particle diameter) และการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าดังกล่าว คือ ชนิดของตัวรองรับ ระยะเวลาในการรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจน

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นนั้น ตัวรองรับที่นิยมใช้คือ คาร์บอน เนื่องจากคาร์บอนมีความพรุนสูงและนำไฟฟ้า แต่คาร์บอนมีด้วยกันหลายชนิดซึ่งมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงศึกษาผลของชนิดของคาร์บอนที่เป็น

ตัวรองรับที่มีต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ โดยชนิดของคาร์บอนที่ใช้มีดังนี้ แกรไฟต์ ถ่านกัมมันต์จากบริษัท TPI ถ่านกัมมันต์จาก gigantic ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแพร่ซึม (impregnate) และนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Microchemisorption ด้วยวิธี Pulse Chemisorptions ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนชนิดต่างๆ ด้วยวิธี Pulse Chemisorptions

ชนิดของคาร์บอน	ปริมาตรสะสม (ml/g STP)	การกระจายตัวของโลหะ (%)	พื้นที่ผิวของโลหะ		ขนาดอนุภาค (nm)
			(m^2/g sample)	(m^2/g metal)	
Pt/C (graphite)	0.21	0.89	0.44	2.21	126.59
Pt/C (TPI)	0.14	0.71	0.29	1.76	158.59
Pt/C (gigantic)	0.56	2.93	1.20	7.24	38.63

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ตัวรองรับที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับทั้ง 3 ชนิด พบว่าตัวรองรับคาร์บอนจาก Gigantic มีคุณสมบัติดีกว่าตัวรองรับคาร์บอนจาก TPI และแกรไฟต์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ควรมีขนาดเล็ก ความพรุนสูง มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ดังนั้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นจะใช้ตัวรองรับคาร์บอนจาก gigantic ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนการรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือการผ่านแก๊สไฮโดรเจนไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เนื่องจากการผ่านแก๊สไฮโดรเจนทำให้สารประกอบอื่นที่เกาะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาหลุดออกพร้อมไฮโดรเจน เป็นผลทำให้โลหะที่เกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปธาตุไม่ใช่สารประกอบ [วิทยา , 2534] แต่ในขั้นตอนการผ่านแก๊สไฮโดรเจนยังมีอีก 2 ตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการผ่านแก๊สไฮโดรเจน อุณหภูมิที่ใช้ควรต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้คาร์บอนเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เพราะถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้คาร์บอนเกิดการเผาไหม้กลายเป็นเถ้า จึงจำ

เป็นอย่างยิ่งในการหาภาวะที่เหมาะสม โดยเริ่มจากการหาเวลาที่ใช้ในการผ่านแก๊สไฮโดรเจน เวลาที่ใช้คือ 0, 1, 3 และ 4 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 250°C ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของระยะเวลาการผ่านแก๊สไฮโดรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนคาร์บอน (Gigantic) ด้วยวิธี Pulse Chemisorptions

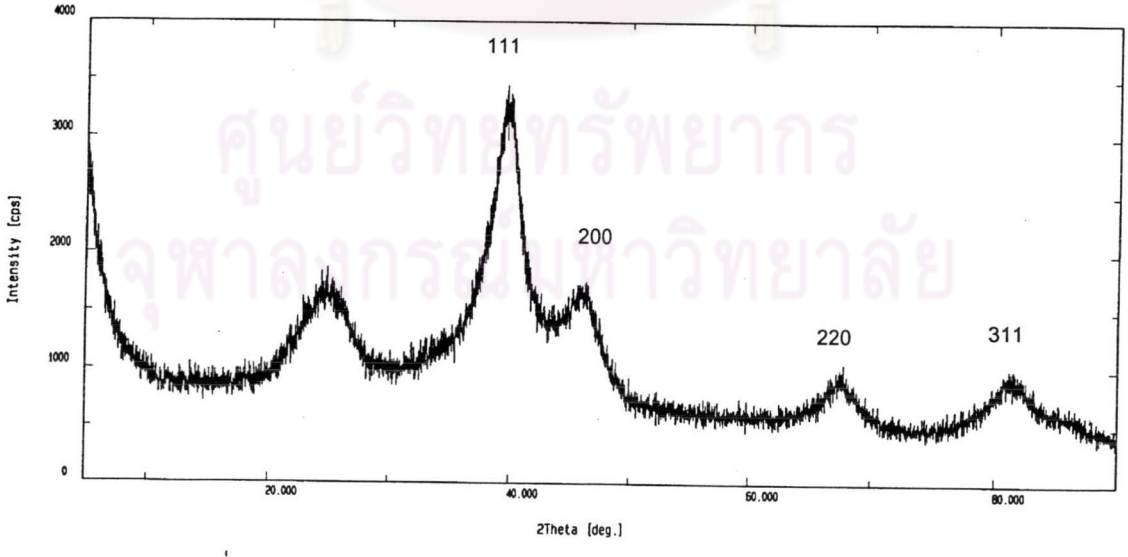
เวลา (hours)	ปริมาตรสะสม (ml/g STP)	การกระจายตัวของโลหะ (%)	พื้นที่ผิวของโลหะ		ขนาดอนุภาค (nm)
			(m^2/g sample)	(m^2/g metal)	
0	0.5592	2.9320	1.2021	7.2416	38.6268
1	5.7263	24.9206	12.3100	61.5498	4.5446
3	11.0905	48.2654	23.8415	119.2074	2.3465
4	13.0903	56.9685	28.1405	140.7027	1.988
Pt/C (Electrochem)	12.2667	53.3844	26.3701	131.8506	2.1215

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อระยะเวลาการผ่านแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นสมบัติต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการผ่านแก๊สไฮโดรเจนไปบนตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้โลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปของธาตุ สารประกอบจำพวกคลอไรด์หรือออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนหลุดออกจากโลหะ เมื่อระยะเวลาในการผ่านแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สมบัติต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าค่อนข้างคงที่ พิจารณาที่ระยะเวลาการผ่านแก๊สไฮโดรเจน 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่าค่าที่ได้ต่างกันเล็กน้อยและมีค่าใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C จากบริษัท Electrochem โดยที่ระยะเวลาการผ่านแก๊สไฮโดรเจน 4 ชั่วโมงมีค่าปริมาตรสะสม (Cumulative volume) เท่ากับ 13.09 ml/g STP การกระจายตัวของโลหะ (Metal Dispersion) เท่ากับ 56.97% พื้นที่ผิวของโลหะเท่ากับ 28.14 m^2/g sample ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่เกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 1.99 nm. ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท Electrochem เล็กน้อย ดังนั้นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้คาร์บอน (Gigantic) เป็นตัวรองรับและผ่านแก๊สไฮโดรเจน 4 ชั่วโมงที่อัตราการไหล 0.5 ml/min ที่อุณหภูมิ 250°C จากสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้กับตัวเร่งปฏิกิริยาทางการค้ามีค่าใกล้เคียงกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำตัวเร่ง

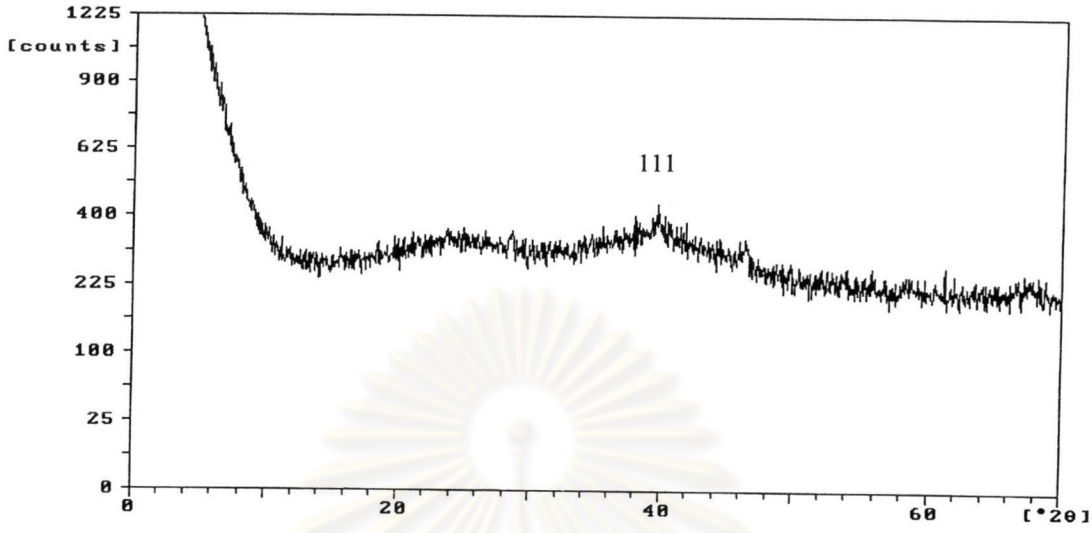
ปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไปใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะขอกล่าวในส่วนการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าในหัวข้อ 4.3

นอกจากขนาดและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงแล้ว ลักษณะของผลึกแพลทินัมยังมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาด้วย ดังนั้นจึงทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้เพื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Electrochem โดยใช้เครื่อง X-ray diffraction (XRD) ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าผลึกของแพลทินัมจากบริษัท Electrochem มีโครงสร้างกึ่ง amorphous สังเกตได้จากลักษณะของพีคที่ได้ค่อนข้างกว้าง และพบว่าแพลทินัมมีการจัดเรียงตัวของอะตอม 2 รูปแบบ คือ 111, 200 แต่โครงสร้างแบบ 111 มีปริมาณมากกว่า โครงสร้าง 200 การจัดเรียงตัวของอะตอมมีผลต่อขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา การจัดเรียงตัวแบบ 111 อะตอมจะใกล้ชิดกันระยะระหว่างแกนสั้นกว่าการจัดเรียงตัวแบบ 200 ดังนั้นการจัดเรียงแบบ 111 จะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าการจัดเรียงตัวแบบ 200 [Lipkowski, 1998]

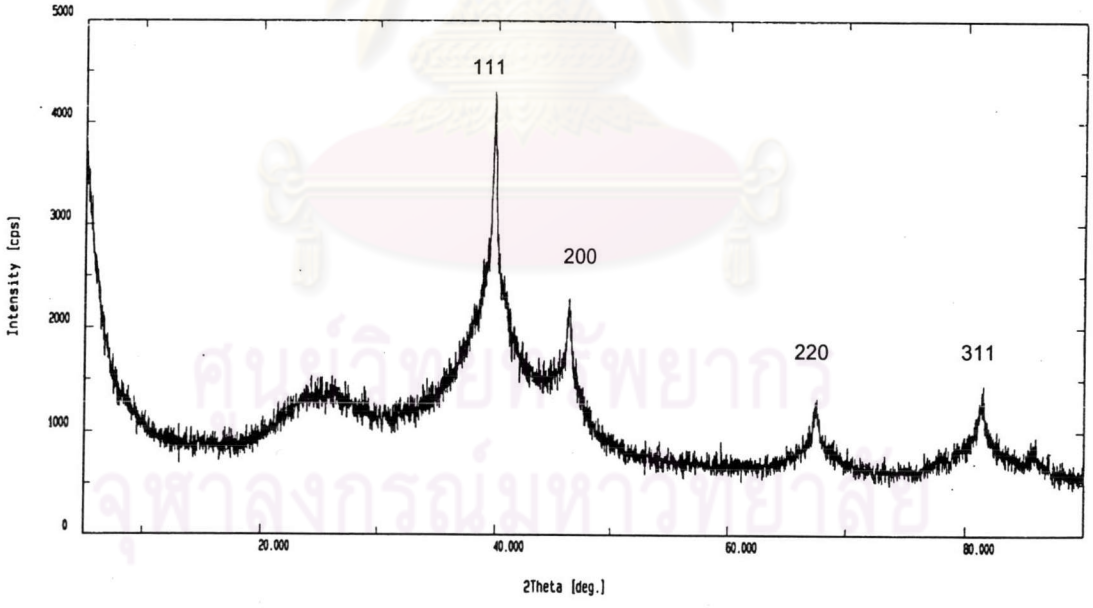
ส่วนผลการวิเคราะห์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท Electrochem แต่มีความสูงของพีค (Pt 111) ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Electrochem 3 เท่า แสดงว่ามีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Pt 111) ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาของบริษัท Electrochem ถึง 3 เท่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีการจัดเรียงตัวแบบ 111 มากขึ้นทำได้โดยการเผาหรือการรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเป็นผลึกมากขึ้น ผลจากการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจนแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C 20 wt %(Electrochem)



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C 20 wt% เตรียมโดยใช้ตัวรองรับคาร์บอน Gigantic ผ่าน H_2 ที่ 250°C 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C 20 wt% เตรียมโดยใช้ตัวรองรับคาร์บอน Gigantic ผ่าน H_2 ที่ 250°C 4 ชั่วโมง และ 350°C 1 ชั่วโมง

การเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบพิมพ์เริ่มจากการนำตัวเร่งปฏิกิริยา (20%wt. Pt/C) สารละลายเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) สารละลายเนฟิออน (Nafion) และแอลกอฮอล์ มาผสมให้เข้ากันในอ่างอัลตราโซนิกก่อนนำส่วนผสมดังกล่าวไปทาด้วยพู่กันบนกระดาษคาร์บอน ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบพิมพ์มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อความเข้าใจถึงผลของตัวแปรต่างๆ จึงทำการศึกษาผลองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการเตรียมต่อค่าความหนาและความต้านทานของขั้วไฟฟ้า

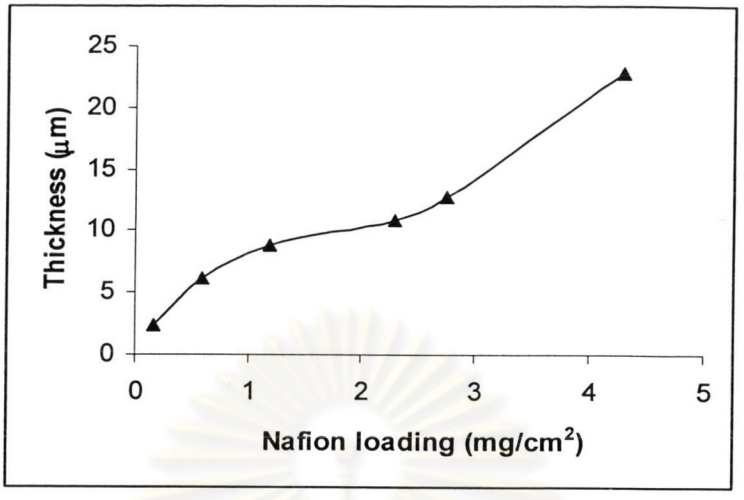
4.1.2 องค์ประกอบภายในขั้วไฟฟ้า

ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบพิมพ์องค์ประกอบที่สำคัญ เช่น เนฟิออน เทฟลอน ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อสมบัติของขั้วไฟฟ้า จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาผลขององค์ประกอบภายในต่อสมบัติของขั้วไฟฟ้า

4.1.2.1 ผลของปริมาณของเนฟิออน (Nafion loading effect)

เนฟิออนเป็นส่วนผสมตัวหนึ่งที่มีความสำคัญในการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เนื่องจากเนฟิออนช่วยในการเคลื่อนที่ของโปรตอน โดยสารละลายเนฟิออนเป็นสารตัวเดียวกับสารที่ใช้ทำเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน การศึกษาผลของปริมาณของเนฟิออนทำได้โดยนำสารละลายเนฟิออนไปเกาะติดบนกระดาษคาร์บอนที่ปริมาณต่างๆ โดยไม่มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาและเทฟลอน แล้วทำการวัดค่าความต้านทานและความหนาของขั้วไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5

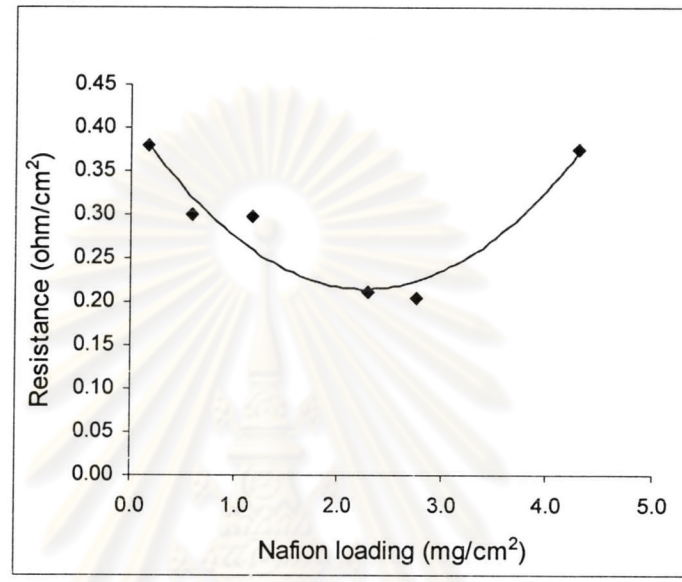
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณเนฟิออนต่อค่าความหนาของขั้วไฟฟ้า

รูปที่ 4.4 แสดงผลของปริมาณเนฟิออนต่อความหนาของขั้วไฟฟ้า พบว่าเมื่อปริมาณเนฟิออนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาของขั้วไฟฟ้าเพิ่ม ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของเนฟิออนที่เคลือบอยู่บนกระดาษคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น Wolf, 2003 ได้รายงานว่าเมื่อปริมาณเนฟิอออนเพิ่มขึ้น เนฟิออนจะกีดกั้นการเคลื่อนที่ของแก๊สไปยังบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาทำให้ปริมาณของสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาระบบจึงถูกจำกัดด้วยการแพร่ของสารตั้งต้น (reaction diffusion limitation) เมื่อพิจารณาผลของปริมาณของเนฟิออนต่อค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณเนฟิออนในขั้วไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นความต้านทานมีค่าลดลงหรือการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเนฟิออนจะช่วยในการเคลื่อนที่ของโปรตอนและไอออนทำให้ขั้วไฟฟ้ามีสมบัติการนำไฟฟ้าดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเนฟิออนจนเกินกว่าค่า 0.3 mg/cm^2 พบว่าความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขั้วไฟฟ้ามีปริมาณของเนฟิออนที่มากเกินไปทำให้ขั้วไฟฟ้ามีความหนามากขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของไอออนเป็นไปได้ยากขึ้น Passalacqua, 2001 ศึกษาร้อยละของเนฟิออน (Nafion percentage, NFP) ต่อความต้านทาน ความพรุนและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical surface area, ESA) ของขั้วไฟฟ้า พบว่าเมื่อร้อยละของเนฟิออนมีค่าเพิ่มขึ้นความพรุนและพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีมีค่าลดลง ส่วนความต้านทานมีลักษณะเป็นพาราโบลาหงายซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับผลการทดลองที่ได้ ดังนั้นในการเตรียมขั้วไฟฟ้าควรใช้ปริมาณของเนฟิออนให้เหมาะสมเพื่อจะได้ขั้วไฟฟ้าที่มีความต้านทานต่ำ การนำไฟฟ้าสูง การเคลื่อนที่ของไอออนต่างๆ สูง จากการทดลองพบว่าปริมาณ เนฟิออนที่

เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.5 - 3.0 mg/cm^2 (เทียบเท่ากับสารละลายเนฟิออน ปริมาตร 0.17 – 0.35 มิลลิลิตร) ผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Paganin, 1996 พบว่าปริมาณเนฟิออนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1.75 – 2.2 mg/cm^2



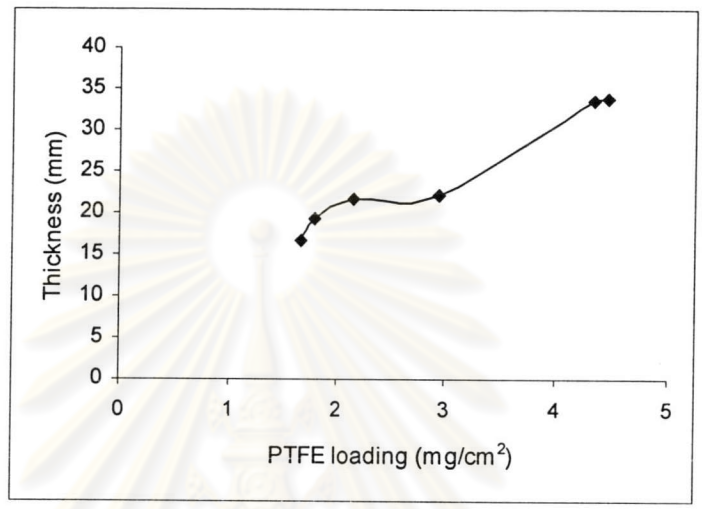
รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณเนฟิออนต่อค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า

4.1.2.2 ผลของปริมาณของสารเทฟลอน (PTFE loading effect)

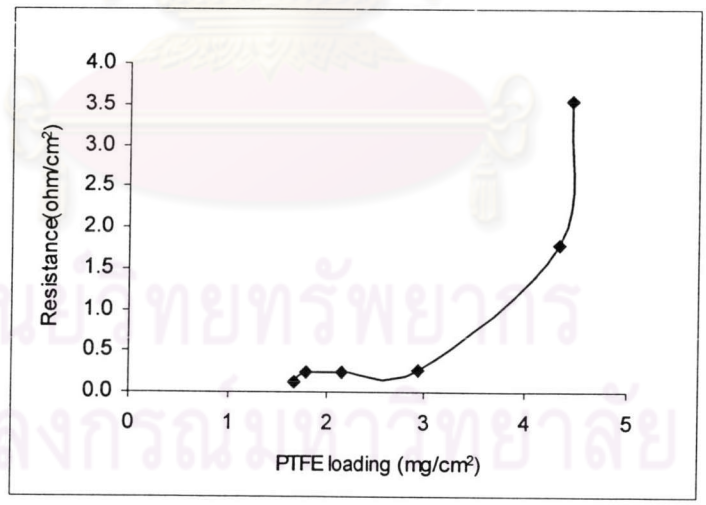
สารละลายเทฟลอนเป็นส่วนผสมตัวหนึ่งในชั้นแพร่และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบพิมพ์ เพื่อช่วยในการยึดเกาะของอนุภาคคาร์บอนกับอนุภาคอื่นและช่วยป้องกันการแพร่ของน้ำไปยังชั้นแพร่และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา เทฟลอนมีลักษณะคล้ายน้ำยาง การศึกษาผลของปริมาณของเทฟลอนทำได้โดยนำเทฟลอนไปเกาะติดบนกระดาษคาร์บอนที่ปริมาณต่างๆ โดยที่ไม่ผสมองค์ประกอบอื่น แล้ววัดค่าความต้านทานและความหนาของขั้วไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7

ผลของปริมาณของเทฟลอนต่อความหนาขั้วไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อปริมาณเทฟลอนมีค่าเพิ่มขึ้นความหนามีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเทฟลอนมีลักษณะคล้ายน้ำยางพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไปทาบนกระดาษคาร์บอนจึงมีลักษณะคล้ายฟิล์มยางเกาะบนกระดาษคาร์บอน นอกจากนี้ปริมาณเทฟลอนยังมีผลต่อความพรุนของขั้วไฟฟ้า Wolf, 2003 และ Giorgi, 1998

พบว่าเมื่อปริมาณเทฟลอนเพิ่มขึ้นความพรุนจะมีค่าลดลงแก๊สเชื้อเพลิงเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก ระบบจึงถูกจำกัดด้วยการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิง (Mass transport limitation) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าลดลง



รูปที่ 4.6 ปริมาณของเทฟลอนต่อค่าความหนาของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 ปริมาณของเทฟลอนต่อค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า

นอกจากปริมาณของเทฟลอนที่มีผลต่อค่าความหนาของขั้วไฟฟ้ายังมีผลต่อความต้านทานของขั้วไฟฟ้าด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อปริมาณของเทฟลอนมีค่าเพิ่มขึ้นความต้าน

ทานมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ที่ปริมาณเทฟลอนในช่วง 1.5 – 3 mg/cm^2 ความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากสารละลายเทฟลอนแพร่ซึมเข้าไปในกระดาษคาร์บอน ไม่เกิดชั้นฟิล์มบนกระดาษคาร์บอน สังเกตได้จากค่าความหนาที่แตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อปริมาณเทฟลอนมากกว่า 4 mg/cm^2 ความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากทั้งนี้สารละลายเทฟลอนที่มีลักษณะคล้ายยางมีการนำไฟฟ้าต่ำ เมื่อเคลือบอยู่บนกระดาษคาร์บอนมากๆ จึงทำให้ขั้วไฟฟ้ามีสภาวะความต้านทานสูงขึ้น จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 ปริมาณเทฟลอนที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 1.5 – 3 mg/cm^2 (เทียบเท่ากับสารละลายเทฟลอนปริมาตร 5 – 10 ไมโครลิตร) เพราะให้ความหนาและความต้านทานของขั้วไฟฟ้าต่ำ

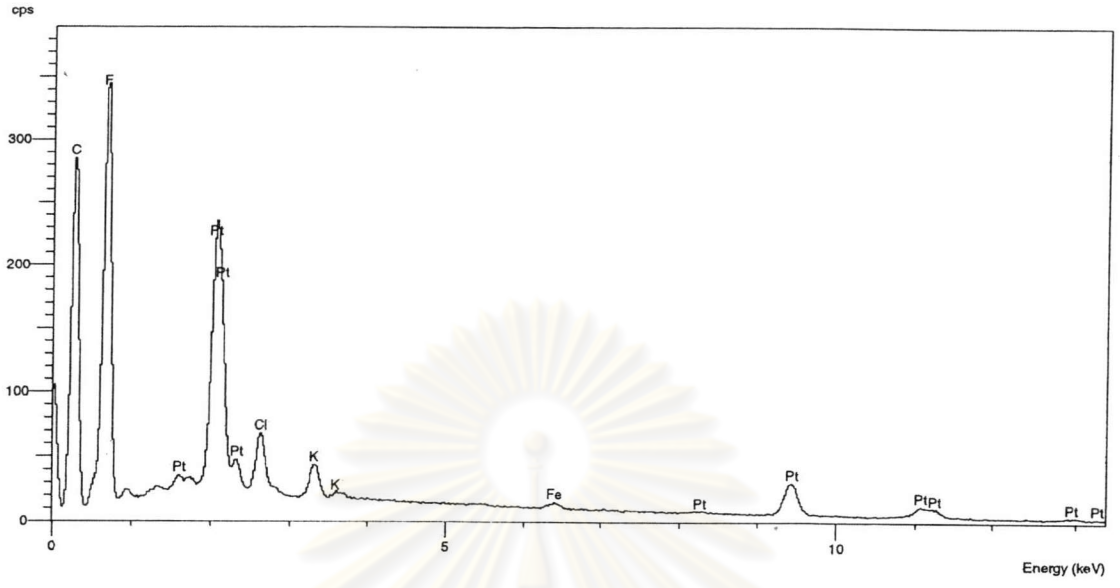
จากการศึกษาผลของปริมาณเนฟิออนและเทฟลอนพบว่าปริมาณเทฟลอนและเนฟิออนมีผลต่อค่าความต้านทานและความหนาของขั้วไฟฟ้า แต่ปริมาณของเนฟิออนมีผลต่อความต้านทานของขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าเทฟลอน เนื่องจากเนฟิออนมีสมบัติในการนำไฟฟ้า

4.1.3 ปริมาณและการกระจายของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

ปริมาณและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้ามีผลต่อสมบัติของขั้วไฟฟ้าและประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาปริมาณและลักษณะการกระจายของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้

4.1.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณของแพลทินัม (Pt loading)

การวิเคราะห์ปริมาณของแพลทินัมบนกระดาษคาร์บอนที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทำได้ 2 วิธีด้วยกันคือ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX ของขั้วไฟฟ้าและการคำนวณดุลมวล การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX แสดงชนิดและปริมาณของสารที่มีบนขั้วไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์ EDX แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีคาร์บอน ฟลูออรีน คลอไรด์และแพลทินัมเป็นองค์ประกอบสำคัญ องค์ประกอบเหล่านี้มาจากส่วนประกอบต่างๆ ที่เป็นส่วนผสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้า ในส่วนของแพลทินัมพบว่า มีพีคของแพลทินัมด้วยกันหลายตำแหน่ง เนื่องจากแพลทินัมมีระดับพลังงานหลายค่าจึงเกิดสเปกตรัมของแพลทินัมได้หลายตำแหน่ง แต่ในการพิจารณาปริมาณของแพลทินัมนั้นจะนำพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของพีคแพลทินัมมารวมกันและคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.8 ปริมาณของโลหะบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าที่ปริมาณ Pt 0.67 mg/cm^2

การคำนวณปริมาณแพลทินัมบนขั้วไฟฟ้า จะทำได้โดยนำร้อยละของแพลทินัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX คูณน้ำหนักของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (สมการที่ 4.1) จากการคำนวณพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยวิธีดุลมวล (mass balance) ในสมการที่ 4.2 – 4.5 (ภาคผนวก ก-1) ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณปริมาณแพลทินัมจากการวิเคราะห์ EDX และดุลมวล

Pt loading (mg/cm^2)		
EDX	Mass balance	Δ_{cal}
0.67	0.59	0.06
0.40	0.33	0.05
0.12	0.21	0.06
0.41	0.46	0.04
0.41	0.35	0.04
0.17	0.17	0.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้นสามารถใช้ผลการคำนวณด้วยวิธีดุลมวลในการประมาณการปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ดังนั้นการรายงานผลในงานวิจัยนี้จะใช้การคำนวณด้วยวิธีดุลมวล

การคำนวณจาก EDX

$$Pt\ loading = \frac{(\%Pt)(CL)_{actual}}{(A)(100)} \qquad 4.1$$

การคำนวณดุลมวลสาร

$$Pt_{actual} = \frac{(CL)_{actual}}{(CL)_{theory}} \times Pt_{input} \qquad 4.2$$

$$(CL)_{theory} = PTFE_{input} + Nafion_{input} + Pt/C_{input} \qquad 4.3$$

$$(CL)_{actual} = wt.of\ carbon\ paper_{after\ print} - wt.of\ carbon\ paper_{after\ pretreat} \qquad 4.4$$

$$Pt\,loading = \frac{Pt_{actual}}{A} \qquad 4.5$$

โดยที่

$Pt\,loading$ = ปริมาณแพลทินัมบนขั้วไฟฟ้า, (mg/cm^2)

$\%Pt$ = ร้อยละของแพลทินัมบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจาก EDX

$(CL)_{actual}$ = น้ำหนักของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจริง, mg

$(CL)_{Theory}$ = น้ำหนักของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาตามทฤษฎี, mg

Pt_{actual} = น้ำหนักของแพลทินัมบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจริง, mg

Pt_{input} = น้ำหนักของแพลทินัมบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่, mg

$PTFE_{input}$ = น้ำหนักของเทฟลอนบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่, mg

$Nafion_{input}$ = น้ำหนักของเนฟีออนบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่, mg

Pt/C_{input} = น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่, mg

A = พื้นที่ของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา, cm^2

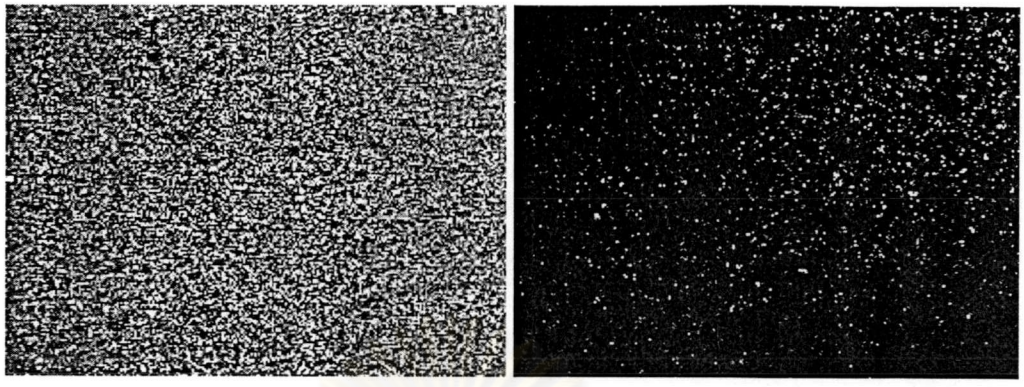
4.1.3.2 <u>การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา</u>

ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นโปรตอน โลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องกระจายบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างสม่ำเสมอทั้งผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า การศึกษาการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยนำแผ่นขั้วไฟฟ้าไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้นไม่รวมชั้นรองรับหรือชั้นกระดาษคาร์บอนที่ใช้ในการรองรับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมและอัลลอยด์ของแพลทินัม

➢ การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม

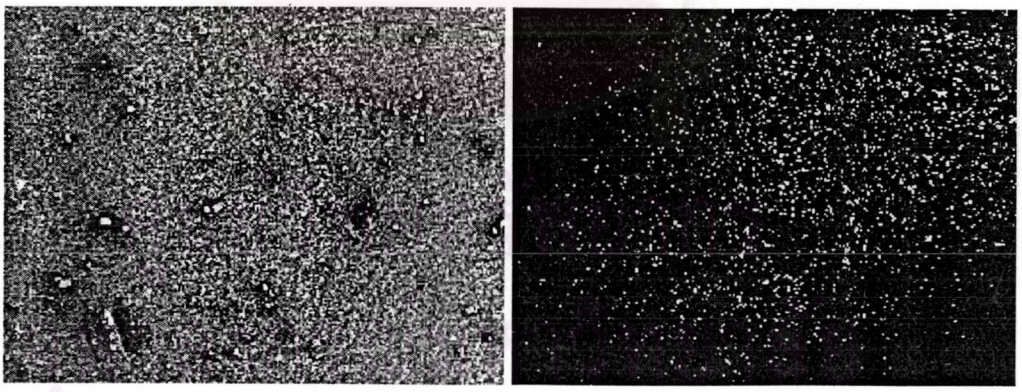
การศึกษาการกระจายของแพลทินัมบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ ด้วยวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์ แสดงในรูปที่ 4.9 โดยที่ภาพทางซ้ายมือแสดงผิวหน้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ภาพขวามือแสดงตำแหน่งของแพลทินัมบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (จุดสีขาวแสดงตำแหน่งของแพลทินัม) พบว่าเมื่อปริมาณของแพลทินัมมีปริมาณต่างกันขั้วไฟฟ้ามีการกระจายของแพลทินัมในลักษณะเดียวกันและทั่วถึงบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อปริมาณของแพลทินัมเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของจุดสีขาวจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวทั่วทั้งผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมในการใช้เตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของแพลทินัมที่ปริมาณต่างๆ (ก) 0.21 mg/cm^2 (ข) 0.33 mg/cm^2 (ค) 0.59 mg/cm^2 โดยที่ภาพซ้ายแสดงผิวหน้าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา ภาพขวาแสดงการกระจายตัวของแพลทินัม

➢ การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาอัลลอยด์ของแพลทินัมและโลหะชนิดอื่น

การศึกษาการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาอัลลอยด์ทำได้เช่นเดียวกันกับการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม แต่ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นอัลลอยด์ระหว่างแพลทินัมกับโลหะชนิดอื่น เช่น รูทิเนียม โคบอลต์ นิเกิล เป็นต้น โดยมีอัตราส่วนระหว่างแพลทินัมต่อโลหะผสมเท่ากับ 1:1 (Pt:M = 1:1) ผลการกระจายของตัวเร่งปฏิกิริยาอัลลอยด์แสดงดังรูปที่ 4.10 จุดสีขาวแทนอนุภาคของโลหะบนกระดาษคาร์บอน โดยภาพซ้ายสุดแสดงพื้นผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด ภาพกลางแสดงการกระจายตัวของแพลทินัม และภาพขวาแสดงการกระจายตัวของโลหะที่นำมาผสมกับแพลทินัม จะเห็นว่าโลหะทั้ง 2 ชนิดกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นขั้วไฟฟ้าแสดงว่าโลหะทั้ง 2 ชนิดผสมกันอย่างดี

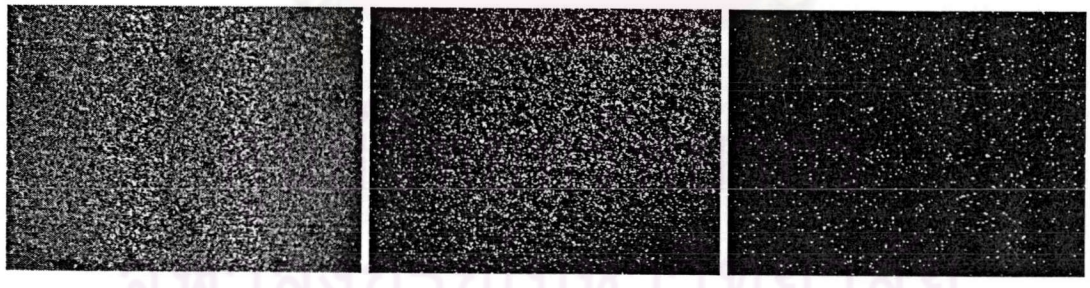
4.1.4 ขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาบนกระดาษคาร์บอน

ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการทำงานของขั้วไฟฟ้า กล่าวคือถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก จะทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นแต่ความพรุนของขั้วไฟฟ้าลดลงซึ่งความพรุนมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารภายในระบบ ในทำนองกลับกันถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาจะน้อย ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลงแต่ความพรุนของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นการเคลื่อนที่ของสารเป็นไปได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจำเป็นต้องศึกษาขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาขนาดของอนุภาคทำได้โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัด Particle size จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Electrochem มีขนาด 82.66 μm ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยผ่านการรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจน 250°C 4 ชั่วโมงและ 350°C 1ชั่วโมง มีขนาด 31.04 μm แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Electrochem นอกจากวิเคราะห์ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วมีการนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปส่องด้วยเครื่อง SEM ผลการศึกษาขนาดอนุภาคบนกระดาษคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 4.11 โดยภาพ (ก) แสดงขนาดอนุภาคบนขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem ที่กำลังขยาย 700 เท่า ภาพ (ข) แสดงขนาดอนุภาคบนกระดาษคาร์บอนจากการเตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ที่กำลังขยาย 350 เท่า จะเห็นว่าอนุภาคของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้มีความสม่ำเสมอน้อยกว่าขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem และพบว่าขนาดอนุภาคของขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem มีขนาด 34.2 μm ซึ่งมีขนาดน้อยกว่าขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการวัดขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามาจากการวัด

ค่าเฉลี่ยในขณะที่การวัดขนาดอนุภาคบนขั้วไฟฟ้าใช้การส่องกล้องมุมกว้างเพียงจุดเดียวบนขั้วไฟฟ้า สำหรับขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์มีขนาด 60 μm

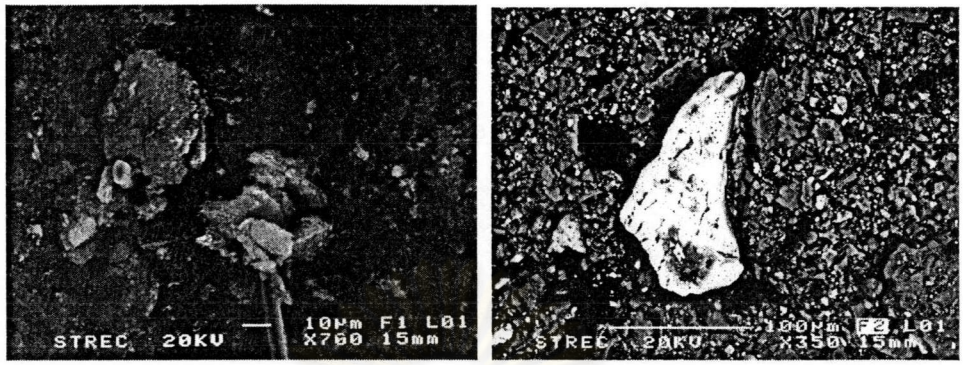
(ก) Pt-Ru/C Pt Ru

(ข) Pt-Co/C Pt Co



(ค) Pt-Ni/C Pt Ni

รูปที่ 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



(ก) (ข)

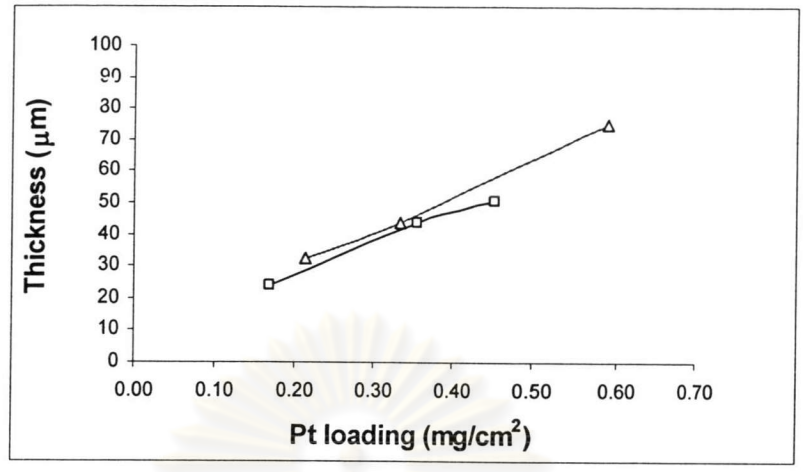
รูปที่ 4.11 ขนาดอนุภาคบนกระดาษคาร์บอน : (ก) ขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem (ข)ขั้วไฟฟ้าจากการเตรียมด้วยวิธีการพิมพ์

4.1.5 ความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา

ความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมรรถนะการทำงานของขั้วไฟฟ้า โดยมีผลต่อค่าการเคลื่อนที่ของไอออนและเชื้อเพลิงหรือความต้านทานและค่าการนำไฟฟ้า จากการศึกษาความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆทำได้โดยเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาค่าต่างๆ โดยกำหนดให้อัตราส่วนอื่นมีค่าคงที่ดังนี้ เทฟลอน 1.8 mg/cm^2 เนฟิออน 2.5 mg/cm^2 แล้วทำการวัดความหนาของขั้วไฟฟ้า การคิดความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคำนวณจากสมการ 4.6

$$Thickness_{catalyst\ layer} = thickness_{electrode} - thickness_{carbon\ paper}\ ;(\mu m) \qquad 4.6$$

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อปริมาณของแพลทินัมมีค่าเพิ่มขึ้นความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สะสมอยู่บนกระดาษคาร์บอนเพิ่มขึ้น

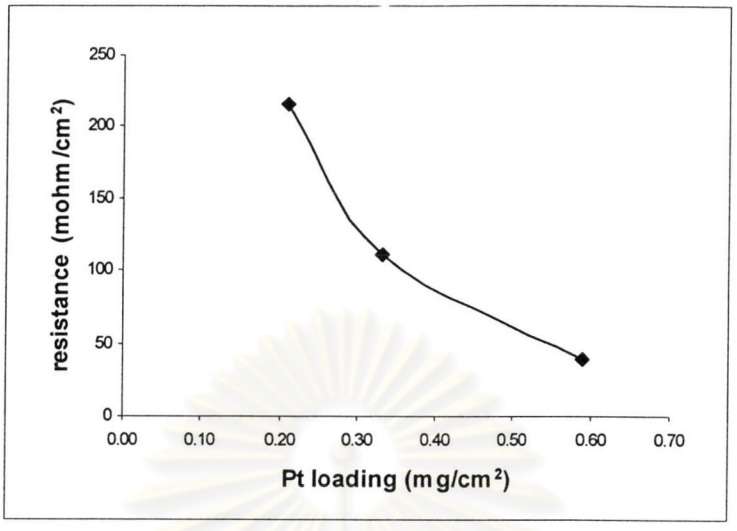


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยากับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อรีดิวซ์ไฮโดรเจน 1 ชั่วโมง (□) และ 4 ชั่วโมง (Δ)

4.1.6 ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพิมพ์

ความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสของเซลล์เชื้อเพลิง ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าประกอบด้วยความต้านทานในส่วนของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) และความต้านทานในชั้นการแพร่ของแก๊ส (Gas diffusion layer) ซึ่งทำมาจากกระดาษคาร์บอน ซึ่งมีผลกระทบต่อโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน เพราะชั้นทั้งสองเกิดความต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณขั้วไฟฟ้าและบริเวณแผ่นสะสมกระแส และเกิดความต้านทานในการเคลื่อนที่ของโปรตอนที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นจากขั้วแอโนดไปยังแคโทด

การศึกษาความต้านทานของขั้วไฟฟ้านั้นทำได้โดยนำขั้วไฟฟ้าไปใส่ชุดทดสอบความต้านทานและทำการวัดความต้านทานในกระแสสลับโดยใช้โปรแกรม Frequency Response Analysis (FRA) ผลการทดลองวัดความต้านทานของขั้วไฟฟ้าต่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมแสดงดังรูปที่ 4.13

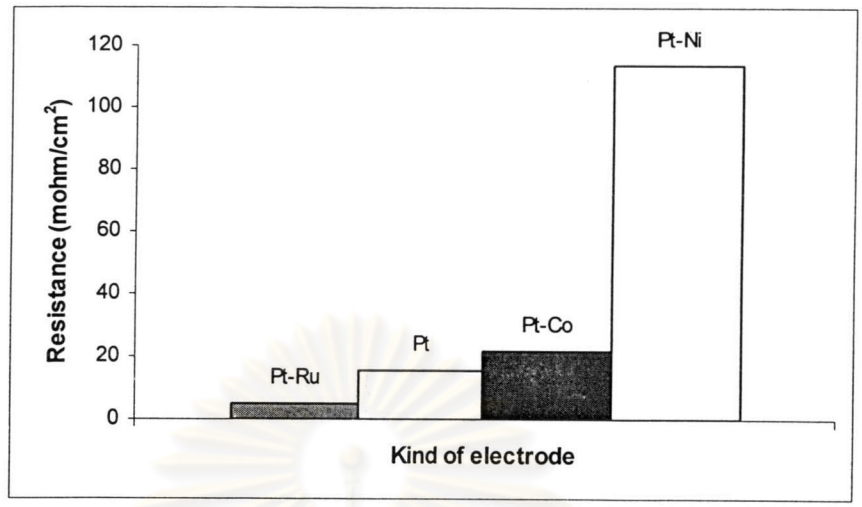


รูปที่ 4.13 ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าต่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วย H_2 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อปริมาณของแพลทินัมมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแพลทินัมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีด้วยคือเมื่อปริมาณของแพลทินัมมีค่าเพิ่มขึ้นค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นความต้านทานจึงมีค่าลดลง แสดงว่าแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เพราะมีค่าการนำไฟฟ้าสูง

สำหรับขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์การศึกษาความต้านทานทำได้เช่นเดียวกับขั้วไฟฟ้าแพลทินัม แต่ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะมีโลหะอื่นผสมกับแพลทินัมโดยมีอัตราส่วน Pt:M เท่ากับ 1:1 ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14 พบว่าในขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดมีค่าความต้านทานต่างกันสามารถเรียงลำดับความต้านทานของขั้วไฟฟ้าได้ดังนี้ Pt-Ru<Pt<Pt-Co<Pt-Ni แสดงว่าโลหะแต่ละชนิดมีค่าการนำไฟฟ้าต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



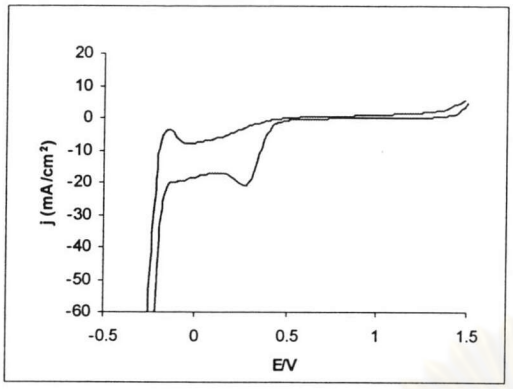
รูปที่ 4.14 ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์โดยอัตราส่วนของ Pt:M เท่ากับ 1:1 (ก) Pt-Ru/C 0.59 mg/cm^2 (ข) Pt-Co/C 0.51 mg/cm^2(ค) Pt-Ni/C 0.60 mg/cm^2 เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแพลทินัม 0.59 mg/cm^2

4.1.7 การศึกษาการออกซิเดชันของไฮโดรเจน

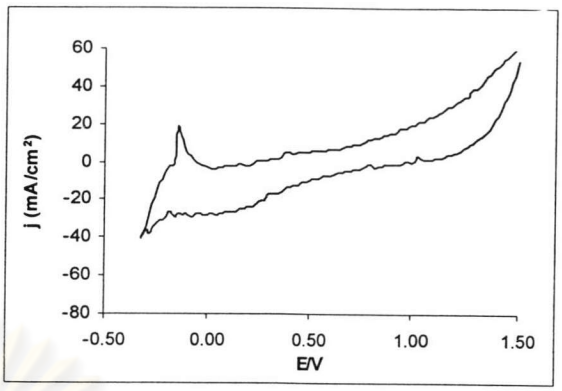
- การออกซิเดชันของไฮโดรเจนในสารละลาย H_2SO_4 1 โมลต่อลิตร

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนของขั้วไฟฟ้าที่ปริมาณแพลทินัมต่างกัน ทำได้โดยนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์โดยใช้ Cyclic voltammetry ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ภายใต้การป้อนแก๊สไฮโดรเจนที่อัตราการไหล 30 sccm และขั้วแอโนดเป็นแพลทินัมและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบบคาโลเมล ภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ scan rate เท่ากับ 50 mv/s ช่วงความต่างศักย์ -0.5 – 1.5 โวลต์ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15

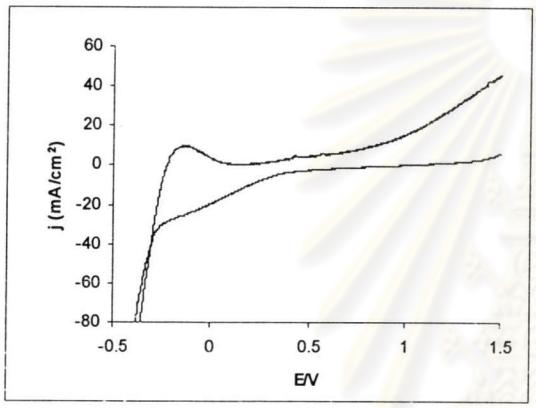
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



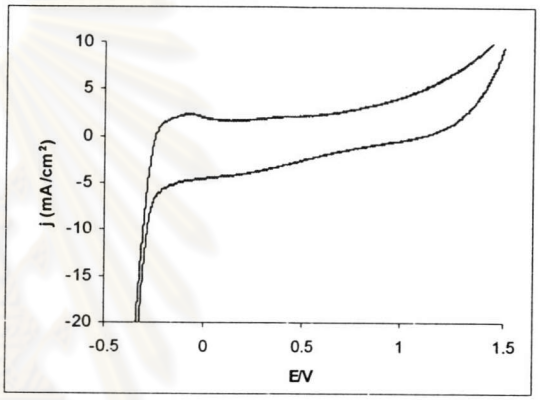
(ก)



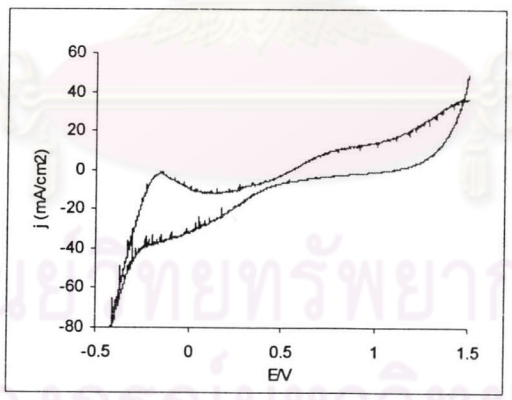
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.15 Cyclic Voltammetry ของขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณแพลทินัมต่างกัน: (ก) ขั้วไฟฟ้า 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_2SO_4 1 M, H_2 30 sccm เทียบกับ Saturated Calomel electrode

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการทดลองพบว่าปริมาณของแพลทินัมมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเล็กน้อยพิจารณาจากตำแหน่งของพีคที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยพบว่าตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนนั้นเกิดที่ประมาณ -0.14 โวลต์ และยังมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแพลทินัมเป็นการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate constant, k) มีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่กระแสแปรผันตรงกับค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา [Lam Yan Choi]

การศึกษาพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าพิจารณาจากจำนวนประจุที่ทำให้ไฮโดรเจนหลุดจาก monolayer โดยกำหนดให้แพลทินัมบนขั้วไฟฟ้ามีการจัดเรียงแบบ monolayer และมีการยึดเกาะระหว่างแพลทินัมและไฮโดรเจน (Pt-H bonding) เป็น 1:1 ตลอดทั้งผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า [Wolf, 2003] จำนวนประจุคำนวณจากสมการ 4.7 (ภาคผนวก ก-3) ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.4 ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าในงานวิจัยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านแก๊สไฮโดรเจน 4 ชั่วโมง จะมีปริมาณแพลทินัมที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนประจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีคือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่จะเห็นว่าขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem มีค่าจำนวนประจุไฟฟ้าต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ แสดงว่าขั้วไฟฟ้าที่ได้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา การที่ขั้วไฟฟ้ามีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายมีความเป็นไปได้ที่จะได้ความหนาแน่นกระแสสูงเมื่อนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง

$$Q_H = \frac{1}{\upsilon}\int_{E_1}^{E_2}(j - j_{dl})dE \qquad 4.7$$

โดยที่

Q_H = จำนวนประจุไฟฟ้า (C/cm^2)

E_1, E_2 = ความต่างศักย์ที่ตำแหน่ง 1 และ 2 (V)

j = ความหนาแน่นกระแส (mA/cm^2)

j_{dl} = ความหนาแน่นกระแสที่ double layer (mA/cm^2)

υ = อัตราการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ (mV/s)

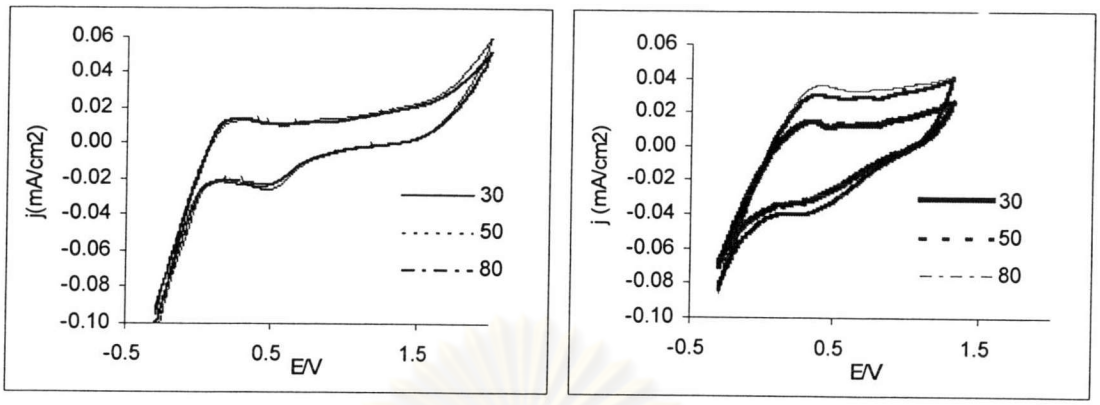
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วย Cyclic voltammetry ของขั้วไฟฟ้าในสารละลาย H_2SO_4 1 M, H_2 30 sccm เทียบกับ Saturated Calomel electrode

Electrode	Corresponding voltage (V)	Q_H (C/cm^2)
Pt 1.0 mg/cm^2(EC)	-0.14	0.006
Pt 0.59 mg/cm^2	-0.14	0.028
Pt 0.33 mg/cm^2	-0.13	0.034
Pt 0.21 mg/cm^2	-0.075	0.002
Pt 0.74 mg/cm^2(***)	-0.15	0.034

(***) หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C ที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วย H_2 ที่ 250°C 4 ชั่วโมงและที่ 350°C 1 ชั่วโมง

➢ การออกซิเดชันของไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิง

เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนและศึกษาการเคลื่อนที่ของโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิง โดยนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมม์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วย H_2 ที่ 250°C 4 ชั่วโมงและที่ 350°C 1 ชั่วโมง มาประกอบเป็น Membrane electrode assembly แล้วจึงนำไปประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิการทำงานของเซลล์และระบบให้ความชื้นเท่ากับ 60°C ทางด้านแอโนดป้อนแก๊สไฮโดรเจนด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 30, 50 และ 80 sccm ทางด้านแคโทดป้อนแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 50 sccm อัตราการเปลี่ยนความต่างศักย์ (scan rate) 50 mV/s ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16



(ก) (ข)

รูปที่ 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

นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้า (ภาคผนวก ก-4) ที่อัตราการไหลต่างกันผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าขั้วไฟฟ้าทั้งสองเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนที่ค่าความต่างศักย์เดียวกันและพบว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบการนำไฟฟ้าจากการศึกษาการออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจน

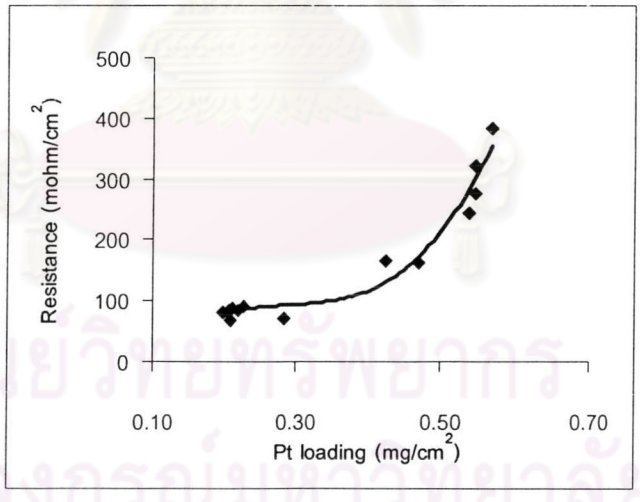
Single Cell from EC 1 mg/cm^2			Pt (0.74 mg/cm^2)		
Flow rate (sccm)	J_{dl} (mA/cm^2)	C μF/cm^2	Flow rate (sccm)	J_{dl} (mA/cm^2)	C μF/cm^2
30	0.012	240	30	0.013	260
50	0.015	300	50	0.029	580
80	0.015	300	80	0.033	660

4.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition)

การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้านั้น อาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโลหะไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยโลหะไอออนเหล่านั้นจะไปเกาะที่บริเวณขั้วแคโทด(Working electrode) ในงานวิจัยนี้ใช้กระดาษคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด ใช้ตาข่ายแพลทินัมเป็นขั้วแอโนด และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบบคาโลเมล สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ เตตระคลอโรแพลทินิก ($H_2PtCl_6 \bullet 6H_2O$) และศึกษาคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ได้ดังนี้

4.2.1 ความต้านทานของขั้วไฟฟ้า

การศึกษาความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า สามารถทำได้เช่นเดียวกับขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการเตรียมด้วยการพิมพ์ คือ นำขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีพอกพูนไปวัดความต้านทานด้วยวิธี Electrohemical Impedance Spectroscopy (EIS) ที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของปริมาณแพลทินัมกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า

จากการศึกษาความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการเกาะติดด้วยไฟฟ้าพบว่าเมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมมีค่าเพิ่มขึ้นความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะของแพลทินัมที่เคลือบบนกระดาษคาร์บอนไม่อยู่ในรูปของโลหะ แต่จาก

การศึกษาเปรียบเทียบความต้านทานของขั้วไฟฟ้าระหว่างการเตรียมขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 วิธี พบว่าการเตรียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้ามีความต้านทานต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีพิมพ์โดยพิจารณาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการเกาะติดด้วยไฟฟ้านั้นไม่มีองค์ประกอบที่เป็นส่วนผสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้าเหมือนกับการเตรียมด้วยวิธีพิมพ์ จึงมีค่าความต้านทานน้อยกว่า

4.2.2 การเกาะติดและการกระจายตัวของแพลทินัมในขั้วไฟฟ้า

การศึกษาการเกาะติดของแพลทินัมและการกระจายตัวของแพลทินัมในขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ทำได้โดยการนำขั้วไฟฟ้าไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.18 ภาพ (A) แสดงการเกาะติดของอนุภาคแพลทินัมในกระดาษคาร์บอนจุดสีขาวแสดงตำแหน่งของแพลทินัม พบว่าอนุภาคของแพลทินัมเกาะบริเวณเส้นใยของคาร์บอน แต่กระดาษคาร์บอนมีความพรุนสูงอนุภาคของแพลทินัมจึงเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในชั้นกระดาษคาร์บอน ทำให้ความหนาของขั้วไฟฟ้าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ภาพ (B) แสดงการกระจายตัวของแพลทินัมพบว่าอนุภาคของแพลทินัมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนขั้วไฟฟ้า เช่นเดียวกับการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์

(A) (B)

รูปที่ 4.18 การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ปริมาณแพลทินัม 0.54 mg/cm^2
(A) การเกาะติดของแพลทินัม (B) การกระจายตัวของแพลทินัม

การที่อนุภาคแพลทินัมไม่ได้เกาะบริเวณผิวหน้าของกระดาษคาร์บอนเมื่อนำไปประกอบเป็นชุดทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง(MEA) ทำให้อนุภาคของแพลทินัมไม่ได้สัมผัสกับเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน (Nafion) โดยตรงส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยาก ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้จะต้องสัมผัสทั้งกระดาษคาร์บอนและเยื่อแผ่นพร้อมๆกัน จึงอาจเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่ำ

4.2.3 ความหนาของขั้วไฟฟ้า

เนื่องจากการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้า อนุภาคของแพลทินัมจะเข้าไปเกาะในชั้นของกระดาษคาร์บอนบริเวณเส้นใยไม่ได้เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าของกระดาษคาร์บอนเช่นเดียวกับการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์ ทำให้ความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าน้อยมากหรืออาจไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลย การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเกาะในชั้นกระดาษคาร์บอน ทำให้ความต้านทานในขั้วไฟฟ้าต่ำ

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

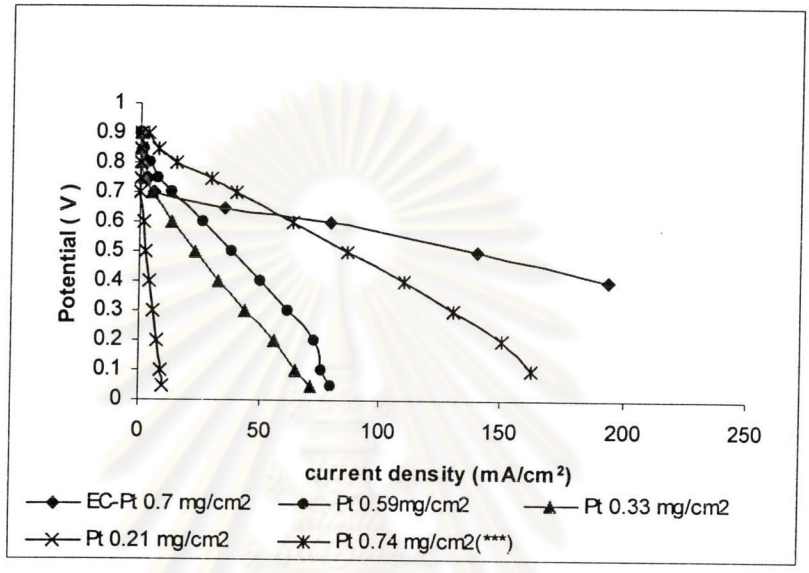
การวัดประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้าจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าความต่างศักย์โดยแบ่งการศึกษาตามลักษณะการเตรียมขั้วไฟฟ้า

4.3.1 ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าจากการเตรียมแบบพิมพ์

- ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม

การทดลองเพื่อทำการวัดประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้าอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแส โดยภาวะที่ใช้อ้างอิงถึงงานวิจัยของพัฒนพงษ์, 2545 ซึ่งทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าได้ภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เท่ากับ

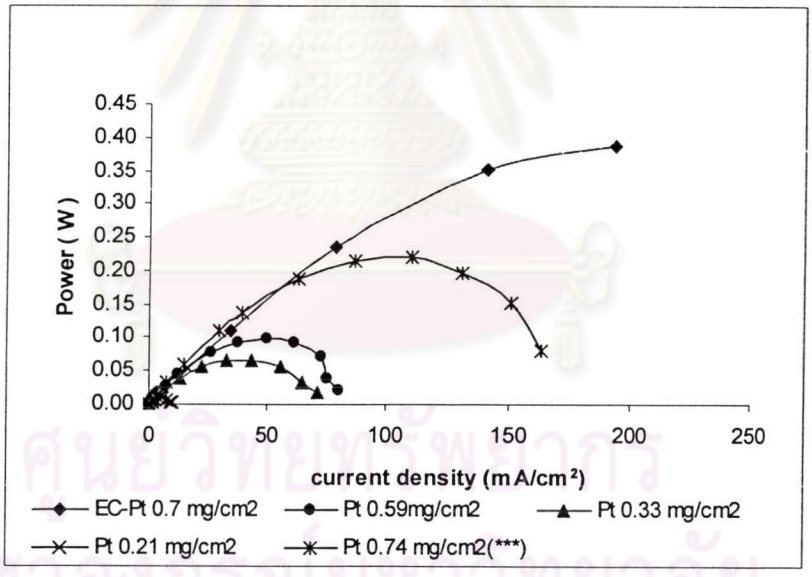
60 °C และความดันบรรยากาศ ดังนั้นในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจึงถือเอาภาวะดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้มีปริมาณแพลทินัม 0.21, 0.33, 0.59 และ 0.74 mg/cm^2 ผลการทดลองแสดงในกราฟโพลาไรเซชันรูปที่ 4.19 และกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ กัน โดย Pt/C ผ่านการรีดิวซ์ด้วย H_2 ที่ 250°C 4 ชั่วโมง เทียบกับขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem (*** Pt/C ที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วย H_2 ที่ 250°C 4 ชั่วโมง และที่ 350°C 1 ชั่วโมง)

จากรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อปริมาณแพลทินัมบนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นปริมาณความหนาแน่นกระแสที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากันมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จะเห็นว่ากราฟที่ได้ของขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณแพลทินัมน้อยจะมีความชันมากในช่วงโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานภายในระบบ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความต้านทานลดลงเมื่อปริมาณแพลทินัมมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบผลของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้กับขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem พบว่าปริมาณกระแสที่ได้จากขั้วไฟฟ้าที่เตรียมมีค่าความหนาแน่นกระแสต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีความเป็นผลึกต่ำ จึงเกิดปฏิกิริยาได้ยากและนำไฟฟ้าได้ต่ำกว่าจากบริษัท Electrochem

เมื่อมีการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาโดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 350°C เพื่อให้มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น แล้วจึงนำมาเตรียมขั้วไฟฟ้า Pt/C 0.74 mg/cm^2 โดยกำหนดให้องค์ประกอบภายในที่ใช้มีค่าคงที่ พบว่าที่ค่าความต่างศักย์เท่ากันความหนาแน่นกระแสที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Electrochem พบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงหรือในช่วงที่เกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากปฏิกิริยาให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Electrochem ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าจึงเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Electrochem ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจน แต่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำหรือในช่วงโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน ความหนาแน่นกระแสที่ได้ต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem ทั้งนี้เนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่เตรียมมีความต้านทานและความหนาสูงกว่าขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค 10) ทำให้การเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิง ไอออนและอิเล็กตรอนยากกว่าขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ กัน เทียบกับขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem

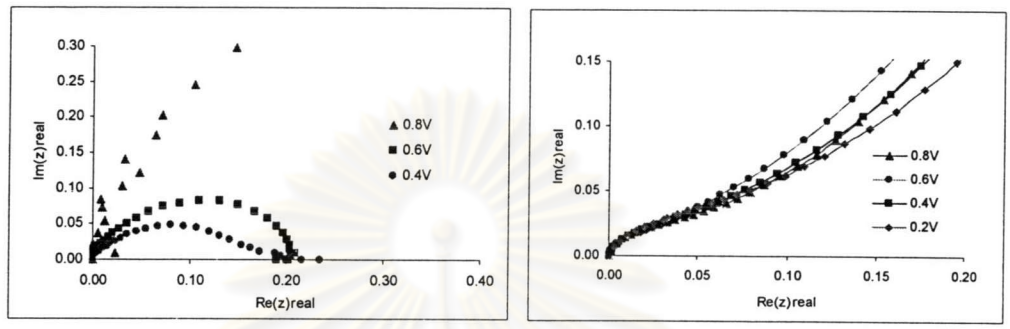
นำผลการทดลองที่ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ กัน ดังรูปที่ 4.20 และหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ($Power_{max}$) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณแพลทินัมมีค่าเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของขั้วไฟฟ้าแพลทินัมที่ปริมาณต่างๆ

Pt loading (mg/cm^2)	Power (W)
0.59	0.100
0.33	0.065
0.21	0.009
*** 0.74	0.220
EC-Pt/C 0.70	0.389

เพื่อความเข้าใจกลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงวิเคราะห์การทำงานในรูปของอิมพิแดนซ์ (Impedance) โดยอาศัยโปรแกรม Frequency Response Analysis (FRA) ในช่วงความถี่ 10 mHz – 10 kHz ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Electrochem ในรูปที่ 4.21 (ก) เกิดครึ่งวงกลม (loop) เพียงวงเดียวแสดงว่าการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงควบคุมด้วยประจุ (Charge control) ที่ประกอบไปด้วยตัวสะสมกระแส (current collector) ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst interface) ผิวหน้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ (electrode/electrolyte interface) ในขณะที่การทำงานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านรีดิวซ์ที่ 250 °C 4 ชั่วโมงและ 350°C 1 ชั่วโมง แสดงในรูป 4.21(ข) พบว่าเมื่อความถี่ต่ำลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริง (Real) และค่าจินตภาพ (imagine) มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและความชันมีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงควบคุมด้วยการเคลื่อนที่ของสาร (diffusion control) [Bard, 1980] ซึ่งเกิดจากปริมาณของสารไม่เพียงพอหรือมีปริมาณเพียงพอแต่ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ จากสมการการเคลื่อนที่ของ Fick 's Law การเคลื่อนที่ของแก๊สในของแข็งพรุนขึ้นอยู่กับโครงสร้างของของแข็ง [Christie,1995] แสดงว่าของแข็งที่มีความพรุนสูงและบางแก๊สจะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าของแข็งที่มีความพรุนต่ำและหนา ดังนั้นการเคลื่อนของสารภายในเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นกับความพรุนและความหนาของขั้วไฟฟ้า จากการวิเคราะห์สมบัติของขั้วไฟฟ้า (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค 10) พบว่าขั้วไฟฟ้าที่ได้มีความหนาใกล้เคียงกับขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem แต่มี

ความพรุนน้อยกว่าจึงเป็นผลทำให้การเคลื่อนของแก๊สในขั้วไฟฟ้าจากบริษัท Electrochem เกิดได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ ดังนั้นในการเตรียมขั้วไฟฟ้านอกจากมีความต้านทานต่ำ นำไฟฟ้าได้ดี มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูงจะต้องมีความพรุนสูงด้วย



(ก) (ข)

รูปที่ 4.21 Nyquit plot ของเซลล์เชื้อเพลิง (ก) ตัวเร่งปฏิกิริยาจากบริษัท Electrochem โดยมีปริมาณแพลทินัม 0.7 mg/cm^2 (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านรีดิวซ์ที่ 250 °C 4 ชั่วโมง และ 350°C 1 ชั่วโมงโดยมีปริมาณแพลทินัม 0.74 mg/cm^2

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.4 โวลต์

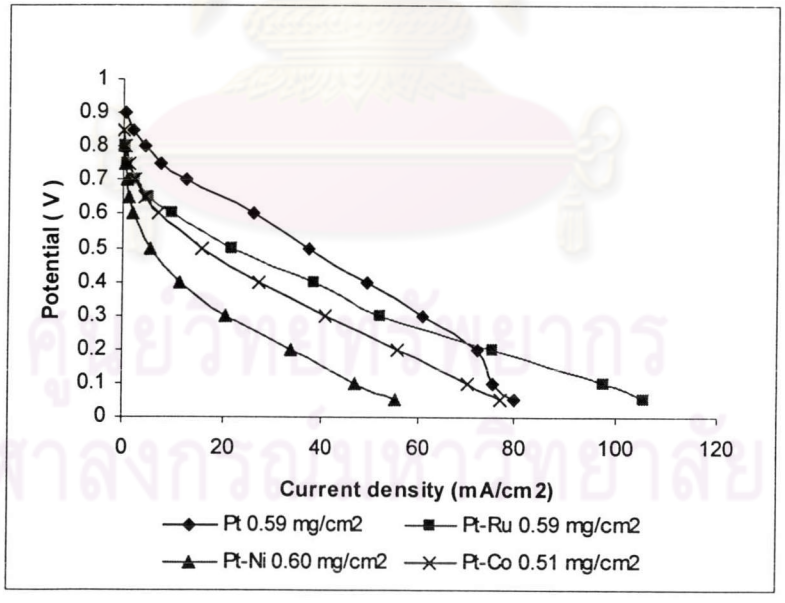
Reference	Pt loading (mg/cm^2)	Cell temperature (°C)	Nafion loading (mg/cm^2)	Current density (mA/cm^2)	Power (W)
This work	0.74	60	1.03	118	0.047
Electrochem Co. th	0.7	60	1.03	190	0.076
Paganin et al., 1996	0.4	80	1.1	1000	0.400
Passalacqua et al., 2001	0.1	70	0.24	780	0.312
Song et al., 2001	0.4	60	0.2-2.0	600	0.240

จากตารางที่ 4.7 แสดงการทำงานของเซลล์ที่ความต่างศักย์ 0.4 โวลต์ พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจากงานวิจัยให้สมรรถนะการทำงานต่ำกว่างานวิจัยอื่นเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงจากบริษัท Electrochem ซึ่งมีอุณหภูมิการทำงานและองค์ประกอบอื่นเท่ากัน แต่ความหนาแน่นกระแสต่ำกว่าอาจเนื่องมาจากสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาและขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค18) เมื่อพิจารณาเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิการทำงานเท่ากันแต่ประสิทธิภาพต่างกัน จึงสรุปได้ว่านอกจาก

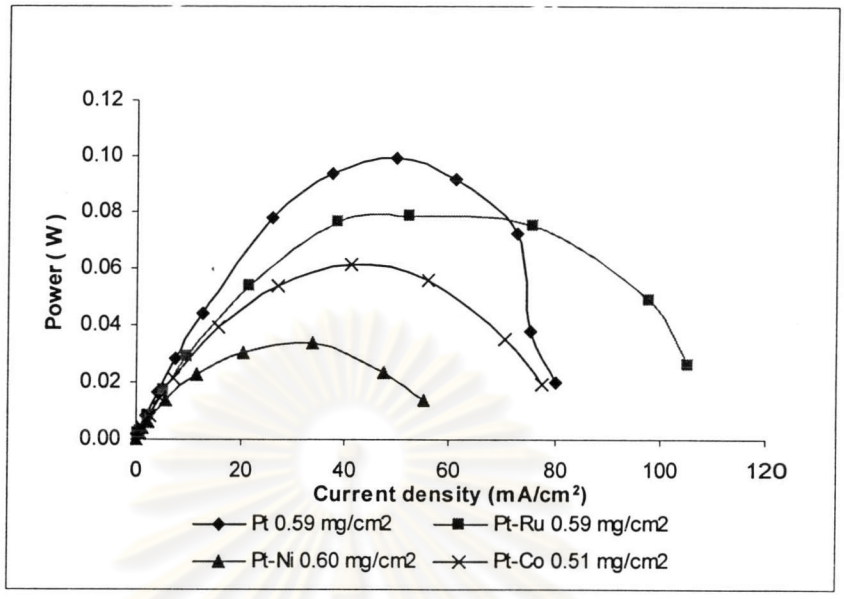
สมบัติของขั้วไฟฟ้าแล้วอุณหภูมิการทำงานของเซลล์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์และพบว่าปริมาณแพลทินัมที่ต่ำกว่ายังให้ความหนาแน่นกระแสสูงกว่า แสดงว่าการมีปริมาณของแพลทินัมสูงไม่จำเป็นที่การทำงานของเซลล์จะดี

➢ ขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์แพลทินัม

นอกจากขั้วไฟฟ้าแพลทินัมแล้วได้ทำการเตรียมขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์แพลทินัมเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์ โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm แก๊สทั้งสองชนิดผ่านระบบให้ความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เท่ากับ 60 °C และความดันบรรยากาศ ขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างแพลทินัมและรูทิเนียม (Pt-Ru/C) แพลทินัมและโคบอลท์ (Pt-Co/C) แพลทินัมและนิเกิล (Pt-Ni/C) โดยมีอัตราส่วนอะตอมของแพลทินัมกับโลหะผสมเท่ากับ 1:1 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสของขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์ชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์ชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและกำลังไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอัลลอยด์ชนิดต่างๆ

จากการศึกษาโพลาไรเซชันของขั้วไฟฟ้าโลหะผสมกับแพลทินัมในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนในรูปที่ 4.22 พบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากันประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจากมากไปน้อยเป็นดังนี้ Pt/C > Pt-Ru/C > Pt-Co/C > Pt-Ni/C เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ในรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.8 พบว่าสามารถเรียงกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Pt/C > Pt-Ru/C > Pt-Co/C > Pt-Ni/C

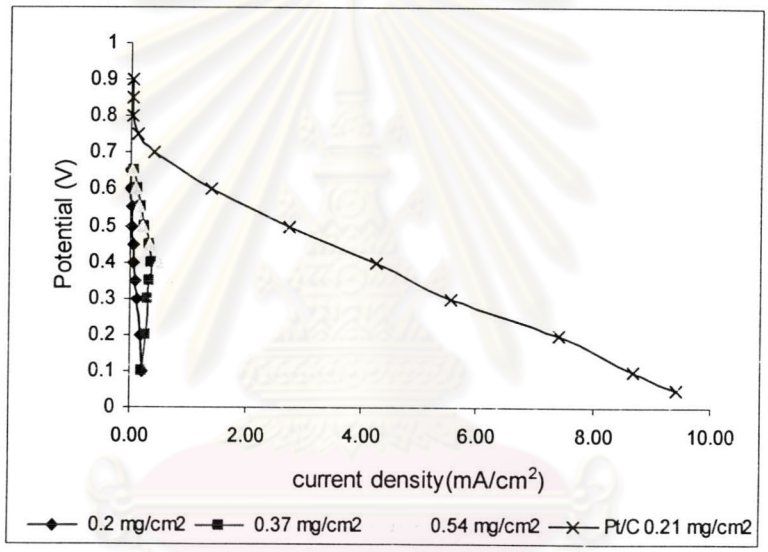
ตารางที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด

Electrode	Power (W)
Pt 0.59 mg/cm^2	0.100
Pt-Ru 0.59 mg/cm^2	0.080
Pt-Co 0.51 mg/cm^2	0.062
Pt-Ni 0.60 mg/cm^2	0.034

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าจากการเตรียมแบบพอกพูนด้วยไฟฟ้า

การทดลองเพื่อทำการวัดประสิทธิภาพการทำงานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมแบบพอกพูนด้วยไฟฟ้าอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแส โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 10 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 80 sccm แก๊สทั้งสองชนิดผ่านระบบให้ความชื้นก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงโดยมีค่าร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เท่ากับ 60 °C และความดันบรรยากาศ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้มีปริมาณแพลทินัม 0.54, 0.37 และ 0.20 mg/cm^2 ผลการทดลองแสดงในกราฟโพลาไรเซชันรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ที่ปริมาณแพลทินัมต่างๆ กัน

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของแพลทินัมมีค่าเพิ่มขึ้นความหนาแน่นกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาความหนาแน่นกระแสเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์โดยมีปริมาณแพลทินัม 0.21 mg/cm^2 พบว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพิมพ์นั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าหรืออาจจะกล่าวได้ว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยการพอกพูนด้วยไฟฟ้ายังไม่มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ทั้งนี้เนื่องตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยการพอกพูนด้วยไฟฟ้าไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับชั้นอิเล็กโทรไลต์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยาก ความหนาแน่นกระแสที่ได้จึงค่อนข้างต่ำ