การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียม/คาร์บอนโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตบนชั้นแพร่แก๊ส สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

นาย วิทวัส รัตนถาวร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF PtRu/C CATALYST LAYER USING INKJET PRINTING ON GAS DIFFUSION LAYER FOR PEM FUEL CELL

Mister Wittawat Ratanathavorn

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 2009
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียม/คาร์บอนโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตบนชั้นแพร่แก๊สสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
โดย	นาย วิทวัส รัตนถาวร
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. คุณากร ภู่จินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. คุณากร ภู่จินดา)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์)

วิทวัส รัตนถาวร: การเตรียมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียม/คาร์บอนโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตบนชั้นแพร่แก๊สสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. (PREPARATION OF PtRu/C CATALYST LAYER USING INKJET PRINTING ON GAS DIFFUSION LAYER FOR PEM FUEL CELL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร.คุณากร ภู่จินดา 103 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียม/คาร์บอนลงบนชั้นแพร่แก๊ส (GDL) สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ต โดยในงานวิจัยนี้สามารถเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติความหนืด 3.2 เซนติพอยส์ และแรงตึงผิวกับ 34 มิลลินิวตัน/เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับสมบัติหมึกพิมพ์ทางการค้าและศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) ที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม พบว่า MEA ที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดอยู่ที่ 537 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ จากนั้นศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมที่ร้อยละ 5, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้สมรรถนะสูงที่สุดคือ ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ความหนาแน่นกระแส ไฟฟ้า 253 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ 0.6 โวลต์ มากกว่าความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 40 โดยน้ำหนัก อยู่ร้อยละ 15.8 และ 45.5 ตามลำดับ จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพในการขยายขนาดเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ต โดยทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ (Array fuel cell) พบว่าวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตมีประสิทธิภาพดีในการขยายขนาดขั้วไฟฟ้าในขนาด 25 ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีความเบี่ยงเบนความหนาแน่นในแต่ละตำแหน่งเพียงร้อยละ 7.8 แต่ยังไม่เหมาะสมที่จะขยายขนาดขั้วไฟฟ้าขนาดเกิน 100 ตารางเซนติเมตร

ภาควิชา.........เคมีเทคนิค....... ลายมือชื่อนิสิต..
สาขาวิชา.......เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก................................
ปีการศึกษา....2552.....

5072466023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: PEM FUEL CELL / INKJET PRINTING / PtRu

WITTAWAT RATANATAVORN: PREPARATION OF PtRu/C CATALYST LAYER USING INKJET PRINTING ON GAS DIFFUSION LAYER FOR PEM FUEL CELL. THESIS ADVISOR: KUNAKORN POOCHINDA, Ph.D., 103 pp.

This research was carried out to develop the direct deposition of PtRu/C catalyst onto the gas diffusion layer by inkjet printing for PEM fuel cell. Our prepared catalyst ink had the viscosity about 3 cP and the surface tension about 34 mN/m, having comparable properties as the commercial black ink. The 5 cm^2 Pt/C MEA prepared by inkjet printing provided a current density as high as 537 mA/cm^2 at a cell voltage of 0.6 V, which was higher than those prepared by either painting or spraying. The concentration of PtRu catalyst was varied by 5%wt., 20%wt., and 40%wt. It was indicated that 20%wt. PtRu had the highest performance with 253 mA/cm^2 current density at 0.6V which was greater than that of 5%wt. and 40%wt. by 15.8% and 45.45%, respectively. Moreover, efficiency of MEA expansion using inkjet printing was analyzed in array fuel cell. It could be seen that inkjet printing was an appropriate method for 25 cm^2 MEA preparation because current density deviation for 25 points was only 7.8%. However, it was not a good method to prepare electrode over 100 cm^2.

Department:……...Chemical Technology… Student's Signature..

Field of Study:……Chemical Technology… Advisor's Signature...

Academic Year:…..2009…..

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.คุณากร ภู่จินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่านในกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูงและสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฏ

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 4

2.1.1 องค์ประกอบทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง 4

2.1.2 ชนิดและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 5

2.2 เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต

2.2.1 เทคโนโลยีการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต 12

2.2.2 ประเภทของหมึกพิมพ์ 13

2.2.3 ส่วนประกอบภายในเครื่องพิมพ์ 14

2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 19

2.3.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 19

2.3.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 20

2.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้า 23

2.4.1 การสเปรย์ 23

2.4.2 การระบาย 24

บทที่ หน้า

2.4.3 การพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต 25

2.5 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง 25

2.5.1 กราฟโพลาไรเซชัน 25

2.5.2 ความต้านทานเชิงซ้อน 29

2.5.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี 37

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 40

2.6.1 ปริมาณน้ำ 40

2.6.2 ความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ 41

2.6.3 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 42

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา 43

2.7.1 กลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา 43

2.7.2 การจำแนกระบบของตัวเร่งปฏิกิริยา 44

2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียม 45

2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 46

3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 48

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 48

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 48

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ 49

3.4 ตัวแปรที่ศึกษา 49

3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย 50

3.5.1 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C 50

3.5.2 การเตรียมตลับหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา 50

3.5.3 การเตรียมเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต 50

3.5.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ต 51

3.5.5 การปรับสภาพเยื่อแผ่นเนฟิออน 51

3.5.6 การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า 52

3.5.7 การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ 53

บทที่ หน้า

3.6 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง....54

3.6.1 การประกอบเป็นเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิง....54

3.6.2 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง....54

3.6.3 ขั้นตอนภายหลังการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง....57

4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง....58

4.1 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน....58

4.1.1 การหาสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้า....58

4.1.2 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา....59

4.1.3 อิทธิพลของเอทิลีนไกลคอลในหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา....61

4.2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนลงบนชั้นแพร่แก๊สโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ต....63

4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีต่างๆ....64

4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียม

4.4.1 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียม ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก....69

4.4.2 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียม ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก....72

4.4.3 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียม ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก....75

4.4.4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสม แพลทินัมรูทิเนียม....78

4.5 การทดสอบสมรรถนะในการขยายขนาดเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต....81

4.5.1 การทดสอบอิทธิพลของตำแหน่งที่มีผลต่อสมรรถนะในแต่ละช่องของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ (Array fuel cell)....82

4.5.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการขยายขนาดการผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีต่างๆ....85

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....90

5.1 สรุปผลการทดลอง....90

บทที่ หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ 91

รายการอ้างอิง....................92

ภาคผนวก... 96

ภาคผนวก ก 97

ภาคผนวก ข 98

ภาคผนวก ค....................101

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....................103

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ตารางเปรียบเทียบลักษณะการทำงานและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ 11

2.2 องค์ประกอบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า..34

4.1 สมบัติหมึกพิมพ์ทางการค้าของตลับหมึกพิมพ์รุ่น 28A ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 59

4.2 ส่วนประกอบและสมบัติของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา..60

4.3 จำนวนครั้งการพิมพ์และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น...64

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่ หน้า

2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ 7
2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก 8
2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 8
2.4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม 9
2.5 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง 10
2.6 ภาพส่วนประกอบของหัวพิมพ์ 14
2.7 มอเตอร์ควบคุมตำแหน่งหัวพิมพ์ 15
2.8 ลูกกลิ้งสำหรับดึงกระดาษเข้าเครื่องพิมพ์ 16
2.9 วงจรควบคุมการทำงานของเครื่องพิมพ์ 16
2.10 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 20
2.11 ตัวอย่างโครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน 21
2.12 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการสเปรย์ 24
2.13 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการระบาย 24
2.14 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต 25
2.15 โพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน 26
2.16 โพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อุณหภูมิในการทำงานแตกต่างกัน 28
2.17 โพลาไรเซชันแสดงการเปรียบเทียบค่าโพลาไรเซชันทางเคมี เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนต่าง ๆ 29
2.18 กราฟกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเคมีในเชิงทฤษฎี 30
2.19 Nyquist Plot และ Bode Plot 32
2.20 วงจรสมมูลของเซลล์ไฟฟ้าเคมี และการแยกย่อย Z_f เป็น R_s และ C_s หรือ R_{ct}และ Z_w 37
2.21 แผนภาพเครื่องมือสำหรับโวลแทมเมทรีแบบรอบ 38
2.22 ขั้วไฟฟ้าช่วย 38
2.23 ขั้วไฟฟ้าจุลภาค 39
2.24 ปรากฏการณ์ของน้ำที่เกิดขึ้นทุกกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน 40

ภาพประกอบที่ หน้า

2.25 ผลกระทบของการเพิ่มความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า....41
2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมเลกุลกับค่าพลังงาน
เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป....43
2.27 เส้นทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับ
ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา....44
2.28 กลไกการเกิดปฏิกิริยาความทนทานต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ของโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียม....45
3.1 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ....49
4.1 ลักษณะการพิมพ์ที่ขาดความต่อเนื่องของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาสูตรที่ 1....60
4.2 ลักษณะการพิมพ์อย่างต่อเนื่องของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาสูตรที่ 4....61
4.3 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า
ที่มีการสกัดแยกและไม่มีการสกัดแยกเอทิลีนไกลคอลออก....62
4.4 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบ
ขั้วไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการสกัดและไม่ผ่านกระบวนการสกัด....63
4.5 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า
ที่เตรียมโดยวิธีต่างๆ....65
4.6 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบ
ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีต่าง....66
4.7 กราฟ Impedence แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ....67
4.8 ภาพถ่ายด้านบนและด้านตัดขวางของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธี
ต่างๆกันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(ก) วิธีการทา (ข) วิธีการสเปรย์ (ค) วิธีการพิมพ์....68
4.9 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก....69
4.10 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบ
ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 5 โดย
น้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ....70

ภาพประกอบที่ หน้า

4.11 กราฟ Impedence แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ 71

4.12 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ 72

4.13 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ 73

4.14 กราฟ Impedence แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ 74

4.15 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ 75

4.16 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ 76

4.17 กราฟ Impedence แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ 77

4.18 โพราไรเซชั่นของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์เปรียบเทียบความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียม 78

4.19 กราฟแสดงขนาดช่องว่างกับการกระจายตัวของขนาดช่องว่างของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 79

4.20 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการพิมพ์ 80

ภาพประกอบที่ หน้า

4.21 กราฟ Impedence แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการพิมพ์....81
4.22 แสดงเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ....82
4.23 เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ....83
4.24 การกำหนดตำแหน่งทั้ง 25 ตำแหน่ง ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ.... 80
4.25 กราฟโพราไรเซชั่นของตำแหน่งทั้ง 25 ช่องในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ....84
4.26 กราฟโพราไรเซชั่นเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงแบบ แถวลำดับกับเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติมเตร 85
4.27 ตารางและกราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับตำแหน่งต่างๆ บน ขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีการทา....86
4.28 ตารางและกราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับตำแหน่งต่างๆ บน ขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์....87
4.29 ตารางและกราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับตำแหน่งต่างๆ บน ขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ 88
4.30 กราฟและตารางแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับตำแหน่งต่างๆ บนขั้วไฟฟ้าขนาด 100 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์....89
ข.1 ภาพถ่ายด้านบนของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทา....98
ข.2 ภาพถ่ายด้านตัดขวางของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทา....98
ข.3 ภาพถ่ายด้านบนของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์....99
ข.4 ภาพถ่ายด้านตัดขวางของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์....99
ข.5 ภาพถ่ายด้านบนของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์....100
ข.6 ภาพถ่ายด้านตัดขวางของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์....100
ค.1 กราฟ Niquist จากการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อน ที่ค่าความต่างศักย์ 0.7 โวลต์....101

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและภาวะโลกร้อนที่ทั่วโลกเผชิญ ทำให้เกิดการค้นหาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและช่วยลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานหนึ่งที่ได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้ทดแทนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและมีการดำเนินการที่ปราศจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจก โดยเซลล์เชื้อเพลิงทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมี (Chemical Energy) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยผลพลอยได้ของกระบวนการเป็นน้ำและความร้อนและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือแก๊สเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ

เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีรูพรุน 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Electrocatalyst) เกาะอยู่โดยสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือของแข็ง เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนหรือพีอีเอ็ม (PEM fuel cell) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีอุณหภูมิในการดำเนินการต่ำและใช้เวลาในการอุ่นเครื่องน้อยจึงเหมาะสำหรับเป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามการใช้เซลล์เชื้อเพลิงเป็นแหล่งผลิตพลังงานยังไม่แพร่หลายนัก เนื่องจากยังมีความท้าทายในด้านต่างๆทั้งในด้านเทคนิคและด้านเศรษฐศาสตร์เช่น การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพสูงและมีความคงทน โดยในปัจจุบันนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมซึ่งมีความว่องไวสูง แต่เมื่อดูดซับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์แม้ในปริมาณน้อยจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ จึงต้องใช้สารป้อนที่มีความบริสุทธิ์มาก ทำให้ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง หรือเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความทนคาร์บอนมอนอกไซด์สูงเช่นโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมแต่กลับมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่าแพลทินัม นอกจากนี้วิธีการพอกพูนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทั่วไปนิยมใช้วิธีการทาหรือการสเปรย์ ซึ่งทำให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับทักษะและความชำนาญของผู้ดำเนินการเป็นอย่างมาก จึงเป็นอุปสรรคต่อการขยายขนาดและกำลังการผลิต

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาการใช้เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตสำหรับการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนลงบนชั้นแพร่แก๊ส (GDL) เพื่อผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าหรือเอ็มอีเอ (MEA) เนื่องจากการพิมพ์อิงก์เจ็ตสามารถกำหนดรูปร่างชิ้นงานได้แน่นอน และยังควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าเทคนิคดั้งเดิม โดยศึกษาการเตรียมหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีสมบัติเช่น ความหนืด แรงตึงผิว ใกล้เคียงกับหมึกพิมพ์ทางการค้า และเปรียบเทียบสมรรถนะของเอ็มอีเอที่ได้จากการพิมพ์อิงก์เจ็ตกับการทาและการสเปรย์ภายใต้ภาวะเดียวกัน อีกทั้งเตรียมเอ็มอีเอขนาด 100 ตารางเซนติเมตร สำหรับทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ (Array fuel cell) ซึ่งใช้ศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะที่จุดต่างๆ บนเอ็มอีเอเพื่อทดสอบความสามารถในการขยายส่วนด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมลงบนชั้นแพร่แก๊สโดยวิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต
2. เปรียบเทียบสมรรถนะของเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนที่เตรียมได้จากวิธีการพิมพ์กับการเตรียมโดยวิธีการทาด้วยแปรงและวิธีการสเปรย์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมโดยการพิมพ์อิงก์เจ็ตที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง
2. ได้วิธีพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับการขยายส่วนเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากตำรา ห้องสมุด อินเทอร์เนต ฯลฯ

- หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต ขนาดหัวพิมพ์ สมบัติของหมึกพิมพ์ เช่น แรงตึงผิว ความหนืด และขนาดอนุภาค
- งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต

- งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดลองที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ (Array Fuel cell)
- วิธีการใช้เครื่องมือต่างๆ เช่น SEM TEM เป็นต้น

2. จัดซื้อเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต เซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ และอุปกรณ์ที่จำเป็น
3. เตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม/คาร์บอนให้มีสมบัติใกล้เคียงกับหมึกพิมพ์ทางการค้า
4. ทดลองพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตลงบนขั้วไฟฟ้า และทดสอบสมบัติของขั้วไฟฟ้าโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิง เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการพิมพ์
5. ทดสอบเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ในเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติเมตรเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกับการเตรียมวิธีอื่นได้แก่ การพิมพ์และการสเปรย์
6. เตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียม ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 20 และ 40 ด้วยวิธีการพิมพ์และการสเปรย์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติเมตร เพื่อทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะ
7. ประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับกับหน่วยรับข้อมูลเซลล์เชื้อเพลิงและทดสอบสมรรถนะของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ขยายขนาดเป็น 25 และ 100 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมได้จากการพิมพ์อิงก์เจ็ตเปรียบเทียบกับที่เตรียมได้ด้วยวิธีอื่น
8. วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง [1,2]

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) คือ เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดหนึ่งที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนพลังงานเคมี (Chemical energy) ไปเป็นกระแสไฟฟ้า โดยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) สามารถเกิดขึ้นได้โดยตรงโดยไม่ผ่านเส้นทางของกระบวนการเผาไหม้ จึงมีการทำงานคล้ายกับแบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีรูพรุน 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดและมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Electrocatalyst) เกาะอยู่โดยสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือของแข็งและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตราบที่มีการป้อนเชื้อเพลิงในรูปของเหลวหรือแก๊สเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ

ที่มาของปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีการรายงานครั้งแรกในปี ค.ศ.1839 โดยศาสตราจารย์คริสเตียน เฟรเดอริก เชอนบาย (Christian Friedrich Schoenbein) ว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และลวดแพลทินัม อีก 1 เดือนต่อมาเซอร์วิลเลียม โกรว์ฟ (Sir William Grove) รายงานถึงแบตเตอรี่ที่ใช้แพลทินัม และสังกะสี เมื่อใช้กรดซัลฟูริกและกรดไนตริก (HNO_3) เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งถือว่าเป็นเซลล์เชื้อเพลิงเครื่องแรกในโลก ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 65-80

2.1.1 องค์ประกอบทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง [3]

เซลล์เชื้อเพลิงจะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 7 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่

1. ขั้วแอโนด (Anode) เป็นขั้วลบ มีหน้าที่ส่งอิเล็กตรอนออกจากขั้วไปยังขั้วแคโทด
2. ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วบวก ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนกลับมาจากวงจรภายนอก
3. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของไอออน โดยอิเล็กโทรไลต์ที่ดีต้องสามารถถ่ายโอนประจุได้ดี และไม่นำกระแส

ไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญมาก โดยทั่วไปอิเล็กโทรไลต์จะเป็นสารจำพวก กรด เบส หรือเกลือ และสามารถแบ่งตามสถานะได้ 2 ประเภท คือ อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง และอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว

4. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Electrocatalyst) เป็นสารที่ช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ที่ขั้วอิเล็กโทรดเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีจะต้องไม่มีการเปลี่ยนสภาพหรือถูกใช้จนหมดไปในปฏิกิริยา
5. ชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion layer) เป็นส่วนที่ช่วยให้แก๊สเชื้อเพลิง และตัวออกซิไดซ์แพร่กระจายได้ดีและสม่ำเสมอ เป็นการเพิ่มการถ่ายเทมวลสารของแก๊สที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับผิวหน้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer) โดยชั้นแพร่แก๊สมักทำจากวัสดุที่มีส่วนที่ไม่ชอบน้ำ มีความเป็นรูพรุนสูง และมีความสามารถในการนำอิเล็กตรอนได้ดี
6. แผ่นช่องการไหลของแก๊ส (Flow field plate) โดยปกติจะทำด้วยแกรไฟต์ (Graphite) มีลักษณะเป็นร่องเพื่อเป็นช่องการไหลของแก๊สเพื่อช่วยให้เกิดการกระจายตัวของแก๊สที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดอย่างทั่วถึง โดยทั่วไปมีช่องการไหลอยู่ 2 ชนิด คือ แบบขนานและแบบคดเคี้ยว โดยวัสดุที่นำมาใช้จะต้องมีสมบัติในการนำอิเล็กตรอนและความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนและสามารถทนต่อภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
7. วัสดุกันรั่ว (Seal) ใช้สำหรับป้องกันเชื้อเพลิงรั่วออกจากเซลล์เชื้อเพลิง

2.1.2 ชนิดและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [4]

หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกัน คือ ภายในของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีความพรุนด้านแอโนดและขั้วไฟฟ้าที่มีความพรุนด้านแคโทด สารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของของเหลวหรือของแข็งที่สัมผัสอยู่กับขั้วไฟฟ้า แก๊สเชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สธรรมชาติหรือแก๊สไฮโดรเจนและตัวออกซิไดซ์จะถูกป้อนเข้าที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ตามลำดับ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณส่วนสัมผัสกันของแก๊สเชื้อเพลิง สารอิเล็กโทรไลต์ และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ที่ขั้วแอโนด ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอออนโปรตอนและอิเล็กตรอน ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของตัวออกซิไดซ์ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่

ส่งผ่านจากขั้วแอโนดและไอออนของโปรตอนรวมตัวเกิดเป็นน้ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา คือ กระแสไฟฟ้า น้ำ และความร้อน โดยแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ผลิตขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานอิสระกิบบ์ (Gibb's free energy) ของเชื้อเพลิง ความว่องไว (Activity) ของสารตั้งต้น ตลอดจนกระแสไฟฟ้าที่ถูกดึงออก การประยุกต์การใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงส่วนใหญ่มักต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสลับ (Alternating current power หรือ AC) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าตรงที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงโดยตรง จึงต้องถูกนำมาเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เครื่องอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

การแบ่งชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น โดยแบ่งตามชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ (Alkaline Fuel cell, AFC) ใช้อิเล็กโทรไลต์ คือ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นตัวออกซิไดซ์และแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงเท่านั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินการนั้นอยู่ในช่วง 50-200 องศาเซลเซียส เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานด้านอวกาศ หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด

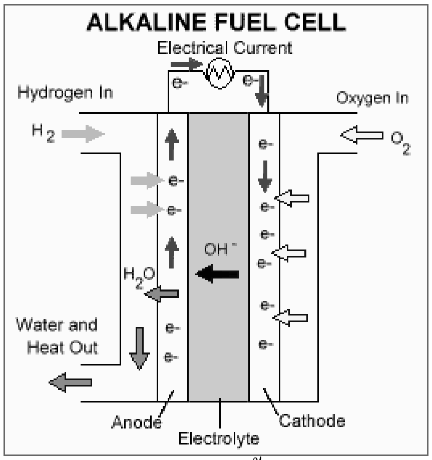
$$2H_2(g) + 4OH^-(l) \rightarrow 4H_2O(l) + 4e^- \tag{2.1}$$

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

$$O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^- \rightarrow 4OH^-(aq) \tag{2.2}$$

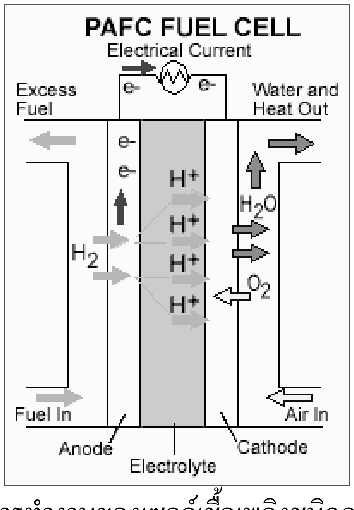
ปฏิกิริยารวม

$$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(l) \tag{2.3}$$



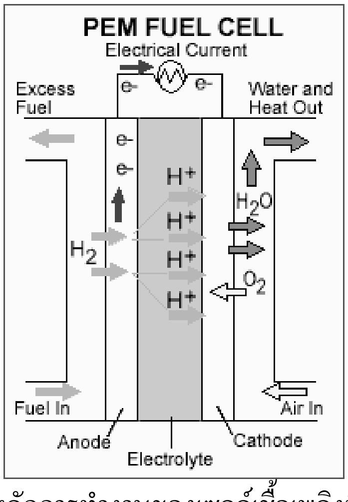
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ [5]

2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) ใช้อิเล็กโทรไลต์ คือ กรดฟอสฟอริก สามารถทนต่อแก๊สเจือปนได้มากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์ แต่ก็ยังใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ อุณหภูมิในการดำเนินการอยู่ที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส ปัญหาที่พบในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ คือ การกัดกร่อนของกรดในขณะดำเนินการ และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สไฮโดรเจนดังสมการที่ (2.1) และเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดดังสมการที่ (2.2) โดยปฏิกิริยารวมเป็นดังสมการที่ (2.3) ปัจจุบันได้มีการใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว โดยมีขนาดกำลังไฟฟ้า ประมาณ 200 กิโลวัตต์



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก [5]

3. เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้จะเป็นเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาการกัดกร่อนที่เกิดจากของเหลวอิเล็กโทรไลต์ เพราะของเหลวที่อยู่ภายในเซลล์ คือ น้ำที่เกิดจากการดำเนินการ เซลล์ชนิดนี้ใช้อุณหภูมิในการดำเนินการไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา ไม่ทนทานต่อสิ่งเจือปนในแก๊สเชื้อเพลิง เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ที่ต้องเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.2



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [5]

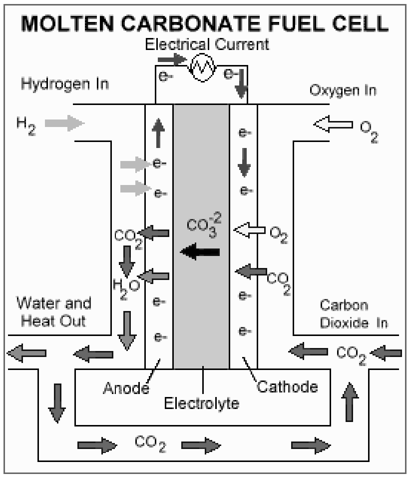
4. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นพวกเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลวของโซเดียมและโพแทสเซียมในเซรามิกเมตริกของลิเทียมอลูมิเนต ($LiAlO_2$) ที่มีลักษณะเป็นของเหลวและมีความสามารถในการนำไอออนได้ดี มีการดำเนินการที่อุณหภูมิสูง คือ ประมาณ 650 องศาเซลเซียส จึงพบมีปัญหาการกัดกร่อนค่อนข้างมาก เชื้อเพลิงที่ใช้ได้แก่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้นิยมใช้เป็นโรงไฟฟ้าขนาดเมกกะวัตต์ จึงจะเหมาะสมกับประสิทธิภาพการทำงาน เนื่องจากระบบที่ใช้ค่อนข้างซับซ้อน หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอมเหลว แสดงดังรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด

$$H_2(g) + CO_3^{2-} \rightarrow CO_2(g) + H_2O + 2e^- \tag{2.4}$$

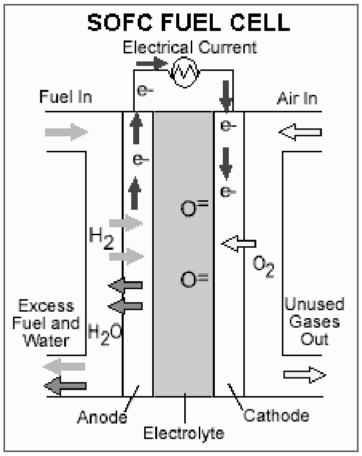
ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

$$1/2O_2(g) + CO_2(g) + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-} \tag{2.5}$$



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม [5]

5. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารเซรามิกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสารที่ใช้มากคือสารประกอบของเซอร์โคเนีย โดยจะมีความสามารถในการนำไอออนที่อุณหภูมิสูง มีอุณหภูมิในการดำเนินการสูงประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับการออกแบบและสารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ได้รับความสนใจในการนำมาพัฒนาในการผลิตไฟฟ้าเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากมีภาวะการทำงานที่สูง ทนต่อสารกำมะถันและสิ่งเจือปนในสารตั้งต้นเช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอม สารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ และออกซิเจนในอากาศนำมาใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ได้ และความร้อนที่เกิดจากกระบวนการสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์ของแข็ง [5]

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด

$$aH_2(g) + bCO(g) + (a+b)O^{2-} \rightarrow aH_2O(g) + bCO_2(g) + 2(a+b)e^- \qquad (2.6)$$

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

$$1/2(a+b)O_2(g) + 2(a+b)e^- \rightarrow (a+b)O^{2-} \qquad (2.7)$$

ปฏิกิริยารวม

$$aH_2(g) + 1/2(a+b)O_2(g) + bCO(g) \rightarrow aH_2O(g) + bCO_2(g) \qquad (2.8)$$

จะเห็นว่าโดยทั่วไปลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ จะคล้ายคลึงกัน จะแตกต่างกันที่ชนิดของเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ ช่วงอุณหภูมิในการดำเนินงานและชนิดของไอออนที่เคลื่อนที่ (Mobile ion) เพื่อการนำไปใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบลักษณะการทำงานและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ [6]

ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง	ไอออนที่เคลื่อนที่	อุณหภูมิในการใช้งาน (องศาเซลเซียส)	ลักษณะการใช้งาน
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดแอลคาไลน์	OH^-	50-200	ใช้ในยานอวกาศ เช่น ยานอพอลโล กระสวยอวกาศ
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก	H^+	~200	ใช้ในระบบ CHP ขนาด200 kW
เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม	H^+	50-120	ใช้ในยานพาหนะ อุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่และระบบ CHP ขนาดเล็ก
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอมเหลว	CO_3^{2-}	~650	เหมาะสำหรับระบบ CHP ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่
เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	O^{2-}	500-1000	เหมาะสำหรับระบบ CHP ทุกขนาด (2 kW-multi kW)

* CHP = Combined heat and power

2.2 เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต [7]

เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสำนักงานหรือในบ้านเรือนจะมีขนาดเล็ก ใช้งานสะดวกและมีราคาถูก อีกทั้งความนิยมในการถ่ายภาพก็เริ่มเข้ามามีบทบาทต่อชีวิต ซึ่งเป็นผลให้เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตได้รับความนิยมมากขึ้นตามไปด้วย เครื่องพิมพ์แบบอิงก์เจ็ตเริ่มแพร่หลายตั้งแต่ปี 1980 โดยหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์ประเภทนี้จะใช้หลักการพ่นน้ำหมึกออกมาเพื่อให้เกิดภาพหรือตัวอักษร ตลับหมึกพิมพ์ของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตจะมีตั้งแต่ 2 ตลับ (Black, C-M-

Y), 4 ตลับ (Black, Cyan, Magenta, Yellow), 7 ตลับ (Black, Cyan, Magenta, Yellow, Light Cyan, Light Magenta, Light Yellow) ยิ่งมีจำนวนสีของหมึกพิมพ์มากยิ่งจะทำให้ภาพที่ได้จากการผสมสีของน้ำหมึกมีความสมจริง ดูเป็นธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบันมีบริษัทยักษ์ใหญ่ที่ผลิตเพื่อการตลาด เช่น Canon, Hewlett Packard, Epson, และ Lexmark

2.2.1 เทคโนโลยีการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต

แบบควบคุมการหยด (Drop on demand)

ใช้หลักการพ่นน้ำหมึกผ่านหลอดฉีดเล็กๆ ซึ่งหลอดฉีดนี้จะถูกควบคุมโดยไฟฟ้า หลอดฉีดเล็กๆนี้จะเรียงตัวกันเป็นแถวคล้ายหัวพิมพ์แบบจุด เมื่อได้รับคำสั่งตัวอักษรมาหลอดฉีดเล็กๆ เหล่านี้จะพ่นหมึกออกมาทีละคอลัมน์ จนครบบรรทัด

แบบหยดต่อเนื่อง (Continuous stream)

หัวพิมพ์เครื่องพิมพ์จะพ่นน้ำหมึกออกมาอย่างต่อเนื่อง และมีแผ่นอิเล็กโทรดไว้ควบคุมทิศทางการเดินของหมึกอีกชั้นหนึ่ง เพื่อให้หมึกที่พ่นออกมาวาดรูปเป็นตัวอักษรตามต้องการ โดยเทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตประเภทใช้ความร้อน (Thermal Inkjet)

ผู้ผลิตคือ Canon, Hewlett Packard, และ Lexmark ดำเนินการพิมพ์โดยใช้ตลับหมึกพิมพ์ที่มีช่องที่ประกอบด้วยแผงวงจรให้ความร้อนขนาดเล็กติดตั้งไว้ที่ตลับ การทำงานของเครื่องพิมพ์ประเภทนี้คือการผ่านกระแสไฟฟ้าเป็นจังหวะเข้าไปในวงจรเพื่อให้เกิดความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ของเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะกลายเป็นไอและทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น เมื่อฟองอากาศขยายตัวขึ้นจะไปผลักดันหยดหมึกพิมพ์ลงสู่กระดาษโดยผ่านช่องของหัวพิมพ์ เมื่อหยดหมึกถูกพ่นออกจากหัวพิมพ์จะเกิดแรงดูดทำให้หมึกพิมพ์ที่อยู่ในช่องสำรองหมึกถูกดึงเข้ามาแทนที่ ปกติแล้วเครื่องพิมพ์ประเภทนี้จะมีรูหัวพิมพ์ประมาณ 300-600 ช่อง

2. เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตประเภทใช้แรงดัน (Piezoelectric inkjet)

เป็นเทคโนโลยีที่มีใช้ในเฉพาะเครื่องพิมพ์ของบริษัท Epson เท่านั้น ลักษณะการทำงานของระบบนี้จะแตกต่างจากระบบเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตชนิดใช้ความร้อนโดยสิ้นเชิง เพราะระบบนี้จะให้กระแสไฟฟ้าผ่านไปยังแผ่น Crystal ทำให้แผ่น Crystal เกิดการขยาย

และสั่นตัว ซึ่งจะทำให้น้ำหมึกที่อยู่ด้านบนในถังเก็บหมึกพิมพ์จะพ่นหมึกพิมพ์ออกทางหัวพ่นหมึก ขนาดของหยดหมึกสามารถกำหนดได้โดยการผ่านกระแสไฟให้เกิดการสั่นของ Crystal ถ้าเกิดการสั่นเบาขนาดของหยดหมึกก็จะมีขนาดเล็ก ถ้าการสั่นเกิดขึ้นมากขนาดของหยดหมึกจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งหลักการทำงานนี้ทำให้เครื่องพิมพ์ประเภทนี้สามารถพิมพ์งานที่มีความละเอียดสูงและมีความสามารถในการพิมพ์ที่รวดเร็วกว่า

2.2.2 ประเภทของหมึกพิมพ์

หมึกพิมพ์ที่ใช้สำหรับเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตนั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท การแบ่งประเภทของอิงก์เจ็ตจะแบ่งตามประเภทหมึกพิมพ์ที่ใช้ด้วย

1. Liquid Inkjet

ใช้หมึกที่เป็นน้ำ มีแม่สี 4 สี C Y M K โดยจะมีหมึกสองอย่างคือ หมึกพิมพ์แบบ Dye หมึกพิมพ์แบบ Pigment และหมึกพิมพ์แบบ Solid Ink พรินเตอร์อิงก์เจ็ตราคาประหยัดโดยทั่วไปจะใช้หมึกพิมพ์แบบ Dye เพราะละลายได้ง่ายกว่าหมึกพิมพ์แบบ Pigment ให้ระดับสีที่กว้างกว่า เหมาะสำหรับงานทั่วไป แต่หมึกพิมพ์แบบ Pigment นั้นจะให้ภาพที่มีความคงทนมากกว่า ซึ่งทาง EPSON ได้พัฒนาหมึก โดยใช้หมึกพิมพ์ DuraBrite ซึ่งถูกพัฒนาให้มีระดับที่กว้างกว่าและมีความคงทนกว่า

2. Dye Sublimation

หมึกชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ ของสี 3 สี CYM ส่วนสีดำ เกิดจากการผสมของ 3 สี งานพิมพ์ที่ได้จากเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตประเภทที่ใช้ Dye Sub ถือว่าเป็นงานพิมพ์ระดับมืออาชีพ ต้นทุนค่าหมึกและค่าเครื่องของพรินเตอร์อิงค์เจ็ตประเภทนี้มีราคาสูง

3. Solid Ink-jet

หมึกพิมพ์ชนิดนี้ไม่เหมาะกับงานพิมพ์ภาพถ่าย แต่เหมาะสำหรับการพิมพ์เอกสารเพื่อการตรวจ

2.2.3 ส่วนประกอบภายในเครื่องพิมพ์

2.2.4.1. ส่วนประกอบของหัวพิมพ์

1. หัวพิมพ์

เป็นส่วนหลักของเครื่องพิมพ์ จะบรรจุชุดของหัวฉีดที่ใช้พ่นหยดหมึก

รูปที่ 2.6 ภาพส่วนประกอบของหัวพิมพ์

2. ที่ใส่ตลับหมึก

ตลับหมึกจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามแต่บริษัทผู้ผลิตและรุ่นของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต และมีการแยกตลับหมึกสีดำและตลับหมึกสีออกจากกัน

3. มอเตอร์ควบคุมตำแหน่งหัวพิมพ์

เป็นส่วนที่ทำให้หัวพิมพ์เคลื่อนที่สลับไปมาทั่วทั้งกระดาษ เครื่องพิมพ์บางรุ่นจะมีมอเตอร์ควบคุมตำแหน่งเป็นที่พักหัวพิมพ์เมื่อไม่ได้ใช้งาน และใช้ควบคุมหัวพิมพ์เมื่อหัวพิมพ์เคลื่อนที่ผิดปกติ คล้ายกับห้ามล้อในรถยนต์

รูปที่ 2.7 มอเตอร์ควบคุมตำแหน่งหัวพิมพ์

2.2.4.2. ส่วนประกอบของส่วนที่ป้อนกระดาษ

1. ถาดใส่กระดาษ

เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตทุกเครื่องจะมีถาดใส่กระดาษเพื่อป้อนกระดาษเข้าไปยังเครื่องพิมพ์ โดยทั่วไปแล้วถาดใส่กระดาษจะไม่สามารถบรรจุกระดาษในปริมาณมาก

2. ลูกกลิ้ง

เป็นส่วนที่ใช้ดึงกระดาษจากถาดใส่กระดาษให้เคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องพิมพ์

รูปที่ 2.8 ลูกกลิ้งสำหรับดึงกระดาษเข้าเครื่องพิมพ์

2.2.4.3. เครื่องจ่ายไฟ

เครื่องพิมพ์ในช่วงแรกๆจะมีหม้อแปลงแยกออกมาภายนอกเครื่องพิมพ์ที่ขายในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่จะรวมเครื่องจ่ายไฟไว้ในเครื่อง

2.2.4.4. วงจรควบคุม

มีขนาดเล็กจะควบคุมกลไกจักรกลและถอดรหัสที่เครื่องคอมพิวเตอร์ส่งมายังเครื่องพิมพ์

รูปที่ 2.9 วงจรควบคุมการทำงานของเครื่องพิมพ์

รายละเอียดการทำงานในแต่ละส่วน

1. F/W ROM (Firmware ROM)

เป็นหน่วยความจำที่เก็บคำสั่งต่างๆ ของโปรแกรมควบคุมเปรียบเสมือน BIOS ในเครื่องคอมพิวเตอร์นั่นเอง โดยการทำงานจะเริ่มต้นเมื่อเปิดเครื่อง (Power on) วงจรในส่วนของ CPU จะทำให้มีการ JUMP มาที่แอตเดรส เริ่มต้นของโปรแกรมใน ROM จากนั้นก็จะอ่านคำสั่งจาก F/W มาทำตามขั้นตอนต่างๆ ต่อไป เช่น การตรวจสอบ RAM F/W CG ROM แผงควบคุม รีเซทหัวพิมพ์ ตรวจสอบกระดาษ เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนนี้ เราเรียกว่าการเตรียมพร้อมของเครื่อง(Initial status) จะเป็นขั้นตอนในการตรวจสอบส่วนต่างๆ ของเครื่องว่าพร้อมที่จะทำงานต่อไปหรือไม่ ถ้ามีสิ่งใดผิดปกติ ก็อาจจะมีการแสดง Error Code ออกมา ทำให้ทราบถึงความผิดปกตินั้นๆ

2. CG ROM (Character Generator)

เป็นหน่วยความจำที่เก็บรูปแบบของตัวอักษรแบบต่างๆ (Fonts) ที่ได้ถูกออกแบบมาพร้อมกับเครื่องเรียบร้อยแล้วซึ่งในการพิมพ์อักษรแต่ละตัว CPU ก็จะดึงเอารูปแบบของตัวอักษรมาจาก CG ROM นั้นเอง ROM ที่มักจะนำมาใช้เก็บ F/W และ CG มักจะเป็นเบอร์ตระกูล 27XXX เช่น 2764,27256, 27512, 27101 เป็นต้น แต่ก็อาจจะมี ROM รูปแบบใหม่ๆ ที่เป็น IC แบบ SMD (Surface Mount Device) เช่น เบอร์ 27C1001 เป็นต้น

RAM และการทำงานในลักษณะต่างๆ

RAM ในเครื่องพิมพ์แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ย่อยๆ ตามฟังก์ชั่นดังนี้

Firmware work area เป็นส่วนของ RAM ที่ทำหน้าที่เป็นพื้นที่สำหรับ Process ข้อมูลบางอย่างของโปรมแกรม F/W

Receiving buffer เป็นส่วนของพื้นที่ที่จะเก็บข้อมูลชั่วคราวที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการ Process ต่อไปถ้าพื้นที่ในส่วนนี้มีมาก การส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ก็จะทำได้ครั้งละมากๆ ทำให้คอมพิวเตอร์ประหยัดเวลาไม่ต้องรอนาน สามารถไปทำงานอย่างอื่นๆ ต่อไปได้

Image Buffer เป็นส่วนของพื้นที่ที่เก็บข้อมูลที่พร้อมจะทำการพิมพ์ โดยเก็บข้อมูลเป็น "bit pattern"

Download area เป็นส่วนของพื้นที่ที่เก็บอักขระพิเศษที่ถูกทำการโหลดจากคอมพิวเตอร์ลงไป เช่น อักษรภาษาไทยหรือ อักษรพิเศษต่างๆ ที่ Font ในเครื่องไม่มีให้ เป็นต้น

แผงควบคุม (Control panel)

แผงควบคุม เป็นอินพุทที่สามารถสั่งงานเครื่องพิมพ์ให้ทำงานตามที่สั่งได้ เช่น เลื่อนกระดาษ(Feed) เซ็ทอัพ พารามิเตอร์ สั่งให้พร้อมจะรับข้อมูล (Select on) เลือกชนิดของตัวอักษร เป็นต้น

ลักษณะการทำงานจะเป็นดังนี้ อินพุทแต่ละตัว (ปุ่มแต่ละปุ่ม) จะเปรียบเสมือน พอร์ท (port)ของ CPU จะสามารถรับรู้ได้ (detected) ว่า สภาวะของพอร์ทนั้นๆ ได้เปลี่ยนไป จากการตรวจจับได้นี้ CPU ก็จะทราบว่า ถ้าพอร์ทนั้นๆ ได้เปลี่ยนไป CPU ก็จะไปนำคำสั่งต่างๆ เพื่อให้ได้ผลตามที่เรากดปุ่มขณะเดียวกันที่เรากดปุ่ม แผงควบคุม LED จะสว่าง หรือดับโดยการควบคุมจาก คำสั่ง memorywrite จาก CPU สำหรับปุ่ม Select Feed Print Style จะใช้คำสั่งRead จาก CPU ในการตรวจเช็ค

ส่วนตรวจสอบกระดาษ (Paper Sensor Circuit)

ส่วนของการตรวจสอบว่ามีกระดาษป้อนอยู่หรือไม่ก็นับได้ว่าเป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญ เพราะถ้าไม่มีกระดาษป้อนเข้ามา แต่เครื่องไม่ทราบและยังทำงานต่อไปได้ ก็จะเกิดความเสียหายต่อตัวเครื่องและหัวพิมพ์ได้ดังนั้นในส่วนนี้ก็จะเป็นส่วนควบคุมอีกส่วนหนึ่งในการที่จะอนุญาต ให้เครื่องสามารถทำงานได้ตามปกติได้หรือไม่ คือ ถ้ามีกระดาษก็จะทำงานได้ แต่ถ้าไม่มีกระดาษเครื่องจะหยุดทำงานและรอจนกว่าจะมีกระดาษป้อนเข้ามา

ระบบทั่วไปที่ใช้ในการตรวจจับกระดาษว่ามีหรือไม่ มีอยู่ 2 ระบบด้วยกันคือ

1. สวิทต์ธรรมดา เป็นตัวตรวจจับเมื่อกระดาษถูกสอดเข้ามา กระดาษจะดันให้switch ทำงาน CPU ก็จะตรวจจับได้ว่าขณะนี้มีกระดาษสอดเข้ามาแล้ว CPU จะได้ดำเนินการในขั้นอื่นต่อไป
2. ตัวอุปกรณ์ที่ใช้แสงควบคุม (Photo interrupter)

การตรวจเช็คความร้อนของหัวพิมพ์

เครื่องพิมพ์บางรุ่นถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานหนัก ดังนั้นจึงมีระบบช่วยป้องกันการเสียหายของหัวพิมพ์ก่อนหมดอายุอันควร นั่นก็คือการตรวจเช็คว่าหัวพิมพ์ทำงานหนักเกินไปหรือไม่ ถ้าเครื่องพิมพ์ทำงานหนักเกินก็อาจจะออกแบบให้หยุดหัวพิมพ์ชั่วคราว หรือพิมพ์ช้าลง หรือพิมพ์ทางเดียว เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้จะช่วยยืดอายุการใช้งานหัวพิมพ์ออกไปได้ หลักการก็คือ เมื่อหัวพิมพ์ทำงานหนักๆ ก็จะเกิดความร้อนขึ้นถ้าพิมพ์งานนานๆ ก็จะร้อนมากขึ้น เมื่อร้อนถึงระดับหนึ่งที่ถูกเซตไว้ว่า หรือให้ทำอย่างใดอาจจะเกิดอันตรายต่อหัวพิมพ์ เครื่องจะสั่งให้หยุดพิมพ์ หรือให้ทำอย่างใดอย่างหนึ่งข้างต้น

2.3 เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะเป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นแผ่นพอลิเมอร์บางๆสำหรับการเป็นตัวกลางในการส่งผ่านโปรตอน ภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนนั้น จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 50-120 องศาเซลเซียส และช่วงความดันประมาณ 1-2 บรรยากาศ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วชั้นที่มีความพรุนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาพอกพูนอยู่และประกบเข้ากับพอลิเมอร์ของแข็งที่มีลักษณะเป็นแผ่น (ซัลโฟเนทพอลีเตตระฟลูออโรเอทีลีน) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ เมื่อกระบวนการเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้นน้ำที่เกิดจากกระบวนการจะถูกกำจัดออกมาพร้อมแก๊สทางด้านแคโทด ส่วนความร้อนที่เกิดจะถูกระบายออกโดยระบบหล่อเย็น ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งถ่ายโปรตอนและความชื้นในเยื่อแผ่น เนื่องจากกระบวนการนำไอออนบนเยื่อแผ่นจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อเยื่อแผ่นมีความชื้น

2.3.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนคือการป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าทางด้านขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อแก๊สสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) แตกตัวได้เป็นอิเล็กตรอนและโปรตอนไอออน ดังสมการที่ (2.9) อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะวิ่งตามตัวนำไฟฟ้าภายนอกเพื่อไปยังขั้วแคโทดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ในขณะเดียวกันโปรตอนก็จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์มายังขั้วแคโทด ที่มีการป้อนแก๊สออกซิเจนเข้ามา เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ระหว่างโปรตอนไอออน แก๊สออกซิเจนและอิเล็กตรอน แสดงในรูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ น้ำ ดังสมการที่ (2.10) โดยปฏิกิริยารวม แสดงดังสมการที่ (2.11)

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด

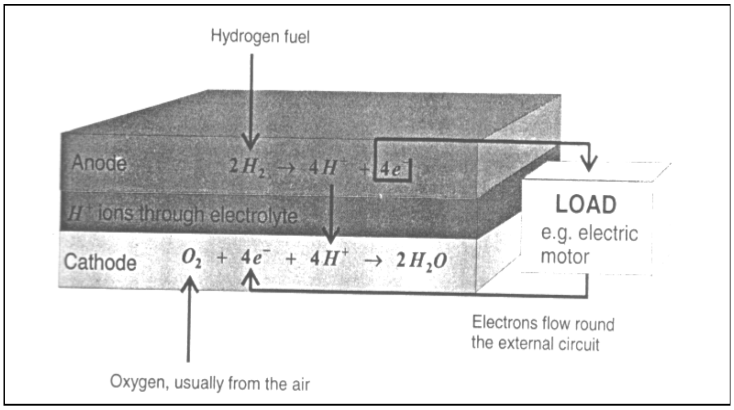
$$2H_2(g) \rightarrow 4H^+(aq) + 4e^- \tag{2.9}$$

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

$$O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^- \rightarrow 2H_2O(l) \tag{2.10}$$

ปฏิกิริยารวม

$$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(l) \quad (2.11)$$



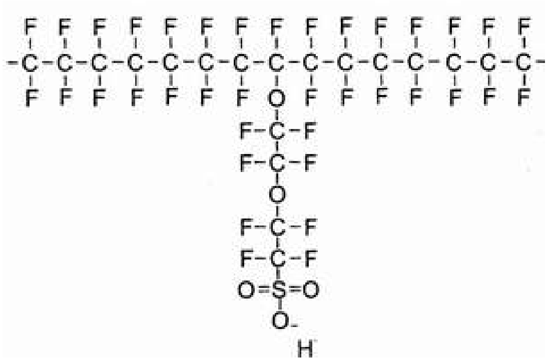
รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม [8]

2.3.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็มได้แก่ หน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า (Membrane electrode assembly, MEA) ซึ่งประกอบด้วยเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนและขั้วไฟฟ้า ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. อิเล็กโทรไลต์ [6,9]

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านโปรตอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ทำให้เซลล์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนของเยื่อแผ่นพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ที่ประกบติดกับขั้วไฟฟ้า เมื่อเยื่อแผ่นอิเล็กโทรไลต์ดูดซับน้ำก็จะเกิดการแตกตัวโดยไอออนลบที่เกิดขึ้นจะอยู่บนเมทริกซ์ของเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโปรตอนบนเยื่อแผ่นได้ เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีโครงสร้างหลักเป็นสารพอลิเมอร์จำพวกซัลโฟเนตฟลูออโรพอลิเมอร์ (Sulphonated fluoropolymers) หรือฟลูออโรเอทิลีน (Fluoroethylene) ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างโครงสร้างของซัลโฟเนต ฟลูออโรเอทิลีน [6]

จากโครงสร้างจะเห็นว่าพันธะระหว่างฟลูออรีนกับคาร์บอน ซึ่งความแข็งแรงของพันธะดังกล่าวทำให้พอลิเมอร์มีความทนทานต่อสารเคมีและภาวะการทำงาน จากโครงสร้างพบว่าโมเลกุลของกรดซัลโฟนิกที่สร้างพันธะที่ปลายของพอลิเมอร์กลายเป็นหมู่ SO_3^- ใน ส่วนปลายช่วงนี้เป็นช่วงที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีความสามารถในการดูดซึมโมเลกุลของน้ำไว้ โดยบริเวณที่ดูดซึมน้ำจะมีความแข็งแรงของพันธะในการยึดกันของหมู่ SO_3^- กับ H^+ อ่อน จึงทำให้ H^+ สามารถเคลื่อนที่ในเยื่อแผ่นได้ สมบัติของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ดีมีดังนี้ [6,10] คือ ทนทานต่อการฉีกขาด ทนการกัดกร่อนของสารเคมี สามารถดูดซึมน้ำได้ มีความสามารถในการนำโปรตอนได้ดี แต่มีความสามารถในการนำอิเล็กตรอนต่ำ แก๊สแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้น้อย มีความคงตัวสูง (ไม่มีการบวม) มีค่าการแพร่ของน้ำต่ำ มีค่าความต้านทานต่อการสูญเสียน้ำหรือมีความต้านทานต่อการเกิดดีไฮเดรชัน (Dehydration) มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน รีดักชัน และไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) มีค่าการถ่ายเทไอออนบวก (Cation) สูง มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) และพื้นผิวของเยื่อแผ่นต้องยึดเกาะตัวเร่งปฏิกิริยาไว้บนพื้นผิวได้ดี

2. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) [1,11]

ขั้วไฟฟ้าประกอบด้วยชั้นแพร่แก๊ส (Gas diffusion layer) และชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยขั้วไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีรูพรุนมาก เนื่องจากรูพรุนของชั้นแพร่แก๊สจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าต้องมีความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำหรือมีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าได้ดี โดยการเคลื่อนที่ของแก๊สป้อนแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ผ่านชั้นแก๊สแพร่ไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาและเยื่อแผ่นอิเล็กโทรไลต์

2) ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการดูดซับแก๊สที่ผ่านเข้ามาลงบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะขึ้นกับพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา (Specific surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา
3) โมเลกุลของแก๊สเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา โปรตอนไอออนเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปอีกด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้า ซึ่งความสามารถในการเคลื่อนที่ของโปรตอนจะขึ้นอยู่กับความหนาของเยื่อแผ่นอิเล็กโทรไลต์

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงมีด้วยกันหลายประเภท ดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าแบบพรุน (Porous Electrode)

ผลิตจากวัสดุที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี มีความบางและมีรูพรุนสูง เป็นขั้วไฟฟ้าแบบแก๊สแพร่ (Gas diffusion electrode) โดยสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่บริเวณพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยา (Active site) ข้อดีของขั้วไฟฟ้าพรุนคือมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีมากกว่าร้อยละ 90 และจะเกิดได้ดีมากขึ้นหากอิเล็กโทรไลต์บาง อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้มักมีความหนาอยู่ในช่วง10-100 มิลลิเมตร ทั้งนี้ยังขึ้นกับความเรียบของพื้นผิว ลักษณะการกระจายตัวและความหนาของชั้นปฏิกิริยา การทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและบริเวณเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ขั้วไฟฟ้าแบบโลหะพรุน (Porous Metal Electrode)

ทำการผลิตโดยการเผาผงโลหะ โดยผงโลหะที่ผ่านกระบวนการเผานี้จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ ความแข็งแรงของขั้วไฟฟ้าขึ้นกับกระบวนการผลิต ขนาดรูพรุนของขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่ได้จะต้องยอมให้แก๊สหรืออิเล็กโทรไลต์ผ่าน

3. ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นพรุน (Porous Screen Electrode)

ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้สามารถเตรียมได้จากการนำตัวรองรับที่นำกระแสไฟฟ้ามาผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติชอบน้ำ เช่น แพลทินัมดำ โลหะอัลลอยด์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า และในตัวเร่งปฏิกิริยายังผสมองค์ประกอบที่ไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน(Polytetrafluoroethylene, PTFE) การเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบ Porous screen เริ่มจากการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน เมื่อผสมกันดีแล้วนำไปอัดเย็นบนตัวรองรับทั้งสองข้าง ที่ความดัน 210-70 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร

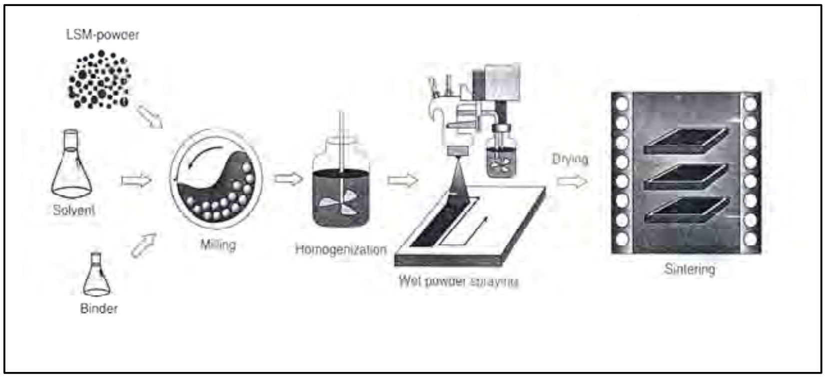
ต่อมานำขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปอัดร้อนที่ความดัน 300-700 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 315 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 7.5 นาที จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปประกบกับแผ่นเทฟลอน (Teflon) เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส โดยการอัดจะเป็นตัวกำหนดรูพรุนและความหนาของขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลต่อความต้านทาน และการเคลื่อนที่ของแก๊ส อิเล็กตรอน และน้ำในขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟอสฟอริกและชนิดแอลคาไลต์

2.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้า [2]

ในปัจจุบันนี้การเตรียมขั้วไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ต้องการและทักษะความชำนาญในการเตรียม วิธีที่นิยมใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า เช่น การสเปรย์ (Spray) การระบาย (brushing) การพิมพ์ (Printing) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีขั้นตอนการเตรียมและองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป โดยลักษณะการเตรียมและองค์ประกอบของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมจะมีผลต่อคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ได้ เช่น ความหนา ความพรุน การนำกระแสไฟฟ้า และความต้านทาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวล้วนมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

2.4.1 การสเปรย์

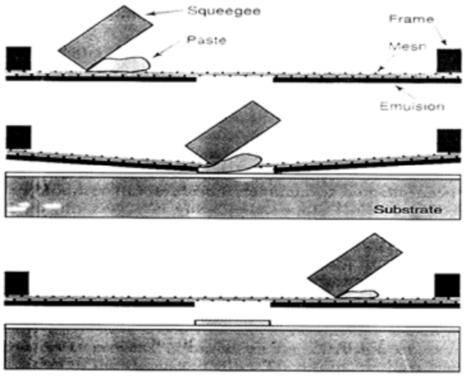
เป็นวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยการพ่นสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊สหรือแผ่นรอบรับ สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในวิธีการสเปรย์จะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กและผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่มีก็ได้ อาจเป็นกระดาษคาร์บอนหรือผ้าคาร์บอนก็ได้ ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยการสเปรย์แสดงในรูปที่ 2.8 เริ่มจากการนำผงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับตัวทำละลายและส่วนผสมอื่น กวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปพ่นบนตัวรองรับ เมื่อตัวทำละลายระเหยออกทำให้ผงตัวเร่งปฏิกิริยาจับกับแผ่นรองรับ หลังจากนั้นนำไประเหยให้แห้ง ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีนี้คือ ความหนืด (Viscosity) ของสารผสมก่อนการสเปรย์และระยะเวลาในการแห้ง (Drying time) ของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.12 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการสเปรย์ [2]

2.4.2 การระบาย

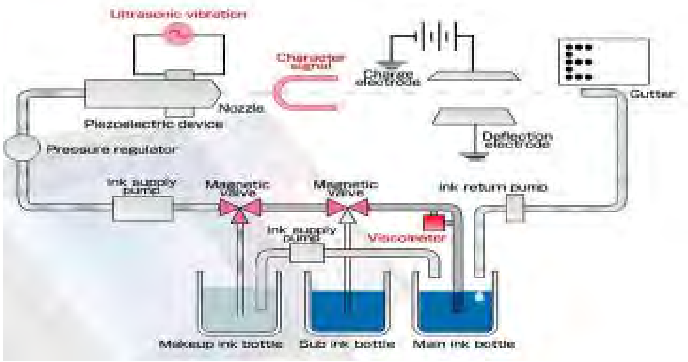
การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยวิธีการระบายนี้ จะเริ่มจากการผสมตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวทำละลายและสารเคมีอื่นๆ เช่นเดียวกับการการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยการสเปรย์ แต่สารผสมจะต้องมีความหนืดสูงกว่าการสเปรย์ และต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำสารผสมไประบายบนแผ่นรองรับด้วยแปรงหรือแม่พิมพ์ แผ่นรองรับที่ใช้อาจมีรูพรุนหรือไม่มีก็ได้ แผ่นรองรับที่นิยมใช้ได้แก่ กระดาษคาร์บอน ผ้าคาร์บอน เป็นต้น ถ้ามีการใช้แผ่นรองรับขั้วไฟฟ้าจะมีชั้นแพร่ (Diffusion layer) เพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงและรักษาระดับน้ำในเซลล์ แต่ถ้าไม่ใช้แผ่นรองรับหรือใช้แผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุน เมื่อทำการอัดขั้วไฟฟ้าเข้ากับเยื่อแผ่นจะต้องนำแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนออก โดยทั่วไปแผ่นรองรับที่ไม่มีรูพรุนที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจะเป็นพวกพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น เทฟลอน โดยมีขั้นตอนการเตรียมแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการระบาย [2]

2.4.3 การพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต

การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยานั้น จะต้องมีสมบัติของความหนืดและแรงตึงผิวใกล้เคียงกับหมึกพิมพ์ทางการค้า มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะใส่ลงในตลับหมึกพิมพ์และติดตั้งลงในเครื่องพิมพ์ จากนั้นดำเนินการพิมพ์หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่นรองรับ เช่น กระดาษคาร์บอน ผ้าคาร์บอน หรือเยื่อแผ่นอิเล็กโทรไลต์ การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์สามารถควบคุมรูปร่างและความสม่ำเสมอของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี โดยมีขั้นตอนการเตรียมแสดงในรูปที่



รูปที่ 2.14 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต[12]

2.5 สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงสามารถศึกษาได้จากกราฟโพลาไรเซชัน

2.5.1 กราฟโพลาไรเซชัน (Polarization curve)

โพลาไรเซชัน (Polarization) คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงจากค่าจริงที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ตามทฤษฎีค่าความต่างศักย์ของกระบวนการจะมีค่า ประมาณ 1.23 โวลต์ ซึ่งใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง โดยการเกิดโพลาไรเซชันนั้นจะเกิดขึ้นทั้งที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ลดลง โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จริง (E_{cell}) สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.12)

$$E_{cell} = E^{o}{}_{cell} - |\varepsilon_c| - |\varepsilon_a| - IR \qquad (2.12)$$

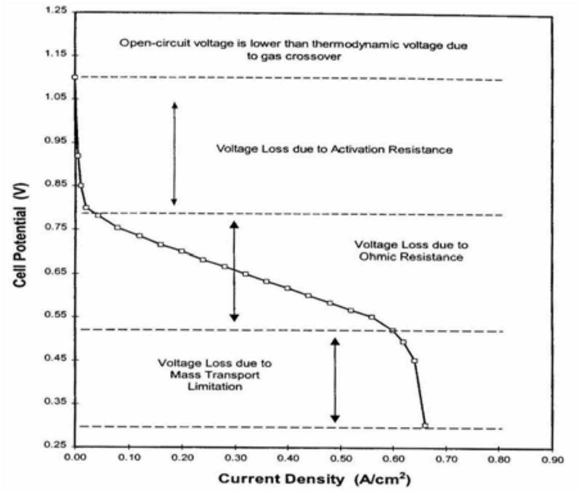
โดยที่ E^{0}_{cell} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเทียบกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน

ε_c คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแคโทด (Cathode overpotential)

ε_a คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนด (Anode overpotential)

IR คือ พจน์ของค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่มาจากความต้านทานในเซลล์เชื้อเพลิง

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการที่เกิดภายในเซลล์เชื้อเพลิง มาเขียนกราฟจะทำให้ได้กราฟที่ชื่อว่า กราฟโพลาไรเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟโพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน [13]

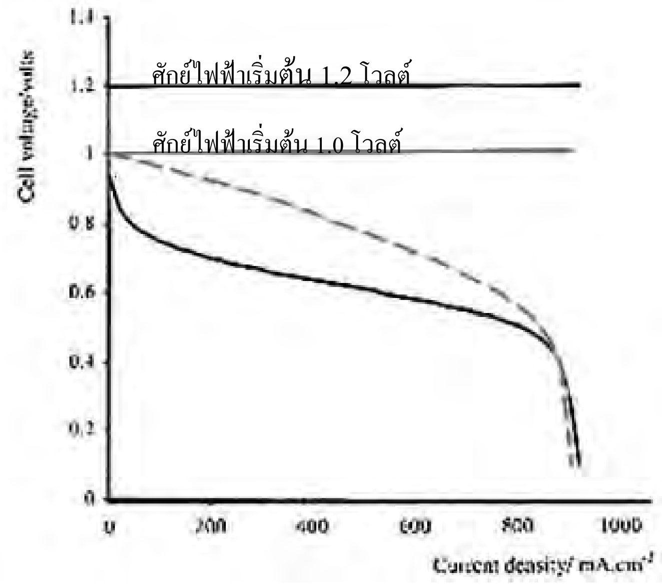
จากกราฟรูปที่ 2.15 พบว่ากราฟในช่วงแรกค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นจะมีค่าน้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี ซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการสามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจากขั้วไฟฟ้าทางด้านแคโทดไปยังขั้วไฟฟ้าทางด้านแอโนด หรือปัจจัยจากการที่แก๊สแพร่ข้ามฝั่ง (Crossover) ระหว่างขั้วไฟฟ้าทางด้านแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าทางด้านแคโทดผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน เมื่อแก๊สเกิดการข้ามฝั่งจะเกิดปฏิกิริยากับผิวขั้วไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เมื่อแก๊สไฮโดรเจนแพร่ข้ามไปยังขั้วแคโทดก็เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ประกอบกับฝั่งขั้วแคโทดมีแก๊สออกซิเจน จึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันภายในขั้วแคโทดเดียวกัน ส่งผลให้เกิดกระแสภายใน (Internal current) [6] ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินขึ้นที่ขั้วแคโทด เช่นเดียวกันกับฝั่งแอโนดที่มีการแพร่ข้ามของออกซิเจน ก็จะเกิดศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ขั้วแอโนดเช่นเดียวกัน จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าตามทฤษฎี โดยเรียกค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open-circuit potential) กราฟโพลาไรเซชันนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่

1. โพลาไรเซชันทางปฏิกิริยาเคมี (Chemical Polarization) หรือ Activation losses เป็นค่าโพลาไรที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สเชื้อเพลิงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องมาจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น อุณหภูมิ ความดัน และชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนจะมีค่าที่ลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง ถ้าอัตราเร็วของเกิดปฏิกิริยาเคมีมีค่าต่ำจะเกิดโพลาไรเซชันในทางเคมีมาก การลดค่าโพลาไรเซชันทางเคมีสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงจะมีการลดลงของศักย์ไฟฟ้าที่วงจรเปิดน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิต่ำ ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการ

$$E = \left(\frac{-\Delta_f \overline{G}}{nF} \right) \tag{2.13}$$

เมื่อ	E	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นทางทฤษฎี (โวลต์)
	$-\Delta_f \overline{G}$	คือ พลังงานอิสระกิบบ์ (กิโลจูล/โมล)
	n	คือ จำนวนอิเล็กตรอน
	F	คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ มีค่า 96,485 (คูลอมบ์/โมล)

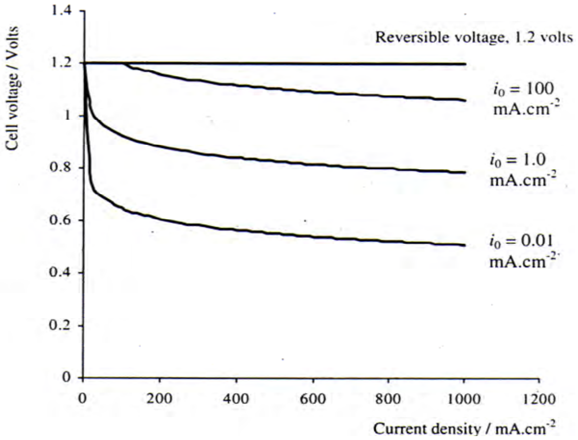
จากสมการจะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นทางทฤษฎีขึ้นอยู่กับพลังงานอิสระกิบบ์ ซึ่งพลังงานอิสระกิบบ์ไม่ใช่ค่าคงที่แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสถานะของแก๊สเชื้อเพลิง และจากรูปจะเห็นว่าค่าโพลาไรเซชันทางเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิในการทำงานสูง จะมีค่าน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิในการทำงานต่ำ



รูปที่ 2.16 โพลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อุณหภูมิในการทำงานแตกต่างกัน

(–) 40 องศาเซลเซียส (- -) 800 องศาเซลเซียส [6]

การเพิ่มอุณหภูมิสามารถเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาและทำให้โพลาไรเซชันทางเคมีของเซลล์มีค่าลดลง แต่ก็ไม่สามารถใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนได้ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมีช่วงอุณหภูมิการทำงานอยู่ที่ 50-120 องศาเซลเซียสและไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงมากๆได้ ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมในการเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมี คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวและมีประสิทธิภาพสูง โดยการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาควรดูที่สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ๆ เช่น ค่าสมรรถนะการเลือก (Selectivity) หรือค่าแอกทิวิตี โดยสามารถเลือกได้จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน (Exchange current density) ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ภาวะสมดุล สามารถหาได้จากการทำ Tafel plot โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนจะส่งผลต่อค่าโพลาไรเซชันทางเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2.11 จากรูปจะเห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนสูง จะส่งผลทำให้ค่าโพลาไรเซชันทางเคมีลดลง นั่นแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนสูงมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนต่ำ



รูปที่ 2.17 โพลาไรเซชันแสดงการเปรียบเทียบค่าโพลาไรเซชันทางเคมี เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยนต่าง ๆ [6]

2. โพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน (Resistance Polarization) หรือ Ohmic resistance เป็นค่าโพลาไรที่เกิดจากความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านขั้วไฟฟ้า และแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า รวมกับค่าความต้านทานของการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน การลดค่าโพลาไรเซชันชนิดนี้ทำได้โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผงคาร์บอน และตัวสะสมกระแสไฟฟ้าที่มีค่าการนำกระแสไฟฟ้าสูง ๆ และใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความหนาต่ำเพื่อลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของโปรตอน หรือเพิ่มความชื้นในอิเล็กโทรไลต์

3. โพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น (Concentration Polarization) หรือ Mass transfer resistance เป็นค่าโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการแพร่ของแก๊สเชื้อเพลิงเข้าไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นควบคุมปฏิกิริยา (Rate controlling step) เพราะแก๊สเชื้อเพลิงที่เข้าไปถึงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกใช้ไปรวดเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงแพร่ผ่านชั้นต่าง ๆ เข้าไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยาส่งผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลง

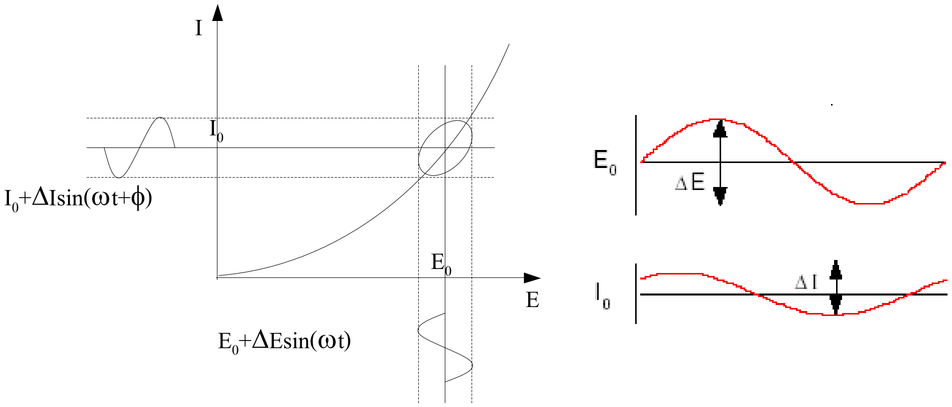
2.5.2 ความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) [14,15]

ค่าความต้านทานเชิงซ้อนในเซลล์เชื้อเพลิงสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนจะทำโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์-สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) โดย EIS เป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาหาสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุ และเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ลักษณะของระบบไฟฟ้าเคมีโดยอาจจะช่วยในการแยกแยะอิทธิพลของลักษณะทาง

กายภาพ และปรากฏการณ์ทางเคมีที่ศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งในการทำงาน ด้วยการทดลองเพียงขั้นตอนเดียวก็ได้รวบรวมช่วงความถี่ที่ใช้งานไว้อย่างเพียงพอ

เมื่อไม่กี่ปีมานี้ EIS ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในด้านวัสดุศาสตร์ โดยมักใช้ในการศึกษาลักษณะการเคลือบ แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง และการกัดกร่อน อีกทั้งได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในการวิเคราะห์การแพร่ของไอออนผ่านเยื่อ และการศึกษารอยต่อของสารกึ่งตัวนำ

หลักการของวิธีการวัดโดยใช้ EIS มีหลักการคล้ายกับวิธีอิมพีแดนซ์ทั่วไป ซึ่งจะให้สัญญาณกระตุ้นในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าแอมพลิจูดต่ำ ไปยังระบบภายใต้การวิเคราะห์ และวัดการตอบสนองในรูปของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า หรือสัญญาณอื่นๆ ที่สนใจ จากรูปที่ 2.18 จะแสดงกราฟเส้นโค้งของกระแสไฟฟ้า - ศักย์ไฟฟ้า ของระบบไฟฟ้าเคมีในเชิงทฤษฎี



รูปที่ 2.18 กราฟกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเคมีในเชิงทฤษฎี [14]

คลื่นรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูดต่ำของ $\Delta E\sin(\omega t)$ ณ ความถี่ค่าหนึ่ง ได้เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้าไปในค่าศักย์ไฟฟ้า E_0 ส่งผลให้เกิดการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเป็นคลื่นรูปไซน์ของ $\Delta I\sin(\omega t+\phi)$ เพิ่มเติมเข้าไปในค่า I_0 การตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าจะเลื่อนไปตามศักย์ไฟฟ้าที่ให้ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จาก กฎของโอห์ม (Ohm’s Law) ดังสมการ

$$Z(\omega)=\frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \qquad (2.14)$$

ค่าอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อนกับขนาดและการเลื่อนของเฟสซึ่งขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสัญญาณที่ให้จึงสามารถทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ โดยทั่วไปในระบบไฟฟ้าเคมีจะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 100 kHz ไปจนถึง 0.1 Hz

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า Z(ω) เป็นปริมาณเชิงซ้อนจึงสามารถแสดงได้โดย

ในพิกัดเชิงขั้ว อิมพีแดนซ์ของข้อมูลสามารถเขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = |Z(\omega)| e^{\phi(\omega)} \qquad (2.15)$$

เมื่อ $|Z|$ คือขนาดของอิมพีแดนซ์ และ ϕ คือการเลื่อนของเฟส

ในพิกัดคาร์ทีเชียน อิมพีแดนซ์เขียนได้ในรูป

$$Z(\omega) = Z_f(\omega) + jZ_f(\omega) \qquad (2.16)$$

เมื่อ Z_r คือส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ และ Z_j คือส่วนจินตภาพ และ $j = \sqrt{-1}$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เรียกว่า Nyquist Plot ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ด้านซ้ายมือ ข้อดีของ Nyquist Plot สามารถแสดงภาพรวมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและยังสามารถอธิบายได้ในเชิงคุณภาพ โดยที่แกนของส่วนจริงจะมีค่าเท่ากับแกนของส่วนจินตภาพเพื่อจะไม่ไปบิดเบือนรูปร่างของเส้นกราฟ ทั้งนี้ รูปร่างของเส้นกราฟมีความสำคัญในการอธิบายเชิงคุณภาพของข้อมูล ข้อเสียของ Nyquist Plot คือการไม่ได้แสดงมิติของความถี่ ทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยระบุค่าความถี่ลงไปบนกราฟเลย

ค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์และการเลื่อนของเฟส จะเขียนได้ในรูปฟังก์ชันของความถี่โดยทั้งสองกราฟสามารถเขียนรวมกันได้ในรูปของ Bode Plot ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ด้านขวามือ ซึ่งจะทำให้การแสดงผลของข้อมูลมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

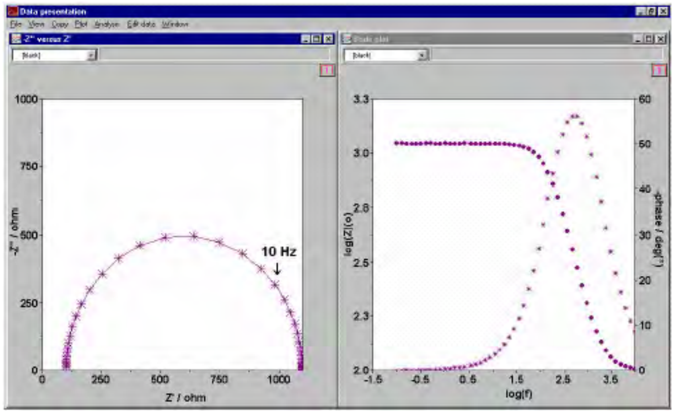
ความสัมพันธ์ระหว่างการแสดงผลของข้อมูลในรูปของ Nyquist Plot และ Bode Plot เป็นไปตามสมการ

$$|Z|^2 = (\operatorname{Re} Z)^2 + (\operatorname{Im} Z)^2 \quad (2.17)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im} Z}{\operatorname{Re} Z} \quad (2.18)$$

$$\operatorname{Re}(Z) = |Z| \cos\phi \quad (2.19)$$

$$\operatorname{Im}(Z) = |Z| \sin\phi \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.19 Nyquist Plot และ Bode Plot

โดยทั่วไปการทดลองอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าเคมีจะประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี (หรือระบบภายใต้การวิเคราะห์) เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Potentiostat) หรือเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Galvanostat) และเครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่ (Frequency Response Analyzer, FRA) ทั้งนี้ เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่จะใช้คลื่นรูปไซน์ และการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบ เพื่อระบุอิมพีแดนซ์ของระบบ

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการทดลองอิมพีแดนซ์จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 3 หรือ 4 ขั้ว เซลล์พื้นฐานที่สุดจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 ขั้ว โดยปกติขั้วไฟฟ้าภายใต้การวิเคราะห์จะเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) และขั้วไฟฟ้าที่ทำให้วงจรไฟฟ้าครบวงจรเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter Electrode) ขั้วไฟฟ้ามักจะจุ่มอยู่ในสารพาประจุที่เป็นของเหลว สำหรับระบบของแข็ง ก็อาจใช้สารพาประจุซึ่งเป็นของแข็ง หรืออาจไม่มีสารพาประจุก็ได้

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงโครงสร้างของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุด ขั้วไฟฟ้าที่สามนี้ คือขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference

Electrode) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการกำหนดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงานให้มีความแน่นอน เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าสัมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าเดี่ยว ไม่สามารถวัดค่าได้ การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเคมีจึงใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นหลักในการทำงาน เพราะฉะนั้น ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจึงควรผันกลับไปมาได้ และศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงควรจะมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาทำการวัด

โดยทั่วไป การทดลองอิมพีแดนซ์ จะทำภายใต้การควบคุมศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยก็ใช้วิธีการนี้ รูปแบบของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะทำการทดลองโดยการกำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง แล้วเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในรูปฟังก์ชันไซน์เข้าไปรบกวนศักย์ไฟฟ้าและนำไปใช้กับเซลล์ ค่ากระแสไฟฟ้าจะถูกวัดเพื่อนำไปประบุอิมพีแดนซ์ของระบบ

เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่จะมีรูปแบบในรูปกระแสสลับ โดยทั่วไปการวัดจะทำในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์ฟังก์ชันเดียว แต่หากใช้ฟังก์ชันไซน์แบบหลายฟังก์ชัน (5 หรือ 15) จะช่วยให้ประหยัดเวลาเมื่อทำการวัดที่ความถี่ต่ำมากๆ โดยสัญญาณกระตุ้นที่ใช้มักมีขนาดเล็กๆ ประมาณ 10 mV โดยช่วงความถี่ที่ใช้ถูกกำหนดโดยข้อจำกัดของเครื่องมือและระบบ ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดของแต่ละค่าความถี่คือส่วนกลับของค่าความถี่นั่นเอง ดังนั้น เมื่อความถี่ต่ำมากๆ จะใช้เวลาสูงมากเช่นกันในการอ่านข้อมูลอย่างสมบูรณ์ เช่น การวัดข้อมูลที่ค่าความถี่ 1 mHz จะใช้เวลา 1000 วินาที โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 100 kHz – 0.1 Hz ซึ่งจะใช้เวลาในการวัดทั้งสิ้นประมาณ 10 นาที

อิมพีแดนซ์ที่ได้สามารถแปลให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองกระบวนการ ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณขอบเขตที่ใช้อธิบายข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้อย่างเหมาะสม และยังสามารถช่วยในการคาดการณ์พฤติกรรมของระบบภายใต้ภาวะที่หลากหลายได้ด้วย

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในการแปลข้อมูลอิมพีแดนซ์ โดยวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสร้างขึ้นมาจากองค์ประกอบที่เป็นที่รู้จักกันดี เช่น ความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และ ขดลวดเหนี่ยวนำ รวมไปถึงองค์ประกอบอื่นๆ เช่น Constant Phase Element, Warburg Impedance, Tangent Impedance ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะต่อกันแบบอนุกรมและขนาน เพื่อให้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น ทั้งนี้องค์ประกอบต่างๆ เป็นไป ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า [15]

องค์ประกอบของวงจร	อิมพีแดนซ์	การเลื่อนของเฟส
ความต้านทาน (Resistance, R)	R	0
ตัวเก็บประจุ (Capacitance, C)	$\frac{1}{j\omega C}$	-90
ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, L)	$j\omega L$	+90
CPE, Constant Phase Element	$\frac{1}{(j\omega C)^{\alpha}}$	-
W, Warburg Impedance Infinite diffusion length	$\frac{R}{\sqrt{j\omega}}$	-
T, Tangent Impedance Finite diffusion length	$R\frac{\tanh\sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}}$	-

ตัวต้านทาน (Resistance, R)

มีค่าเทียบเท่ากับอิมพีแดนซ์คือ

$$Z = R \tag{2.21}$$

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะไม่ขึ้นกับค่าความถี่ และไม่มีส่วนจินตภาพ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานจะมีเฟสเดียวกับศักย์ไฟฟ้าเสมอ ตัวอย่างของตัวต้านทานที่ใช้อธิบายระบบไฟฟ้าเคมีได้แก่

- **Ohmic Resistance,** R_{Ω} นั่นคือความต้านทานที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าทำงาน ในบางครั้งเราอาจแทนด้วย R นอกจากนี้ค่าความต้านทานนี้ยังขึ้นกับการเหนี่ยวนำของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนและลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดอีกด้วย
- **Polarization Resistance,** R_P จากการที่ขั้วอิเล็กโทรดมีความเป็นขั้วมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรดถูกบังคับให้เลื่อนไปจากศักย์ไฟฟ้าขณะวงจรเปิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของขั้วอิเล็กโทรด

ขนาดของกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา และการแพร่เข้า-ออกของสารตั้งต้นที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรด

ตัวเก็บประจุ (Capacitance, C)

มีค่าเทียบเท่ากับอิมพีแดนซ์ คือ

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \tag{2.22}$$

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะขึ้นกับค่าความถี่และจะมีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้น และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสเลื่อนเป็น -90^{o} เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า ตัวอย่างของตัวเก็บประจุที่ใช้อธิบายระบบไฟฟ้าเคมี ได้แก่

Double Layer Capacitance, C_{dl}

จากการที่บริเวณรอยต่อของขั้วอิเล็กโทรดและเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนมี electrical double layer เกิดขึ้นซึ่ง double layer นี้จะเปรียบเสมือนกับที่เก็บประจุจากสารละลายที่จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งประจุเหล่านี้จะแยกออกมาจากประจุที่ขั้วอิเล็กโทรด ค่า double layer capacitance จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายๆอย่าง ไม่ว่าจะเป็น ศักย์ไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด อุณหภูมิ ความหนาแน่นของประจุ ชนิดของประจุ ความบริสุทธิ์ของสาร การดูดซึมเป็นต้น

Constant Phase Element, CPE

ในการอธิบายของระบบไฟฟ้าเคมีนั้นมักจะใช้ตัวเก็บประจุอุดมคติ นั่นคือสมมติให้ลักษณะของพื้นผิวที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเดียวกันตลอดทั้งแผ่น ซึ่งปกติแล้วจะเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงมีการใช้ CPE อธิบายในส่วนที่ไม่เป็นลักษณะเดียวกันของพื้นผิว

$$Z = \frac{1}{(j\omega C)^{\alpha}} \tag{2.23}$$

เมื่อ C คือตัวเก็บประจุอุดมคติ และ α คือค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 1 โดยที่ค่า α = 1 CPE จะทำหน้าที่เสมือนกับตัวเก็บประจุอุดมคตินั่นเอง

Warburg Impedance, Z_{war}

ในระบบไฟฟ้าเคมีจะมีการแพร่ของประจุระหว่างรอยต่อเกิดขึ้น จึงได้มีการพัฒนา Warburg impedance ขึ้นเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์นี้ โดยมีการตั้งค่า Warburg Impedance ไว้หลายแบบโดยแบ่งตามสมมุติฐานที่ใช้ เพื่อใช้อธิบายค่าอิมพีแดนซ์ของการแพร่ที่เกิดขึ้นดังกล่าว

กรณีที่สมมุติฐานเป็นชั้นการแพร่ที่ไม่จำกัดขอบเขต (Infinite diffusion or Warburg diffusion) ค่าอิมพีแดนซ์จะเท่ากับ

$$Z = \frac{R}{\sqrt{j\omega}} \tag{2.24}$$

กรณีที่สมมติฐานเป็นชั้นการแพร่ที่จำกัดขอบเขตค่าอิมพีแดนซ์จะเท่ากับ

$$Z = R\frac{\tanh\sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}} \tag{2.25}$$

$$\tau = \frac{\delta^2}{D} \tag{2.26}$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานในการแพร่ δ คือ ความหนาของชั้นการแพร่

τ คือ ค่าคงที่ของเวลาในการแพร่ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่

ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, L)

ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำคือ

$$Z = j\omega L \tag{2.27}$$

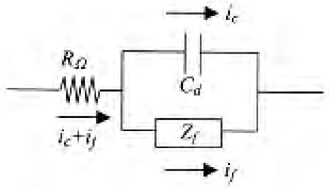
ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น และจะมีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้นเหมือนตัวเก็บประจุ แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะมีเฟสเลื่อนเป็น $+90^{o}$ เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า

ค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีบางครั้งก็เป็นผลมาจากการดูดซึมของสารตั้งต้นบนพื้นผิว ซึ่งจะสามารถสร้างแบบจำลองโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำแทนได้นั่นเอง นอกจากนี้การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า

การตอบสนองที่ช้าของขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง ในกรณีนี้เราอาจจะสามารถอธิบายถึงผลของการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้ว่ามีสาเหตุมาจากข้อผิดพลาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดได้นั่นเอง

วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่นิยมใช้คือ Randles Equivalent Circuit (RC) ซึ่งประกอบไปด้วย ความต้านทานอันเนื่องมาจากสารละลาย, Double Layer Capacitor และ Faradaic Impedance วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบนี้ถูกนำมาใช้ในระบบที่มีการกัดกร่อน และมักถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น



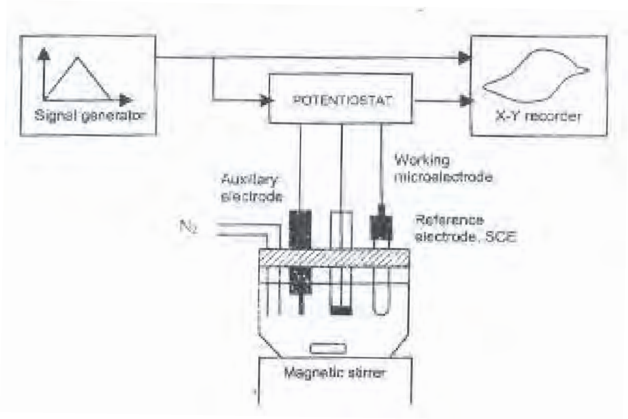
รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของเซลล์ไฟฟ้าเคมี และ การแยกย่อย Z_f เป็น R_s และ C_s หรือ R_{ct}และ Z_w

2.5.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

โวลแทมเมทรีเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีที่ต้องให้ศักย์ที่คงที่เข้าไปในวงจร และวัดกระแสที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับเทคนิคนี้มักเป็นขั้วไฟฟ้าจุลภาค (Microelectrode) ทั้งนี้เพื่อให้เกิดโพลาไรเซชันที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน เทคนิคที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์โดยโวลแทมเมทรี ได้แก่ โพลาโรกราฟี แอมแปโรเมทรี พัลส์โวลแทมเมทรี สทริปปิงโวลแทมเมทรี โวลแทมเมทรีแบบรอบและไฮโดรไดนามิกโวลแทมเมทรี

พารามิเตอร์ที่สำคัญของการกระตุ้นแบบรอบและโวลแทมโมแกรมแบบรอบ ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Initial potential, E_{intial}) ทิศทางการกวาดเริ่มต้น (Intial sweep direction, -/+) ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด)Maximum potential, E_{max}) ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum potential, E_{min}) ศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย (Final peak potential) อัตราการสแกน (Scan rate, ϕ) ศักย์ไฟฟ้าที่ยอดแคโทดิก(cathodic peak potential, E_{pc}) ศักย์ไฟฟ้าที่ยอดแอโนดิก (Anodic peak potential) กระแสไฟฟ้าที่ยอดแคโทดิก (Cathodic peak current, i_{pc}) และกระแสไฟฟ้าที่ยอดแอโนดิก (Anodic peak current, i_{pa})

การจัดเครื่องมือสำหรับโวลแทมเมทรี ใช้การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบสามขั้วไฟฟ้าโดยมี Potentiostat ทำหน้าที่ควบคุมศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับเซลล์



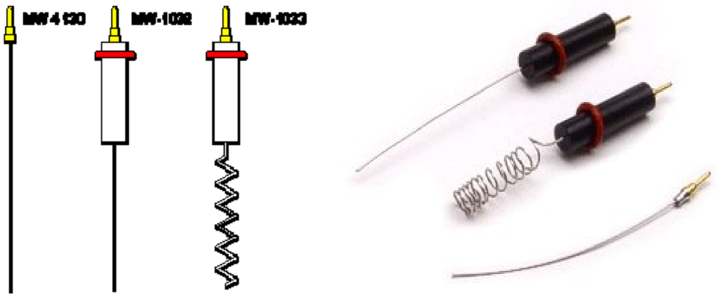
รูปที่ 2.21 แผนภาพเครื่องมือสำหรับโวลแทมเมทรีแบบรอบ [16]

เครื่องมือที่ใช้สำหรับไซคลิกโวลแทมเมทรีประกอบด้วย

(ก) เซลล์อิเล็กโตรไลติก โดยทั่วไปเป็นเซลล์ชนิดสามขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าใช้งานส่วนใหญ่เป็นขั้วไฟฟ้าแบบจานของแข็ง (Solid disk electrode) นิยมใช้ชนิดแพลทินัม กระจกคาร์บอน เงิน ทอง หรือ อะมัลกัม ส่วนขั้วไฟฟ้าปรอทแบบหยดจะใช้สำหรับสารละลายในน้ำที่ปฏิกิริยามีศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าลบมาก

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบค่า ดังนั้นจึงต้องทราบค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าที่จะนำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง นอกจากนี้ยังต้องมีความเสถียร ค่าความต่างศักย์ต้องคงที่ ไม่ว่าระบบจะเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

ขั้วไฟฟ้าช่วยทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงส่งต่อผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่โดยขั้วไฟฟ้าช่วยนี้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ตัวอย่างของขั้วไฟฟ้าช่วย เช่น ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม ดังรูป



รูปที่ 2.22 ขั้วไฟฟ้าช่วย [17]

ขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับเทคนิคโวลแทมเมทรี นิยมใช้ขั้วไฟฟ้าจุลภาค ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าแบบดิสก์ (Disc electrode) ขั้วไฟฟ้าหยดปรอทแขวนตัว (Hanging mercury drop electrode; HMDE) และขั้วไฟฟ้าหยดปรอท (Dropping mercury electrode; DME)

ขั้วไฟฟ้าจุลภาค ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้มีขนาดเล็กและใช้งานง่าย ซึ่งถูกสร้างไว้ในพลาสติกขนาดกว้าง 6 มิลลิเมตร สูง 7.5 เซนติเมตร และถูกตรึงไว้กับแผ่นดิสก์ของวัสดุที่ต่างกันไป เช่น ทอง แพลทินัม นิเกิล เงิน หรือ glassy carbon เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้าแบบดิสก์มีขนาดเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร หรือ 3.0 มิลลิเมตร ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่เลือกใช้ ขั้วไฟฟ้าจุลภาคแสดงในรูปที่ 2.20

(ข) แหล่งกำเนิดสัญญาณ หน้าที่ให้สัญญาณศักย์ไฟฟ้าแบบรอบกับเซลล์ที่ศึกษา

(ค) Potentiostat เป็นวงจรควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ในช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ต้อง

(ง) แอมมิเตอร์ ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งเปลี่ยนแปลงขณะเกิดปฏิกิริยา

(จ) เครื่องบันทึก ทำหน้าบันทึกโวลแทมโมแกรม

รูปที่ 2.23 ขั้วไฟฟ้าจุลภาค [17]

ในการทำงานของไซคลิกโวลแทมเมทรีเป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าในรูปคลื่นสามเหลี่ยม โดยช่วงแรกทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นตรงจากศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น +0.4 โวลต์ ไปยังศักย์ไฟฟ้า +1.2 โวลต์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าคาโลเมล ขณะที่ทิศทางการสแกนผันกลับศักย์ไฟฟ้ากลับมายังจุดเริ่มต้น +0.4 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการผันกลับเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนทาง (Switching potential) รอบการกระตุ้นเช่นนี้มักกระตุ้นซ้ำหลายครั้ง ซึ่งอยู่ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นและศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย ช่วงของศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนทางที่ใช้ในการทดลองเป็นช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันที่ควบคุมโดยการแพร่ของสาร

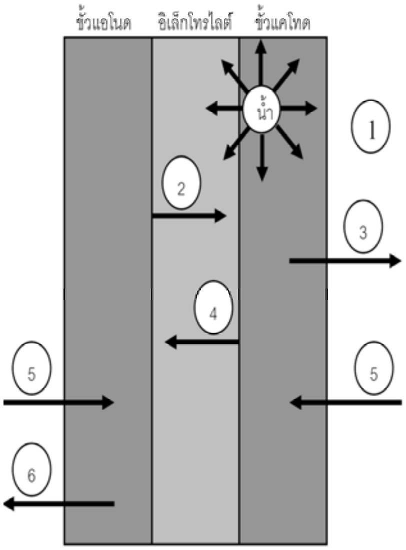
ทิศทางของการสแกนอาจเป็นทางลบหรือเป็นบวกขึ้นกับองค์ประกอบของสารตัวอย่าง การสแกนไปในทิศทางที่มีศักย์ไฟฟ้ามีค่าลบมากขึ้นเรียกว่า การสแกนไปข้างหน้า (Forward scan)

ส่วนการสแกนในทิศทางที่ตรงกันข้ามคือศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกมากขึ้น เรียกว่า การสแกนผันกลับ (Reverse scan)

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

2.6.1 ปริมาณน้ำ [6]

ประสิทธิภาพในการนำโปรตอนของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในเยื่อแผ่น โดยการนำโปรตอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้ามีปริมาณของน้ำมากเกินไปที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้ากับเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนจะทำให้เกิดการท่วม (Flooding) คือน้ำไปอุดตันรูพรุนบนขั้วไฟฟ้า ทำให้แก๊สแพร่ผ่านเข้าทำปฏิกิริยาได้ยาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง รูปที่ 2.24 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำในเซลล์เชื้อเพลิง



1. น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด
2. น้ำที่ถูกพาจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Electro-osmotic drag
3. น้ำส่วนเกินภายในระบบถูกกำจัดออกจากระบบด้วยการระเหยของน้ำไปกับแก๊สออกซิเจนหรืออากาศที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา
4. ในกรณีที่น้ำที่ขั้วแคโทดมีปริมาณสูง ก็จะเกิดการแพร่ย้อนกลับ (Back diffuse) ไปยังขั้วแอโนด
5. น้ำบางส่วนอาจถูกนำเข้ามาในระบบโดยกระบวนให้ชื้นความชื้นของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้าระบบ
6. น้ำส่วนเกินภายในระบบจะถูกกำจัดออกจากระบบด้วยการระเหยของน้ำไปกับแก๊สไฮโดรเจนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

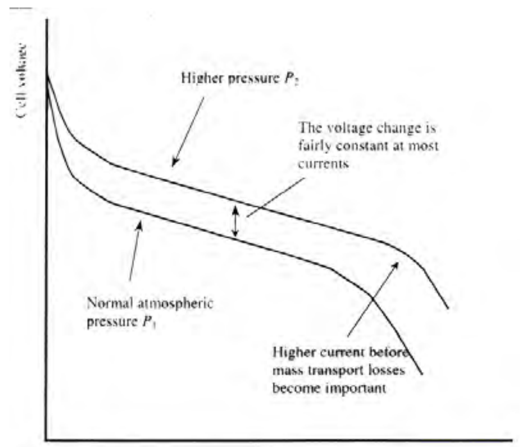
รูปที่ 2.24 ปรากฏการณ์ของน้ำที่เกิดขึ้นทุกกระบวนการในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน [6]

จากรูปที่ 2.24 จะเห็นว่าน้ำที่อยู่ในเซลล์เชื้อเพลิงมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดและจากกระบวนการให้ความชื้น (Humidification) ของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้ามาเซลล์ ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน ทำให้มีการแพร่ของน้ำจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งได้ ซึ่ง

การแพร่ของน้ำภายในเซลล์ระหว่างขั้วทั้งสองจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาของเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน และความสมดุลของปริมาณความชื้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง น้ำส่วนเกินภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกกำจัดออกจากเซลล์เชื้อเพลิงได้โดยการระเหยและออกไปพร้อมกับสารตั้งต้นที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

2.6.2 ความดันของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ [1,6,18]

ถึงแม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนขนาดเล็กจะสามารถทำงานที่ความดันบรรยากาศ แต่ในเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่ที่มีขนาด 10 กิโลวัตต์ หรือใหญ่กว่าอาจต้องใช้ความดันสูงในการทำงาน เนื่องจากความดันสูงจะทำให้เกิดการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินในการก่อกัมมันต์ (Activation over voltage) ที่ขั้วแคโทด ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ค่าแรงดันวงจรเปิดสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานอิสระกิบบ์ นอกจากนี้ยังทำให้ค่าโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ผลกระทบของการเพิ่มความดันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า [6]

การเพิ่มความดันแก๊สโดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สที่เป็นสารออกซิแดนซ์จะมีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ของเซลล์มีค่ามากขึ้น และมีค่าโดยประมาณ คือ

$$\Delta E_{cell} = \left(\frac{RT}{2F}\right)\ln\left(\frac{P''}{P'}\right) \qquad (2.28)$$

เมื่อ ΔE_{cell} คือ ค่าความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น (โวลต์)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่า 8.314 (จูลต่อโมล-เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ มีค่า 96,489 (คูลอมบ์ต่อโมล)

P'' คือ ค่าความดันสุดท้าย (บาร์)

P' คือ ค่าความดันเริ่มต้น (บาร์)

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน ควรทำงานที่ค่าความดันสูง ค่าความดันในการทำงานโดยปกติมีค่าอยู่ในช่วง 300-500 กิโลปาสคาล ทั้งแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน แต่ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นสารออกซิแดนซ์ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ความดันสูงจะช่วยลดปัญหาการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้ เนื่องจากเมื่อใช้อากาศเป็นสารออกซิแดนซ์จะทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนบริเวณขั้วไฟฟ้าลดลงเร็วกว่าการใช้ออกซิเจน ทำให้ความแตกต่างของความดันระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดมีมากกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง

2.6.3 อุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [6,19]

เมื่ออุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงค่าโพลาไรเซชันทางเคมีจะลดลง เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาหนึ่ง ๆ จะเป็นสิ่งที่ขึ้นกับค่าคงที่ตัวหนึ่งของปฏิกิริยานั้น ๆ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.29)

$$k = Ae^{-Ea/RT} \tag{2.29}$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตรา

A คือ ค่าคงที่ของการชนกันของโมเลกุล (แฟกเตอร์ของอาร์เรเนียส)

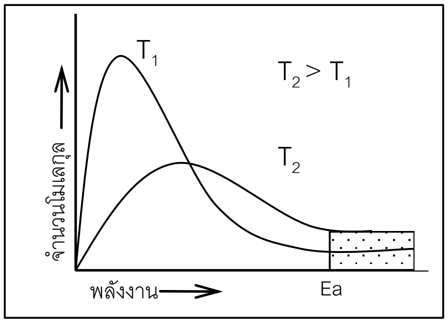
E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (จูลต่อโมล)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

จากสมการจะเห็นว่าค่าคงที่อัตราผันแปรตามอุณหภูมิ คือเมื่ออุณหภูมิสูงจะทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาสูงขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้แก๊สเชื้อเพลิงมีพลังงานจลน์ (Kinetic energy) สูงขึ้น เมื่อมีการชนกันของโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลมีพลังงานมากกว่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) แสดงดังรูปที่ 2.26 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์ดีขึ้น

อย่างไรก็ดีถ้าอุณหภูมิการทำงานมีค่าสูงมากจนเกินไป ค่าความต่างศักย์จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสูงโอกาสที่เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนภายในเซลล์เชื้อเพลิงจะเกิดการสูญเสียน้ำออกไปจะเป็นไปได้สูง ทำให้ขาดความสมดุลของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิง และค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



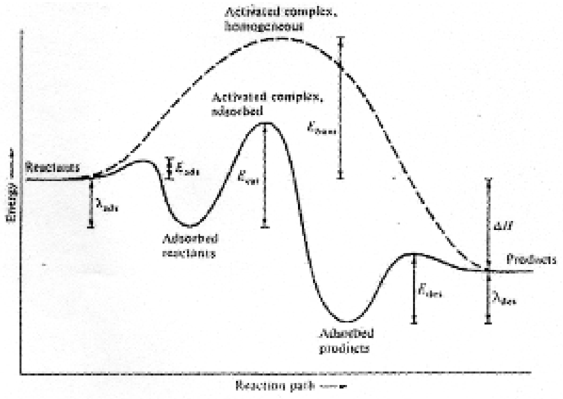
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมเลกุลกับค่าพลังงานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [20]

ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญมากสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในบางปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่ซึ่งใช้ในการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กล่าวคือไม่มีการสูญหายไปของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ Positive Catalysts เป็นสารที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ในขณะที่ตัวยับยั้ง (Inhibitor) หรือ Negative Catalyst เป็นสารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง

2.7.1 กลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา (Mechanism of catalysis)

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา นั่นคือเปลี่ยนแปลงเส้นทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยาให้เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่มีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยที่สุดที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ และเมื่อเส้นทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยามีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยลงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 เส้นทางในการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [22]

2.7.2 การจำแนกระบบของตัวเร่งปฏิกิริยา (Classification of catalytic systems) [20,21]

ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกจำแนกได้ 3 ชนิดโดยพิจารณาจากเฟส (Phase) ของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้น

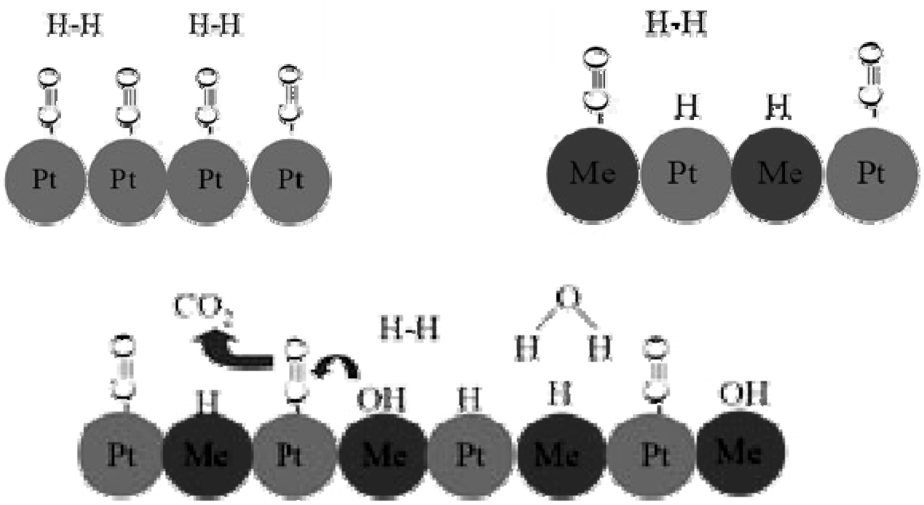
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะแตกต่างกับสารตั้งต้น หรือไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยส่วนใหญ่จะมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้นเป็นแก๊ส หรือ ของเหลว หรือแก๊สอยู่ร่วมกับของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งมีคุณสมบัติทางเคมีของผิว จึงเกิดปฏิกิริยาจำเพาะตามธรรมชาติทางเคมีของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็ง ในการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและระบบของสารตั้งต้นกับสารผลิตภัณฑ์ต้องไม่เปลี่ยนแปลงธรรมชาติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยายกเว้นบริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่ผิว (Surface interaction) จึงต้องไม่เกิดปฏิกิริยาทะลุเข้าไปในเนื้อชั้นในของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นปฏิกิริยาที่ผิวจะเป็นปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) เท่านั้น

3. เอนไซม์ (Enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกี่ยวกับปฏิกิริยาชีวเคมี โดยทั่วไปแล้วเอนไซม์จะเป็น Specific catalyst นั่นคือจะเร่งได้เพียงหนึ่งปฏิกิริยาของหนึ่งสารตั้งต้น

2.8 **ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอน** [38]

ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนช่วยให้เซลล์เชื้อเพลิงทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น ในแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการเปลี่ยนรูปนั้นจะมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 25 เมื่อนำแก๊สเชื้อเพลิงนี้มาเป็นสารป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจะส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง โดยจะไปลดปฏิกิริยาการดูดซับของแก๊สไฮโดรเจนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในด้านขั้วแอโนด และเนื่องจากรูทิเนียมมีความสามารถในการจับกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าแพลทินัม จึงมีการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมที่สามารถทนทานต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 กลไกการเกิดปฏิกิริยาความทนทานต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ของโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียม [38]

2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Colmati Jr. และคณะ [22] ศึกษาวิธีการเตรียมและลักษณะการกระจายตัวของโลหะ Pt-Ru บนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูง โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม ด้วย formic acid method (FAM) ใช้อัตราส่วน Pt:Ru เป็น 80:20 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้แก๊สไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นของ CO 100 ส่วนในล้านส่วน ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C ลดลงอย่างมาก แต่โลหะผสม Pt:Ru ที่อัตราส่วน 50:50 ยังคงให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.35 A/cm^2

Towne และคณะ [23] ศึกษาเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ drop-on-demand ของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตที่ใช้โดยทั่วไป และพัฒนาการเตรียม MEA ด้วยวิธีการพิมพ์นี้ให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ MEA ทางการค้า โดยใช้เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตที่ใช้โดยทั่วไปในบ้านเรือนมาใช้พิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่นเมมเบรนเนฟิออน จนได้หน่วยเมมเบรนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการยึดติดที่ดี สามารถทนต่อแรงดึง การบิดงอ และการขูดขีด และไม่ต้องใช้ขั้นตอนการกดร้อน ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่เตรียมได้นั้นใช้ปริมาณแพลทินัม 0.20 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.87 โวลต์ มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 155 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยไม่ได้ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนทางการค้าที่ใช้ปริมาณแพลทินัม 0.30 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าได้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่าเพียงร้อยละ 7 แต่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าถึงร้อยละ 33 การพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตจะนำไปสู่การผลิต MEA ต้นทุนต่ำ และสามารถผลิตเป็นรูปร่างต่างๆ ได้

Taylor และคณะ [24] พัฒนาวิธีการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาลงบน GDL ด้วยวิธีการใช้เครื่อง พิมพ์อิงก์เจ็ต เพื่อเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) โดยพบว่าวิธีการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้วิธีการสเปรย์หรือการทาไม่เหมาะสมกับการพอกพูนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำมาก แต่การพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตสามารถพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณ 0.02 มิลลิกรัมแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร อีกทั้งสามารถช่วยลดระยะเวลาในการเตรียม MEA ได้อย่างมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ และสามารถควบคุมลักษณะรูปร่างและความหนาของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างแม่นยำ จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของ MEA ที่ได้จากการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.02 มิลลิกรัมแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพดีกว่าการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการทาเป็นอย่างมาก

Smotkin และคณะ [25] พัฒนาเทคนิค high-throughput screening สำหรับการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงโดยมีลักษณะเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการผ่านสารตั้งต้นแบบแถวลำดับ โดยออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงให้มีระบบเซลล์เชื้อเพลิงย่อยแยกจากกันทั้งหมด 25 ช่อง (C1-C25) และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาไปในช่องทั้ง 25 ช่อง โดยแบ่งเป็นชุด ชุดละ 5 ตัวอย่าง จากนั้นจึงผ่านสารตั้งต้นเข้าสู่ช่อง C1 และผ่านระบบเซลล์เชื้อเพลิงย่อยและออกทางช่อง C25 พบว่าระบบเซลล์เชื้อเพลิงย่อยทั้ง 25 ช่อง ซึ่งค่าที่ได้จากตัวอย่างทั้ง 5 ตัวมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยในเซลล์แต่ละแบบ โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงสุดอยู่ที่ 10 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Sinha และคณะ [26] ศึกษาผลกระทบของรูปแบบชนิดช่องทางการไหลของแก๊สที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน เปรียบเทียบช่องการไหลระหว่างแบบคดเคี้ยวกับแบบขนาน โดยเปลี่ยนแปลงสภาวะของความชื้นฝั่งขาเข้า จากผลการทดลองพบว่าช่องการไหลแบบขนานจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าและมีการกระจายของน้ำ ค่าความนำไอออน และค่าความหนาแน่นกระแสที่เหมือนกันทั้งพื้นที่ ในส่วนของช่องการไหลแบบคดเคี้ยวจะมีบริเวณที่ไม่เกิดปฏิกิริยาตรงขอบด้านบนและด้านล่างของเมมเบรน ซึ่งมีผลต่อความทนทานของเมมเบรนลดลง

Guerin และคณะ [27] พัฒนาฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์ระบบการวัดที่มีความรวดเร็วและต่อเนื่องสำหรับ cyclic voltammetric ที่ใช้กับหน่วยรับข้อมูลจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ที่ดำเนินการแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับข้อมูลปริมาณมาก การประยุกต์ใช้ตัวกรองที่ใช้บ่งบอกถึงความทนทานและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้โปรแกรม Visual Basic สองโปรแกรมในการรับข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โปรแกรมทั้งสองสามารถแสดงค่า cyclic voltammogram ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าประจุไฟฟ้า การรับข้อมูลเป็นแบบต่อเนื่องโดยจะเริ่มเก็บข้อมูลของแต่ละช่องสัญญาณตั้งแต่ก่อนเริ่มไปจนถึงข้อมูลที่สอง อัตราการวัดตัวอย่างที่ 10 เฮิรตซ์ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ และมีการเขียนกราฟและบันทึกข้อมูลใน 0.10 วินาที

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

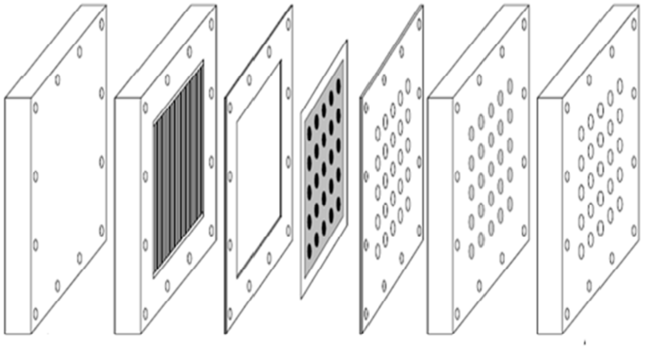
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ชื่อสาร	บริษัท
ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน 20% Pt/C	Electrochem
ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอน 5% PtRu/C	E-tek
ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอน 20% PtRu/C	E-tek
ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอน 40% PtRu/C	E-tek
1,2-ไดเมทอกซีอีเทน (1,2-Dimethoxyethane)	Fluka
เนฟิออน (Nafion117, 5%wt)	Fluka
เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol)	Fluka
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, 30%)	Carlo Erba
กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid, 98%)	Lab-scan
แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen 99.999%)	Praxair
แก๊สออกซิเจน (Oxygen 99.999%)	Praxair
แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen 99.99%)	Praxair
เยื่อแผ่นเนฟิออน (Nafion 115)	Electrochem
น้ำปราศจากประจุ (DI-water)	

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ตู้อบ
2. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
3. ไมโครปิเปต
4. โถดูดความชื้น
5. อ่างให้ความร้อน (Water bath)

6. เครื่องอัดร้อน-เย็น (Compression Mould) รุ่น LP 20 ของบริษัท LABTECH
7. อ่างอัลตราโซนิก (Ultra sonic water bath)
8. เครื่องแก้วอื่น ๆ ในห้องปฏิบัติการ
9. เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต รุ่น z1320 ของบริษัท Lexmark
10. ตลับหมึกชนิดเติม เบอร์ 28A ของบริษัท Lexmark
11. เซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ [25]

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat รุ่น PG STATO 30 ของบริษัท AUTOLAB
2. เครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น JSM 6400 ของบริษัท Jeol
3. เครื่อง Kruss Model K8

3.4 ตัวแปรที่ศึกษา

3.4.1 ปริมาณส่วนผสมของสารละลายที่เหมาะสมในการนำไปเตรียมเป็นหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

3.4.2 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเตรียม MEA ที่ช่วยลดระยะเวลาการเตรียมและให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุด

3.4.3 ความสม่ำเสมอของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อขยายส่วน

3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.5.1 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/C

1. ชั่งน้ำหนักผงตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน (20%Pt/C) ปริมาณ 25 มิลลิกรัมในขวดแก้ว เพื่อให้ได้น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่แม่นยำ
2. เติมสารละลาย 1,2-ไดเมทอกซีอีเทน ปริมาตร 6 มิลลิลิตร
3. เติมน้ำปราศจากประจุ ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร
4. เติมสารละลายเอทิลีนไกลคอล ปริมาตร 4 มิลลิลิตร
5. นำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส
6. เติมสารละลายเนฟิออนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 0.283 มิลลิลิตร เขย่าเล็กน้อยจากนั้นนำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

3.5.2 การเตรียมตลับหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. นำตลับหมึกชนิดเติมหมึกได้เบอร์ 28A มาเปิดฝาตลับหมึกด้านบนออก
2. นำฟองน้ำซับหมึกและหมึกพิมพ์ออก
3. นำตลับหมึกพิมพ์ล้างในน้ำสะอาดจนไม่มีคราบหมึกพิมพ์เหลืออยู่
4. นำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. เช็ดส่วนของแผงวงจรด้านหน้าให้แห้งด้วยกระดาษเช็ดเลนส์เพื่อไม่ให้เกิดคราบน้ำเกาะบริเวณแผงวงจร
6. ทิ้งตลับหมึกพิมพ์ไว้ให้แห้ง

3.5.3 การเตรียมเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต

1. เชื่อมต่อเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตกับคอมพิวเตอร์
2. ติดตั้งไดรฟ์เวอร์ของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต Lexmark รุ่น z1320
3. ตั้งค่าการพิมพ์ในโหมดการพิมพ์รูปภาพและสร้างกรอบสีดำขนาดกว้าง 3.0 ยาว 5.0 เซนติเมตร ในโปรแกรม Microsoft Word และบันทึกไฟล์

4. เปิดกรอบพลาสติกด้านหน้าเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตออกเพื่อง่ายต่อการทำความสะอาด
5. ถอดลูกกลิ้งตรงกลางในเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตออก

3.5.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ต

1. ตัดผ้าคาร์บอน E-tek ขนาด 2.3 x 4.6 ตารางเซนติเมตร
2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก
3. นำผ้าคาร์บอนติดลงบนกระดาษขาวขนาด A4 โดยใช้เทปกาวสองหน้าให้อยู่ภายในกรอบที่ถูกกำหนดไว้
4. นำหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ใส่ลงในตลับหมึกพิมพ์แล้วปิดฝาตลับ
5. ติดตั้งตลับหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต
6. นำแผ่นกระดาษขาวขนาด A4 ที่ติดผ้าคาร์บอนใส่ในถาดรับกระดาษ
7. เปิดไฟล์ที่มีกรอบสีดำที่บันทึกไว้ จากนั้นดำเนินการสั่งพิมพ์
8. ใช้ไดร์เป่าความร้อนเป่าให้ผ้าคาร์บอนหลุดออกจากกระดาษขาว จากนั้นอบขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
9. นำขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการอบแล้วแช่ในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อล้างเอทิลีนไกลคอลออก จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณแพลทินัมตาม ภาคผนวก ก ก่อนเก็บในโถดูดความชื้น แล้วนำไปเตรียมเป็นหน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าต่อไป

3.5.5 การปรับสภาพเยื่อแผ่นเนฟิออน

1. ตัดเยื่อแผ่นให้ได้ขนาด 5 x 5 ตารางเซนติเมตร สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเดี่ยว และขนาด 13x13 ตารางเซนติเมตร สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ
2. แช่เยื่อแผ่นในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
3. แช่เยื่อแผ่นในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารอินทรีย์

4. แช่เยื่อแผ่นในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดไอออนของโลหะ
5. แช่เยื่อแผ่นในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อล้างคลอไรด์ไอออน
6. นำเยื่อแผ่นออกมาวางบนจานเพาะเชื้อและเก็บในโถดูดความชื้น

3.5.6 การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า (Membrane Electrode Assembly)

1. นำพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น ฟิล์มไมลาร์ ที่มีความหนาประมาณ 0.125 มิลลิเมตร มาตัดเจาะช่องตรงกลางให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 2.3 x 2.3 ตารางเซนติเมตร
2. นำกาวสองหน้ามาติดที่มุมทั้ง 4 ของแผ่นฟิล์มไมลาร์ 1 แผ่น แล้วนำไปติดลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับกดร้อน
3. ตัดขั้วไฟฟ้าออกเป็น 2 ชิ้นขนาดเท่าๆกัน 2.3x 2.3 ตารางเซนติเมตร ใช้พู่กันทาสารละลายเนฟิออนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ลงบนด้านที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ให้ชุ่ม
4. จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าไปวางบนแผ่นฟิล์มไมลาร์ที่เตรียมไว้
5. นำเยื่อแผ่นที่ผ่านการปรับสภาพมา ประกบกับขั้วไฟฟ้าที่ทาสารละลายเนฟิออนแล้วโดยให้ขั้วไฟฟ้าอยู่ตรงกึ่งกลางของเยื่อแผ่น
6. นำแผ่นขั้วไฟฟ้าอีกชิ้นหนึ่ง มาทำตามขั้นตอนที่ 3 และ 4
7. นำแผ่นขั้วไฟฟ้ามาประกบอีกด้านของเยื่อแผ่น โดยวางให้ตรงกับแผ่นขั้วไฟฟ้าที่ประกบกับเยื่อแผ่นไว้แล้ว
8. นำแผ่นฟิล์มไมลาร์ที่ติดกาวสองหน้าอีกอันมาวางให้ตรงกับแผ่นขั้วไฟฟ้าแผ่นที่สอง
9. แล้วจึงนำเหล็กกล้าไร้สนิมอีกแผ่นมาประกบแล้วกดอัดด้วยเครื่อง Compression mould โดยอัดด้วยความร้อน ที่ความดัน 65 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 วินาที และอัดด้วยความเย็น โดยใช้ความดัน 65 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 150 วินาที

10. เก็บชุดหน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า ที่เตรียมได้ในโถดูดความชื้นก่อนทดสอบสมรรถนะ

3.5.7 การประกอบหน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ

1. นำขั้วไฟฟ้ามาตัดเป็นวงกลมขนาดพื้นที่ 0.713 ตารางเซนติเมตร จำนวน 25 ชิ้น โดยใช้เหล็กเจาะรูขนาด 3/8” สำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าด้านแถวลำดับ
2. ตัดขั้วไฟฟ้าให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตรสำหรับใช้ในด้านตรงข้าม
3. นำพลาสติกที่ทนความร้อน เช่น ฟิล์มไมลาร์ ที่มีความหนาประมาณ 0.125 มิลลิเมตร มาเจาะรูเป็นรูปวงกลมที่มีขนาด 0.713 ตารางเซนติเมตร จำนวน 5 แถว แถวละ 5 ช่อง โดยใช้เหล็กเจาะรูขนาด 3/8” และนำฟิล์มไมลาร์อีกแผ่นมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร
4. นำกาวสองหน้ามาติดที่มุมทั้ง 4 ของแผ่นฟิล์มไมลาร์แผ่นที่เจาะเป็นรูปสี่เหลี่ยม แล้วนำไปติดลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับกดร้อน
5. จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าใน ข้อ 2 ไปวางที่ช่องในแผ่นฟิล์มไมลาร์ที่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม
6. นำเยื่อแผ่นที่ผ่านการปรับสภาพมา ประกบกับขั้วไฟฟ้า โดยให้ขั้วไฟฟ้าอยู่ตรงกึ่งกลางของเยื่อแผ่น
7. นำแผ่นฟิล์มไมลาร์ที่ถูกเจาะเป็นวงกลม 25 ช่อง ที่ติดกาวสองหน้าอีกอันมาวางให้ตรงกับแผ่นขั้วไฟฟ้าอีกด้าน
8. นำแผ่นขั้วไฟฟ้าจากข้อที่ 1 มาวางเรียงในรูวงกลมทั้ง 25 ช่อง โดยให้ด้านที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาหันเข้าหาเยื่อแผ่น
9. จากนั้นนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอันมาประกบทับขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งก่อนกดอัดด้วยเครื่อง Compression mold โดยอัดด้วยความร้อนที่ความดัน 85 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 300 วินาที และอัดด้วยความเย็น โดยใช้ความดัน 85 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 900 วินาที
10. เก็บชุดหน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอการทดสอบสมรรถนะ

3.6 การวัดสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

3.6.1 การประกอบเป็นเซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิง

1. ประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้าขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร เข้ากับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้า (Collector plate) ทั้ง 2 ด้าน โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ในด้านแคโทด
2. ใช้แผ่นยางซิลิโคนป้องกันการรั่วของแก๊ส โดยนำมาวางไว้ระหว่างหน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้ากับแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน
3. ยึดแผ่นสะสมกระแสไฟฟ้าตามด้วยแผ่นปิดท้าย (End plate) เข้ากับหน่วยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านเข้าด้วยกันโดยใช้น๊อต จากนั้นจึงใช้ประแจปอนด์อัดส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยใช้โมเมนต์การหมุนที่ 40 ปอนด์แรง-นิ้ว
4. นำเซลล์เดี่ยวที่ได้ไปติดตั้งในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง และทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงต่อไป

3.6.2 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

3.6.2.1 ขั้นตอนก่อนการทดสอบสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง

1. ตรวจสอบวาล์วขาเข้า (Intake valve) ของแก๊สแต่ละชนิดให้เปิดปิดอยู่ในทิศทางตามต้องการโดยต้องป้องกันการไหลปนกันของแก๊สต่างชนิดและปิดวาล์วขาออก (Outlet valve)
2. ตรวจสอบความเรียบร้อยของข้อต่อต่าง ๆ ในหน่วยทดสอบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมทำการทดลอง
3. ตรวจระดับน้ำภายในส่วนระเหยน้ำภายในระบบให้ความชื้น โดยดูจากส่วนจัดหาน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (ให้ปริมาณน้ำภายในส่วนจัดหาน้ำท่วมท่อที่เชื่อมต่อกับด้านล่างของส่วนระเหยน้ำ แต่สูงไม่ถึงท่อที่เชื่อมต่อกับด้านข้างของส่วนระเหยน้ำ)
4. ตรวจสอบเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังแก๊สทุกถังให้อยู่ในตำแหน่งปิด
5. ตรวจสอบวาล์วควบคุมความดันกลับให้อยู่ในตำแหน่งปิด
6. ตรวจสอบสายไฟที่ต่อจากขั้วไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 2 ขั้วที่ต่อมายังเครื่อง Electronic load ว่าให้อยู่ในสภาพที่ต่อเรียบร้อย

7. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่องวัดอุณหภูมิ
8. เปิดเครื่องตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนเพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในกรณีที่เกิดการรั่วของแก๊สไฮโดรเจน
9. เปิดสวิตช์หลักของเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 15 นาทีก่อนทำการทดลอง
10. เปิดสวิตช์เครื่อง Electronic Load เพื่ออุ่นเครื่องประมาณ 30 นาทีก่อนทำการทดลอง
11. เปิดสวิตช์หลัก (Main Switch) ที่แผงควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้าที่ แล้วจึงเปิดสวิตช์เครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง แล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงตามต้องการ (60 องศาเซลเซียส) และเปิดสวิตซ์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวภายในหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง รอจนอุณหภูมิเท่ากับค่าที่ตั้งไว้
12. ตั้งค่าอัตราการไหลตามต้องการ (100 sccm) โดย Channel 1 ใช้สำหรับแก๊สออกซิเจนหรืออากาศ และ Channel 2 สำหรับแก๊สไฮโดรเจน ส่วนของแก๊สไนโตรเจนจะใช้ทั้งสอง Channel โดยสับทางเดินของแก๊ส โดยใช้วาล์วขาเข้าควบคุมทิศทางการไหลของแก๊ส
13. เมื่อต้องการจะป้อนแก๊สให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ให้เปิดแก๊สที่ต้องการใช้ที่วาล์วหัวถังของแก๊ส แล้วจึงเปิดเครื่องควบคุมความดันที่หัวถังให้ได้ความดันตามต้องการ ซึ่งโดยปกติเท่ากับ 50 แรงปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วจึงมาเปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหลแต่ละ Channel เพื่อให้แก๊สไหลเข้าสู่หน่วยทดสอบ
14. ก่อนจะทำการทดลองควรผ่านแก๊สไนโตรเจนกับหน่วยทดสอบประมาณ 20 นาที โดยตั้งอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 2 Channel ไว้ที่ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที ก่อนด้วยสาเหตุดังนี้
    - เพื่อเป็นการไล่สิ่งที่ตกค้างอยู่ภายในหน่วยทดสอบออกก่อน
    - เพื่อตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำยาในการตรวจสอบการรั่วภายในหน่วยทดสอบ
    - เพื่อใช้วัดความชื้นของแก๊สก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงที่ส่วนวัดความชื้น

3.6.2.2 การทดสอบ polarization curve ของเซลล์เชื้อเพลิง

1. เมื่อมีการป้อนแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง รอจนกระทั่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าคงที่
2. หมุนปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เครื่อง Electronic Load เพื่อบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิง โดยปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นจาก 0.1 โวลต์จนถึง 0.9 โวลต์ ทำการทดสอบซ้ำอีก 3-4 ครั้ง

3.6.2.3 การทดสอบอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าเคมี

1. กำหนดอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงและหน่วยให้ความชื้นของแก๊สป้อนทั้งสองข้างอยู่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
2. เปิดโปรแกรม FRA (Frequency response analyzer)
3. ตั้งค่าการทดสอบ โดยทดสอบที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.8 โวลต์ ความถี่ 50 มิลลิเฮิรตซ์ ไปจนถึง 1 กิโลเฮิรตซ์
4. เริ่มทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ
5. คำนวณผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความต้านทานของเซลล์เชื้อเพลิง

3.6.2.4 การทดสอบ cyclic voltametry ของเซลล์เชื้อเพลิง

1. กำหนดอุณหภูมิการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและปริมาณความชื้นของแก๊สป้อนทั้งสองข้างมาที่ภาวะอุณหภูมิห้อง
2. ป้อนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สไนโตรเจน และปิดแก๊สไฮโดรเจนให้มีความดันหัวถังอยู่ที่ 50 แรงปอนด์ต่อตารางนิ้ว
3. เปิดเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สโดยให้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สไนโตรเจนมีอัตราการไหลที่ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที ที่ภาวะมาตรฐาน
4. เปิดโปรแกรม GPES และตั้งค่าการวิเคราะห์ โดยช่วงความต่างศักย์ตั้งแต่ 0.01 โวลต์ จนถึง 0.8 โวลต์
5. เริ่มทดสอบและบันทึกผลการทดลอง
6. คำนวณเพื่อหาพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยา

3.6.3 ขั้นตอนภายหลังการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

1. เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบที่เครื่อง Electronic Load ทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้
2. ปิดสวิตช์วาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล แล้วจึงปิดวาล์วที่หัวถังแก๊สทุกถัง
3. ปิดวาล์วขาเข้าทุกตัว และค่อยๆ เปิดวาล์วขาออกทีละตัว เพื่อลดความดันจากแก๊สที่ค้างอยู่ในท่อระหว่างถังแก๊สกับเครื่องวัดอัตราการไหล โดยที่วาล์วขาออกจะต่อท่อลงไปยังขวดที่มีน้ำอยู่เพื่อลดการแพร่กระจายของแก๊ส รอจนเกจความดันที่เครื่องควบคุมความดันที่ถังแก๊สลดลงจนถึง 0 ทั้งขาเข้าและขาออก แล้วจึงเปิดวาล์วขาออกของแก๊สอีกถังหนึ่ง ทำในลักษณะเดียวกัน
4. เมื่อลดความดันในท่อแก๊สหมด จึงทำการปิดวาล์วขาออกของแก๊สทุกตัว
5. ปิดสวิตช์ของตัวให้ความร้อนทุกตัวที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งกระแสไฟฟ้า
6. ปิดสวิตช์ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงที่แผงสวิตช์ควบคุมแหล่งไฟฟ้า แล้วจึงปิดสวิตช์หลัก

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้พัฒนากระบวนการพอกพูนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนลงบนชั้นแพร่แก๊สโดยใช้เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊ส ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการขยายส่วนการผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดใหญ่ โดยศึกษาสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้าและเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีสมบัติใกล้เคียงกับหมึกพิมพ์ทางการค้าและเหมาะสมกับการพิมพ์ และเปรียบเทียบสมรรถนะของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้จากวิธีการพิมพ์กับวิธีการเตรียมอื่นๆ เช่นการทาและการสเปรย์ อีกทั้งทดสอบความสามารถในการขยายส่วนการผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าเป็นขนาด 100 ตารางเซนติเมตร

4.1 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอน

4.1.1 การหาสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้า

ในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะนำมาใช้ในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊สให้ได้นั้น จะต้องศึกษาสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้าเพื่อให้หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นนั้นมีความเหมาะสมกับการพิมพ์ สมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้าที่ต้องศึกษา เช่น ความหนืด แรงตึงผิวและขนาดอนุภาคเฉลี่ย เพื่อนำสมบัติเหล่านี้มาเป็นเกณฑ์ในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีสมบัติใกล้เคียงหมึกพิมพ์ทางการค้า ซึ่งทำให้กระบวนการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตสามารถพิมพ์หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ต่อเนื่องและไม่มีการอุดตันที่หัวพิมพ์ จึงได้นำหมึกพิมพ์ทางการค้าจากตลับหมึก Lexmark รุ่น 28A มาวัดความหนืดโดยใช้หลอดวัดความหนืดและทดสอบแรงตึงผิวโดยใช้เครื่องวัดแรงตึงผิว (Kruss Model : K8) ซึ่งสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้าโดยทั่วไปจะมีช่วงความหนืดอยู่ที่ 1-4 เซนติพอยส์ และค่าแรงตึงผิว 30-35 มิลลินิวตัน/เมตร [23] ผลการทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้าแสดงในตารางที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 สมบัติหมึกพิมพ์ทางการค้าของตลับหมึกพิมพ์รุ่น 28A ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	1	2	3	4	5
ความหนืด (cP)	3.32	3.38	3.34	3.36	3.35
ค่าแรงตึงผิว(mN/m)	34.5	35.0	35.2	34.6	35.41

จากการทดสอบหาสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้า พบว่าหมึกพิมพ์ทางการค้ามีความหนืดเฉลี่ยอยู่ที่ 3.35 เซนติพอยส์ และค่าแรงตึงผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 34.95 มิลลินิวตัน/เมตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าความหนืดและแรงตึงผิวที่วัดได้อยู่ในช่วงบนของสมบัติหมึกพิมพ์ทางการค้าโดยทั่วไป ดังนั้นหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะเตรียมขึ้น จึงควรมีสมบัติของความหนืดและแรงตึงผิวใกล้เคียงกับสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้าจากตลับ Lexmark รุ่น 28A

4.1.2 การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

หมึกพิมพ์ที่เตรียมนั้นประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอน สารละลายเนฟิออน (Nafion117) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 1,2-ไดเมทอกซีอีเทน (1,2-Dimethoxyethane) เอทิลีนไกลคอลและน้ำปราศจากประจุ โดยกำหนดอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารละลายเนฟิออนคงที่ที่ร้อยละ 33 ของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา และทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ 1,2-ไดเมทอกซีอีเทน เอทิลีนไกลคอล และน้ำปราศจากประจุ จากนั้นจึงนำหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มาทดสอบหาความหนืดและแรงตึงผิวด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น เพื่อหาสูตรของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติของความหนืดและค่าแรงตึงผิวใกล้เคียงกับสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้า ดังตารางที่ 4.3

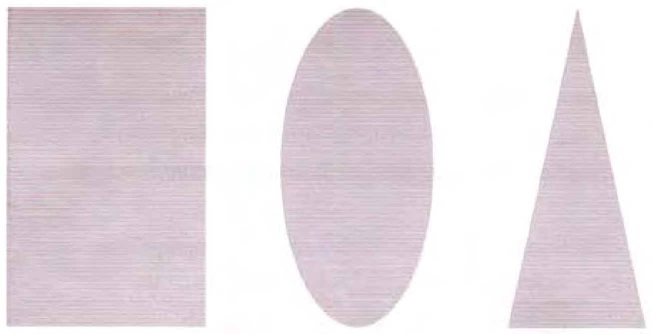
ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบและสมบัติของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ส่วนประกอบ	1	2	3	4	5
ตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	0.025	0.025	0.025	0.05	0.05
สารละลายเนฟิออน (มิลลิลิตร)	0.283	0.283	0.283	0.568	0.568
1,2-ไดเมทอกซีอีเทน (มิลลิลิตร)	6	7	8	6	1.5
เอทิลีนไกลคอล (มิลลิลิตร)	4	3	2	4	4
น้ำปราศจากประจุ (มิลลิลิตร)	2.5	2.5	2.5	2.5	7
ความหนืด (เซนติพอยส์)	2.81±0.03	2.64±0.02	2.42±0.04	3.16±0.04	3.23±0.03
แรงตึงผิว (มิลลินิวตันต่อเมตร)	32.2±1.1	31.2±1.3	30.5±0.8	33.1±1.1	33.8±1.4

ในการเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ได้กำหนดปริมาณรวมของส่วนประกอบของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 12 -15 มิลลิลิตร เพื่อให้สามารถเติมลงในตลับหมึกพิมพ์ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ได้อย่างพอเหมาะและเติมสารละลายเอทิลีนไกลคอลและน้ำปราศจากประจุเพื่อปรับสมบัติของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ได้สมบัติตามต้องการ จากตารางที่ 4.3 หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาในสูตรที่ 1 ถึง 3 ได้กำหนดให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและสารละลายเนฟิออนคงที่แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณของ 1,2-ไดเมทอกซีอีเทน เอทิลีนไกลคอล และน้ำปราศจากประจุ พบว่าสูตรที่ 1 มีสมบัติใกล้เคียงหมึกพิมพ์ทางการค้ามากกว่าสูตรที่ 2 และ 3 แต่เกิดปัญหาหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาจางเกินไปและความสามารถในการพิมพ์ยังขาดความต่อเนื่องดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 ลักษณะการพิมพ์ที่ขาดความต่อเนื่องของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาสูตรที่ 1

จากนั้นจึงเปลี่ยนปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและสารละลายเนฟิออนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และกำหนดปริมาณของสารละลายตัวอื่นคงที่แสดงในสูตรที่ 4 พบว่าหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นและมีความสามารถในการพิมพ์ได้อย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4.2



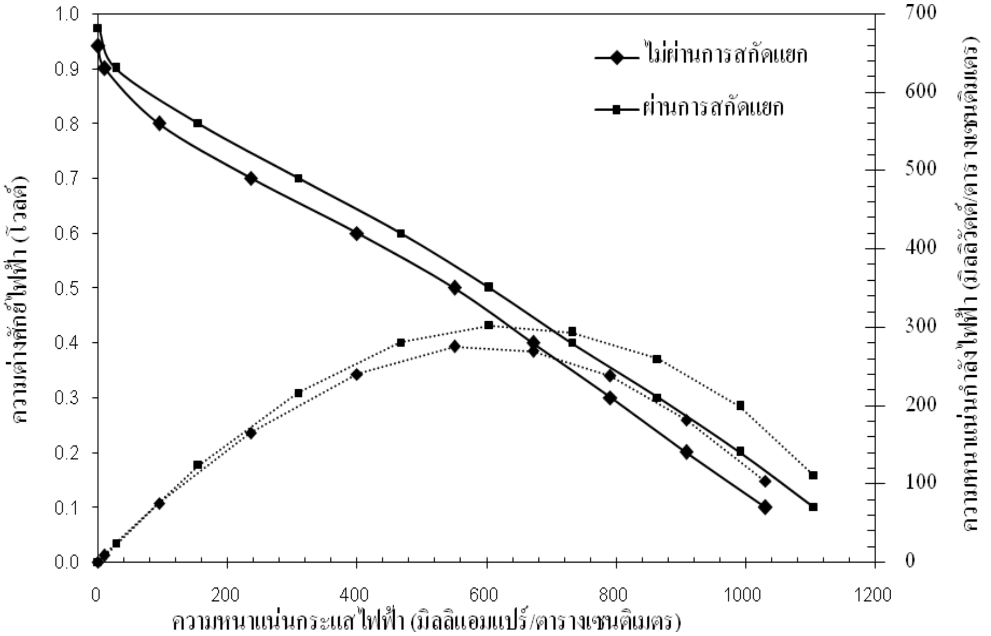
รูปที่ 4.2 ลักษณะการพิมพ์อย่างต่อเนื่องของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาสูตรที่ 4

เนื่องจากสารละลาย 1,2-ไดเมทอกซีอีเทนมีสมบัติความหนืดน้อยกว่าน้ำปราศจากประจุเล็กน้อยและมีราคาค่อนข้างสูง จึงทำการเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างสารละลาย 1,2-ไดเมทอกซีอีเทนกับน้ำปราศจากประจุ โดยเลือกใช้ปริมาณของ 1,2-ไดเมทอกซีอีเทนน้อยที่สุดที่ยังคงความสามารถในการทำละลายผงตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ และกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เนฟิออน และเอทิลีนไกลคอลคงที่ไว้ตามสูตรที่ 4 พบว่าหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาในสูตรที่ 5 มีสมบัติความหนืดอยู่ที่ 3.23 เซนติพอยส์ และค่าแรงตึงผิวเท่ากับ 33.8 มิลลินิวตันต่อเมตร ซึ่งหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้นี้มีสมบัติใกล้เคียงกับสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้าทั่วไป อีกทั้งยังลดปริมาณการใช้สารละลาย 1,2-ไดเมทอกซีอีเทนที่มีราคาสูงลงได้ และมีความเข้มของหมึกพิมพ์และมีการพิมพ์ได้อย่าง

4.1.3 อิทธิพลของเอทิลีนไกลคอลในหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีสมบัติใกล้เคียงกับหมึกพิมพ์อิงก์เจ็ตได้ผสมสารละลายเอทิลีนไกลคอลลงไปในสารละลายหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เพื่อช่วยปรับสมบัติความหนืดและค่าแรงตึงผิวทำให้หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติใกล้เคียงกับหมึกพิมพ์ทางการค้า

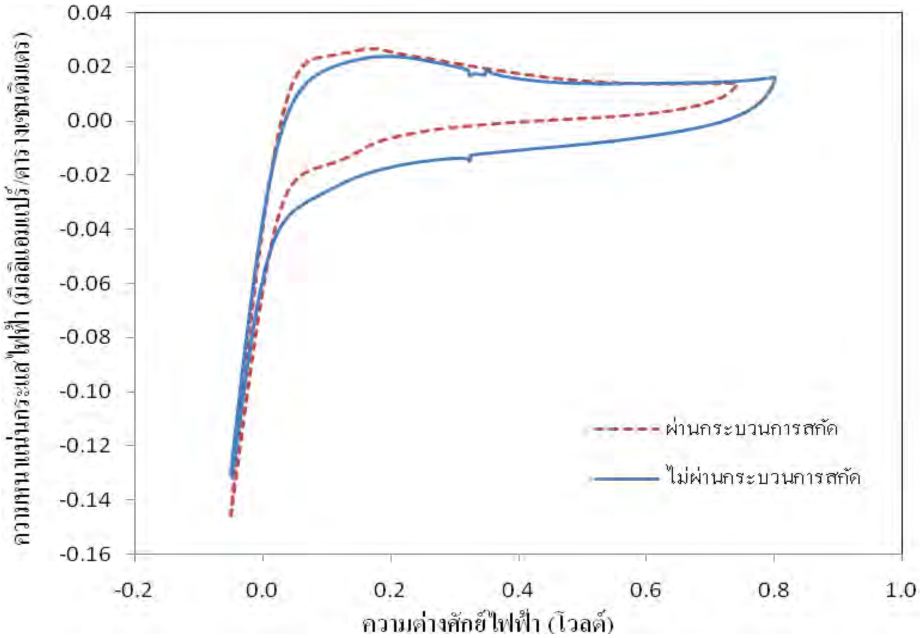
และทำให้ผงตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายอยู่ในหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวที่ดี ไม่เกิดการรวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ตกตะกอนช้าและระเหยยากขึ้น จากผลการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ระหว่างเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีการทาตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊ส โดยให้แผ่นหนึ่งผ่านขั้นตอนการสกัดแยกเอทิลีนไกลคอลออกโดยการแช่ขั้วไฟฟ้าที่ใช้หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ในน้ำอุ่นอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาทีแล้วนำไปอบแห้ง กับแผ่นที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการสกัดแยกเอทิลีนไกลคอลออก ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการสกัดแยกและไม่ผ่านการสกัดแยกเอทิลีนไกลคอลออก

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการสกัดแยกเอทิลีนไกลคอลให้สมรรถนะสูงกว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการสกัดแยกเอทิลีนไกลคอลประมาณ 67 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการสกัดแยกเอทิลีนไกลคอลออกมีค่า 0.974 โวลต์ แต่เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ไม่ผ่านกระบวนการสกัดมีค่าเพียง 0.941 โวลต์ เนื่องจากเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการสกัดมีขนาดช่องว่างเฉลี่ยเท่ากับ 0.229 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดช่องว่างเล็กกว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการสกัดที่มีขนาดช่องว่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.612 ไมโครเมตร ทำให้เกิด crossover น้อยทำให้มีศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดที่มากกว่า เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 พื้นที่ผิวในการ

เกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการสกัดเอทิลีนไกลคอลออกมีพื้นที่ 18.13 ตารางเมตรต่อกรัม มากกว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการสกัดที่มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 12.54 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นผลมาจากสารละลายเอทิลีนไกลคอลที่มีจุดเดือดสูงและไม่สามารถขจัดออกหมดด้วยการการอบแห้ง ไปปกคลุมพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้แก๊สเชื้อเพลิงไม่สามารถผ่านเข้าไปยังผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาได้ส่งผลให้ได้สมรรถนะน้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการสกัดแยกเอทิลีนไกลคอลออก



รูปที่ 4.4 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการสกัดและไม่ได้ผ่านกระบวนการสกัด

4.2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนลงบนชั้นแพร่แก๊สโดยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ต

เมื่อเตรียมหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาจนมีสมบัติใกล้เคียงกับหมึกพิมพ์ทางการค้าแล้ว ได้พิมพ์หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนลงบนชั้นแพร่แก๊ส โดยใช้เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต แบบเทอร์มอลอิงก์เจ็ต (Thermal Inkjet) ยี่ห้อ Lexmark รุ่น Z1320 โดยการพิมพ์หมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊สซ้อนทับกันจนได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามต้องการ

คือ 0.5 มิลลิกรัมแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร โดยจำนวนครั้งของการพิมพ์ต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น แสดงในตารางที่ 4.4

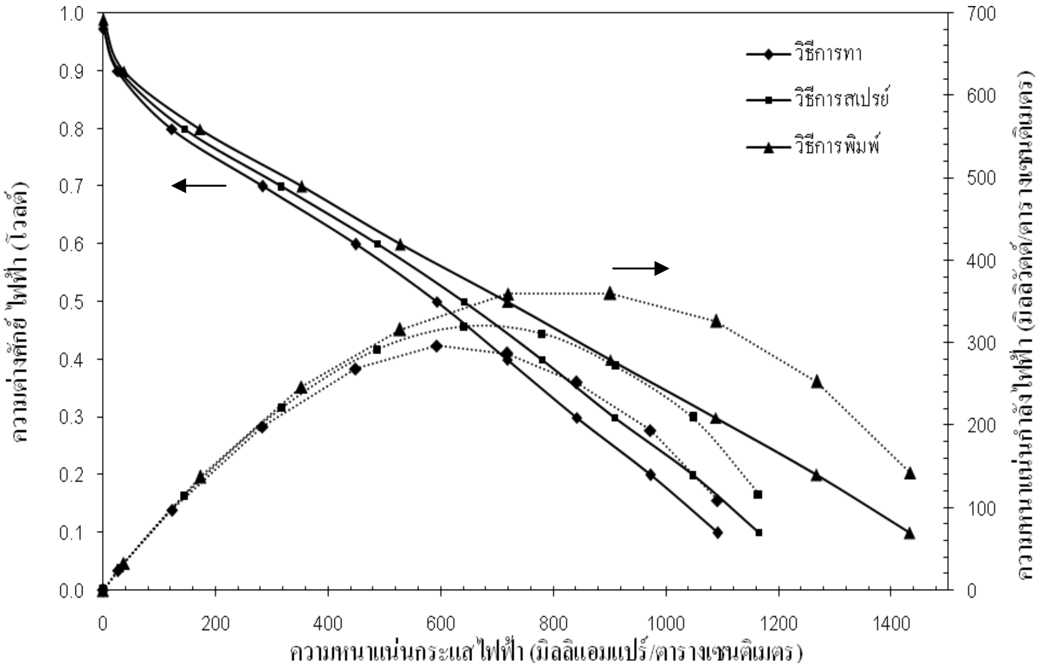
ตารางที่ 4.3 จำนวนครั้งการพิมพ์และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น (พื้นที่ 10 ตารางเซนติเมตร)

จำนวนครั้งที่พิมพ์	นน.ขั้วไฟฟ้าก่อนพิมพ์ (กรัม/ตารางเซนติเมตร)	นน.ขั้วไฟฟ้าหลังพิมพ์ (กรัม/ตารางเซนติเมตร)	นน.ขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ตารางเซนติมเตร)
0	0.2090	0.2090	0.0000
40	0.2090	0.2102	0.0012
80	0.2102	0.2114	0.0024
120	0.2113	0.2124	0.0035
		นน.เฉลี่ยต่อการพิมพ์ 40 ครั้ง	0.0012

เมื่อนำชั้นแพร่แก๊สขนาด 10 ตารางเซนติเมตร มาผ่านการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาตามด้วยการสกัดเอทิลีนไกลคอลและอบแห้งแล้วชั่งน้ำหนักทุกๆ การพิมพ์ 40 ครั้ง พบว่าจะมีน้ำหนักเฉลี่ยของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 0.12 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงทำให้สามารถคาดคะเนจำนวนครั้งในการพิมพ์สำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าให้ได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามต้องการได้จากน้ำหนักเฉลี่ยต่อจำนวนครั้งการพิมพ์ ทำให้เกิดความรวดเร็วในการเตรียมขั้วไฟฟ้าและไม่ทำให้เกิดปัญหาการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเกินความต้องการ ทำให้การเตรียมครั้งต่อๆ ไปไม่ต้องผ่านขั้นตอนอบแห้งและการชั่งน้ำหนักเหมือนวิธีการทาและวิธีสเปรย์ ซึ่งต้องอบและชั่งซ้ำจนกว่าจะได้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตามต้องการ

4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีต่างๆ

เมื่อนำเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตไปทดสอบสมรรถนะเปรียบเทียบกับเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีทาและวิธีสเปรย์ โดยกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัมบนตัวรองรับคาร์บอนเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นนำไปทดสอบหาสมรรถนะในเซลล์เชื้อเพลิงและวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

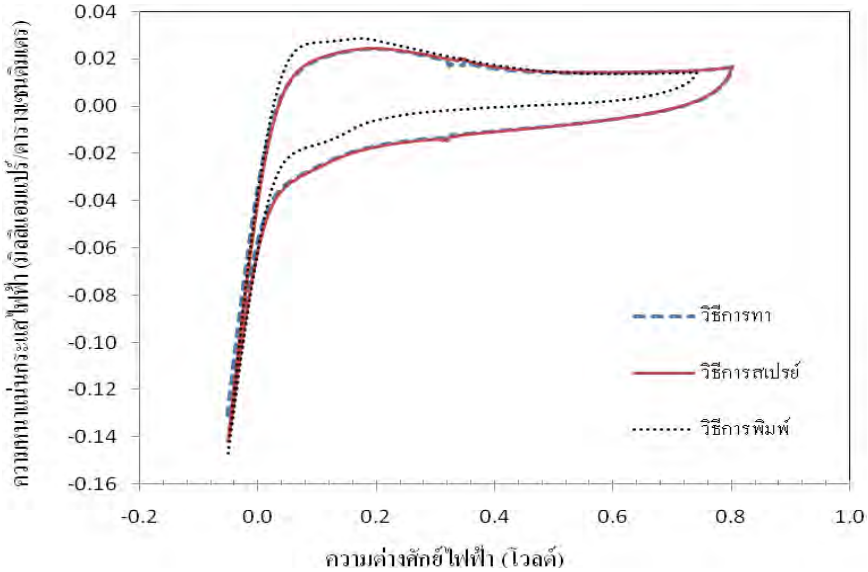


รูปที่ 4.5 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้จากวิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด คือ 537 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ที่ 0.6 โวลต์) มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.979 โวลต์ โดยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้จากทั้ง 3 วิธีมีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดใกล้เคียงกัน วิธีการสเปรย์ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 487 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ที่ 0.6 โวลต์) มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.975 โวลต์ วิธีการทาให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 467 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (ที่ 0.6 โวลต์) มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.974 โวลต์

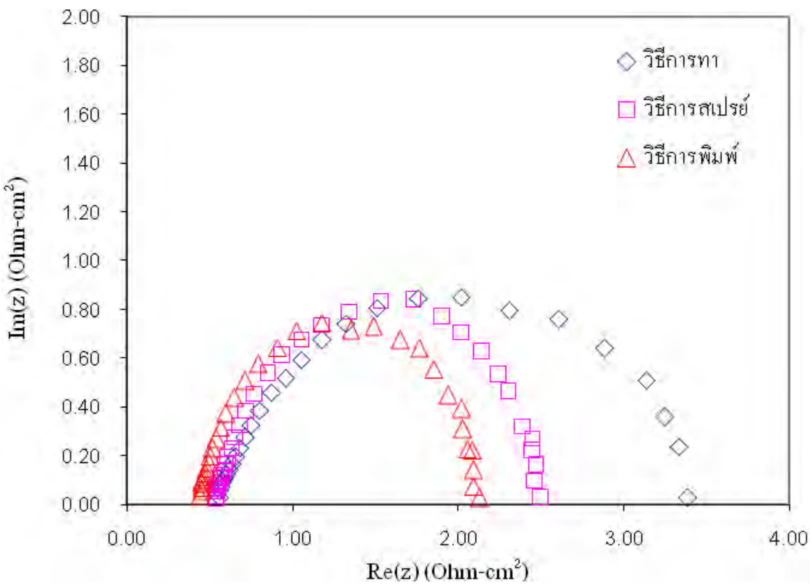
นอกจากนี้พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีทั้งสามมีความแตกต่างกันใน 2 ช่วง คือ ช่วงของการสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Activation loss) และการสูญเสียเนื่องจากโอห์มมิก โดยจากการวิเคราะห์รูปที่ 4.6 พบว่าพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด คือ 23.21 ตารางเมตรต่อกรัม โดยวิธีการสเปรย์ให้ผลที่รองลงมามีค่า 20.62 ตารางเมตรต่อกรัม และวิธีการทานั้นมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาน้อยที่สุดมีค่า 18.13 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากด้านบนของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ซึ่งพบชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี

การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนชั้นแพร่แก๊สอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.8 ไม่มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนหนา ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าวิธีอื่นๆ ส่งผลให้มีความสูญเสียช่วงการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่ำทำให้มีสมรรถนะที่สูง ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทาพบว่าการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ จึงเห็นกลุ่มก้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นชั้นหนาและบางส่วนมีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบางๆอยู่บนผิวของชั้นแพร่แก๊สส่งผลทำให้มีสมรรถนะที่ต่ำ

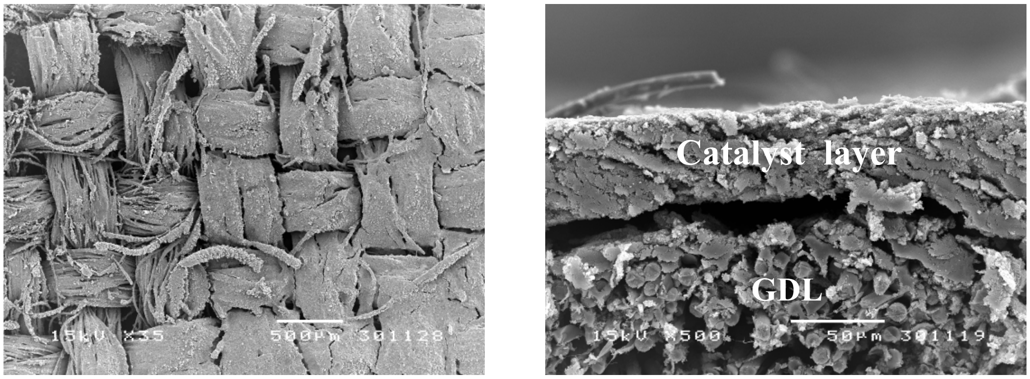


รูปที่ 4.6 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีต่างๆ

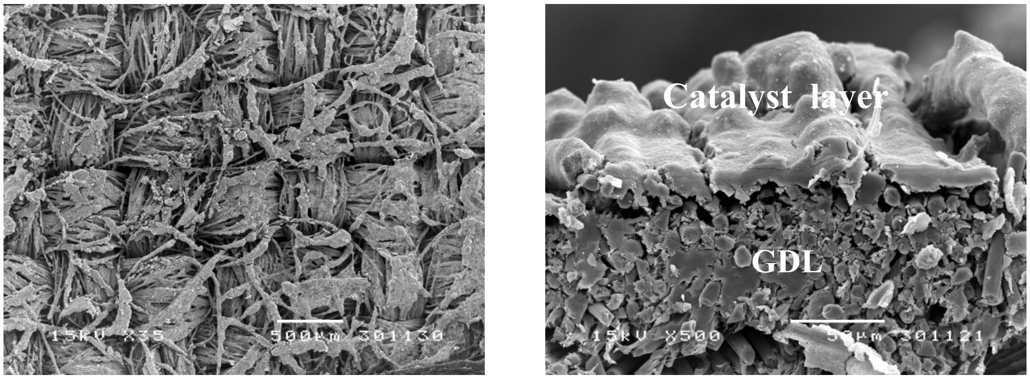
สำหรับการสูญเสียเนื่องจากโอห์มมิก (Ohmic loss) ของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์มีความแตกต่างจากการเตรียมอีกสองวิธี อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากวิธีการพิมพ์สามารถควบคุมการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีและไม่จับตัวเป็นกลุ่มก้อนทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาในขนาดอนุภาคที่เล็ก จึงทำให้ได้ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่บางกว่า โดยชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์มีความหนาเฉลี่ย คือ 0.709±0.002 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้วิธีการพิมพ์มีความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ 0.451 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.7 ส่วนวิธีการทาและวิธีการสเปรย์มีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 0.725±0.013 และ 0.719±0.012 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำให้เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทาและวิธีการสเปรย์มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน คือ วิธีการสเปรย์มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ที่ 0.548 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร โดยที่เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทามีความต้านทานทางไฟฟ้าของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยามากที่สุด คือ 0.570 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร



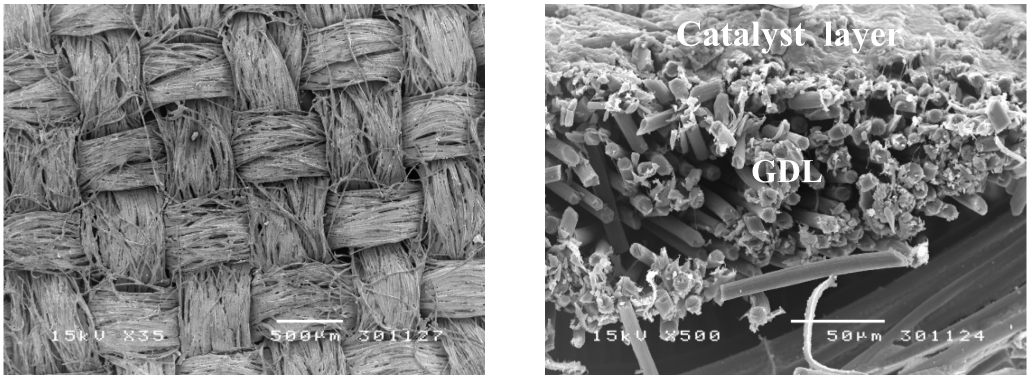
รูปที่ 4.7 กราฟ impedance แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ



ก).



ข).



ค).

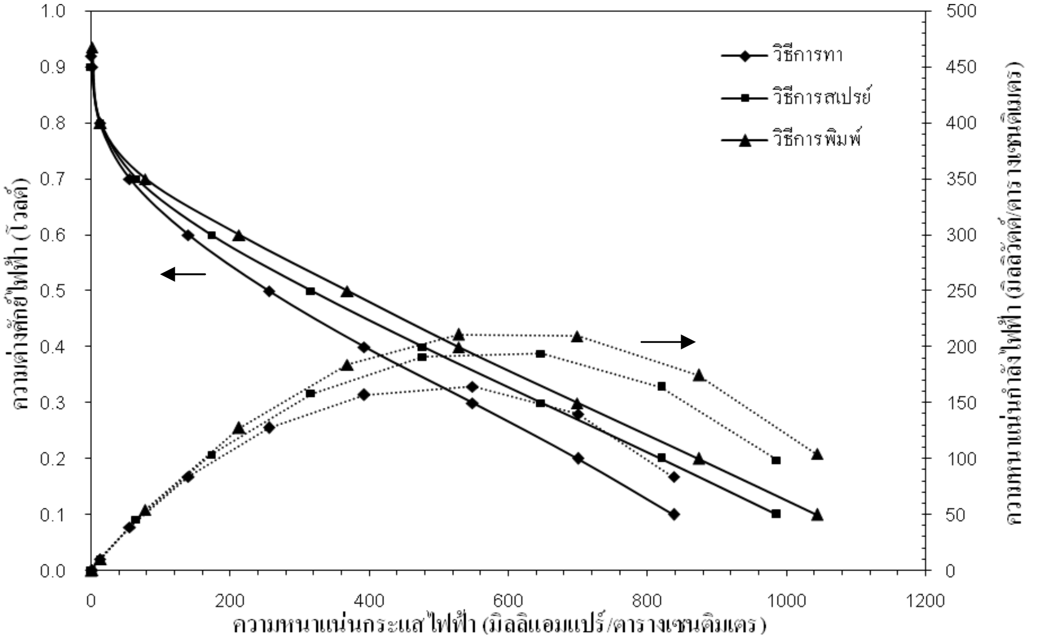
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้านบนและภาพตัดขวางของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) วิธีการทา (ข) วิธีการสเปรย์ (ค) วิธีการพิมพ์

4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอน

งานวิจัยตอนนี้เป็นการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์ ปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนในส่วนนี้มี 3 ความเข้มข้น คือ ร้อยละ 5, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งแต่ละความเข้มข้นจะศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการต่างๆ คือ การทา การสเปรย์และการพิมพ์

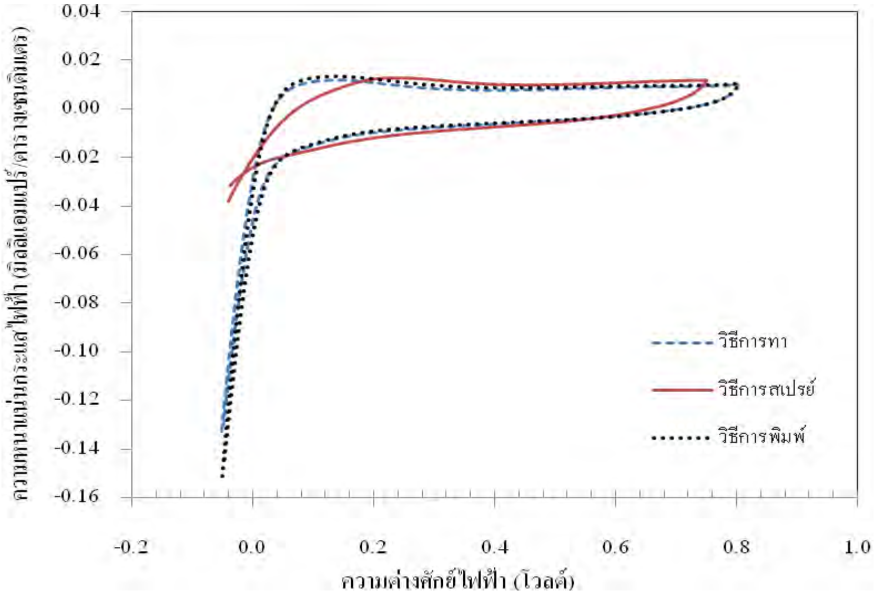
4.4.1 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ในการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าในการทดลองนี้ จะใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมแพลทินัมรูทิเนียมต่อตารางเซนติเมตรเป็นขั้วไฟฟ้าด้านแคโทดและขั้วไฟฟ้าด้านแอโนดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากันกับด้านแคโทดที่โดยเตรียมด้วยวิธีการพิมพ์จากนั้นนำไปทดสอบสมรรถนะในเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 4.9 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

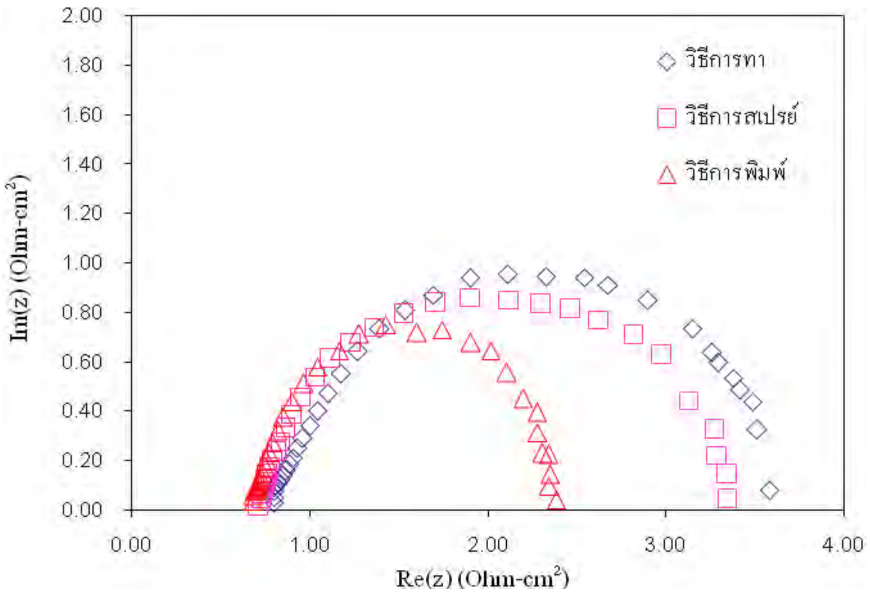
จากรูปที่ 4.9 พบว่า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียม เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้จากวิธีการพิมพ์ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 213 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์ร้อยละ 23.1 และวิธีการทาร้อยละ 52.1 และมีความแตกต่างในช่วงการสูญเสียทางปฏิกิริยาเคมีเพียงเล็กน้อย โดยเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ 8.95 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าวิธีการสเปรย์ที่มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 8.59 ตารางเมตรต่อกรัม และวิธีการทามีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 8.38 ตารางเมตรต่อกรัม ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 พบว่า กราฟแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าของวิธีการพิมพ์และวิธีการสเปรย์มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และความต้านทานของทั้งสองวิธีมีความแตกต่างจากวิธีการทาอย่างมากมาก เนื่องจากความหนาเฉลี่ยของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์และวิธีการสเปรย์มีความใกล้เคียงกัน คือ 0.811±0.004 และ 0.813±0.02 มิลลิเมตร ตามลำดับซึ่งทำให้มีความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ที่ 0.684 โอห์มต่อตารางเซนติเมตรและ 0.717 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนวิธีการทานั้นมีชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาหนามากที่สุดคือความหนาเฉลี่ย

เท่ากับ 0.824±0.03 มิลลิเมตร ส่งผลทำให้มีเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทามีความต้านทานทางไฟฟ้ามากที่สุดคือ 0.796 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ทำให้กราฟโพราไรเซชั่นของวิธีการทามีช่วงการสูญเสียทางไฟฟ้ามากกว่าวิธีอื่นๆ ดังรูปที่ 4.9



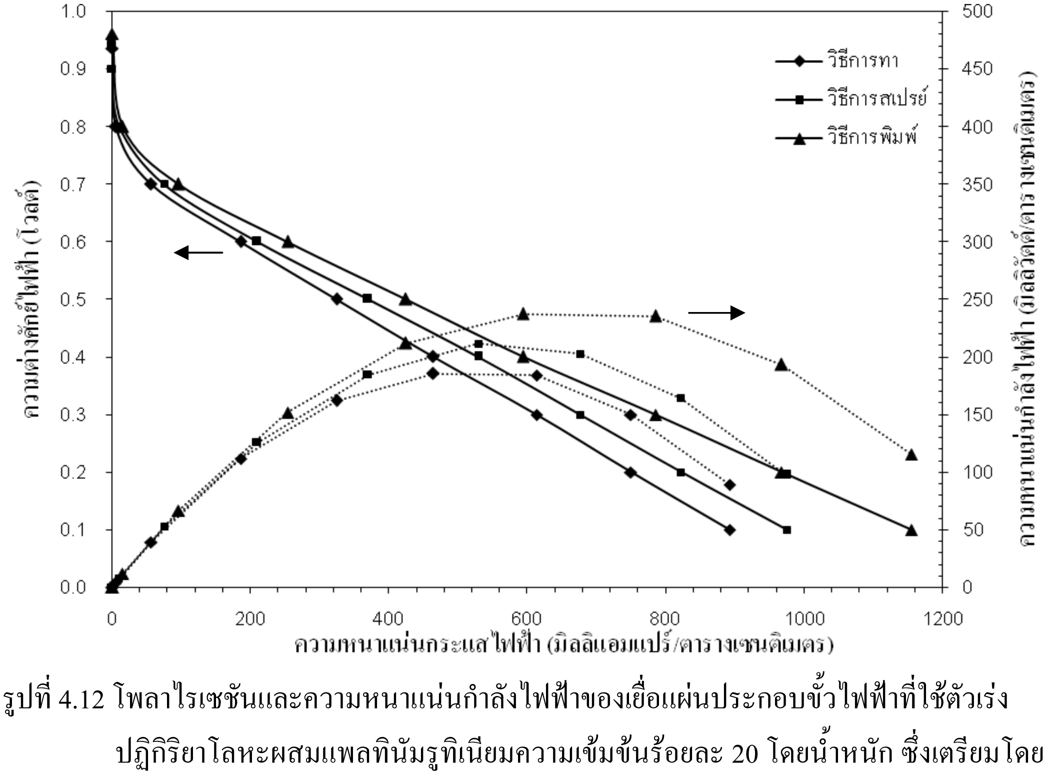
รูปที่ 4.11 กราฟ impedance แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ

เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาต่อตัวรองรับในสัดส่วนที่น้อย ทำให้การพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้น้ำหนักของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาตามต้องการนั้น ต้องใช้ระยะเวลาในการเตรียมและจำนวนครั้งในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊สที่มากกว่าการเตรียมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นสูงกว่า ซึ่งทำให้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่พอกพูนลงบนชั้นแพร่แก๊สหนาที่สุด อีกทั้งการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาหลายๆครั้งจะทำให้การกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแย่ลง ตัวอย่างเช่น วิธีการทาเมื่อขนแปรงพู่กันปัดโดนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพอกพูนในชั้นก่อนหน้าเกิดการหลุดออกไปได้ง่ายทำให้เกิดพื้นที่ที่มีชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาหนาบางไม่เท่ากัน วิธีการสเปรย์เมื่อมีการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มากหมึกตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดรวมตัวเป็นหยดขนาดใหญ่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ความสามารถในการควบคุมความสม่ำเสมอและการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปได้ยาก ส่งผลทำให้พื้นที่

ในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง ขณะที่วิธีการพิมพ์นั้นมีสามารถควบคุมในการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ทำให้เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์นั้นมีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยความหนาน้อยกว่าวิธีอื่นๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าวิธีข้างต้นและมีความหนาเฉลี่ยของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยที่สุดทำให้มีความต้านทางทางไฟฟ้าน้อย

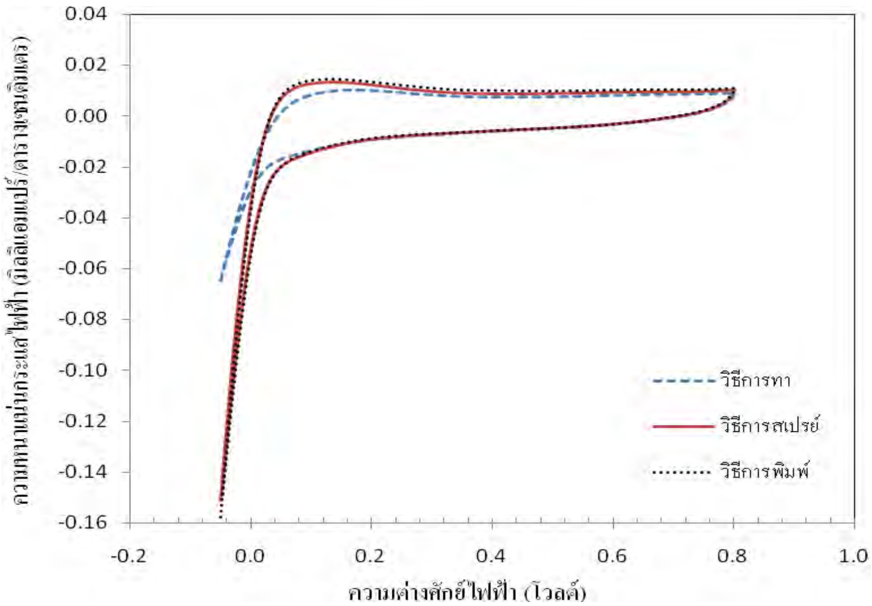
4.4.2 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ในการทดลองนี้จะทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร ที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ เป็นขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าด้านแคโทด ที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมแพลทินัมรูทิเนียมต่อตารางเซนติเมตร โดยเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า 3 วิธี คือ วิธีทา วิธีสเปรย์และวิธีการพิมพ์ จากนั้นนำไปทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้



รูปที่ 4.12 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ

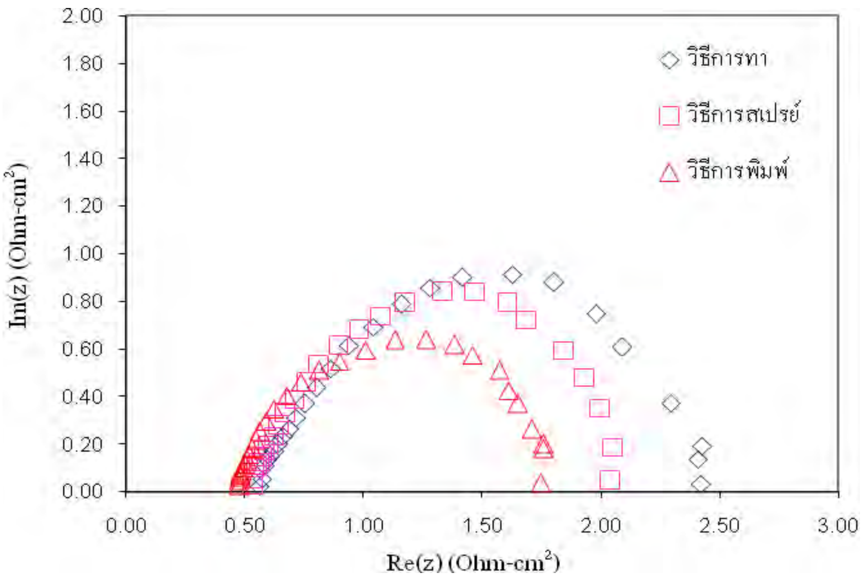
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.12 พบว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดอยู่ที่ 253 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์ร้อยละ 20.5 และมากกว่าวิธีการทาร้อยละ 36.0 พบว่าช่วงการสูญเสียทางปฏิกิริยาเคมีนั้น เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์และวิธีการสเปรย์มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่ 9.40 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการสเปรย์เพียงเล็กน้อย โดยวิธีการสเปรย์มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ 9.05 ตารางเมตรต่อกรัม แต่เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทานั้นมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุดอยู่ที่ 8.06 ตารางเมตรต่อกรัม แสดงในรูป 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 ในช่วงการสูญเสียเนื่องจากโอห์มมิก พบว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทาและวิธีการสเปรย์มีความชันใกล้เคียงกัน เนื่องจากความหนาเฉลี่ยของทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.783±0.03 และ 0.779±0.01 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่งผลให้มีความต้านทานทางไฟฟ้ามีความใกล้เคียงกันด้วย ตามรูปที่ 4.13 แสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าเตรียมด้วยวิธีการทามีค่า 0.563 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร และวิธีการสเปรย์มีค่า

ความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ที่ 0.536 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่วิธีการพิมพ์มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.479 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร เป็นผลจากเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์นั้นมีความหนาเฉลี่ยน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ คือ 0.754±0.003 มิลลิเมตร ทำให้ความชันในกราฟโพลาไรเซชันของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทามีความชันน้อยกว่ากราฟโพลาไรเซชันของวิธีการสเปรย์อย่างชัดเจน

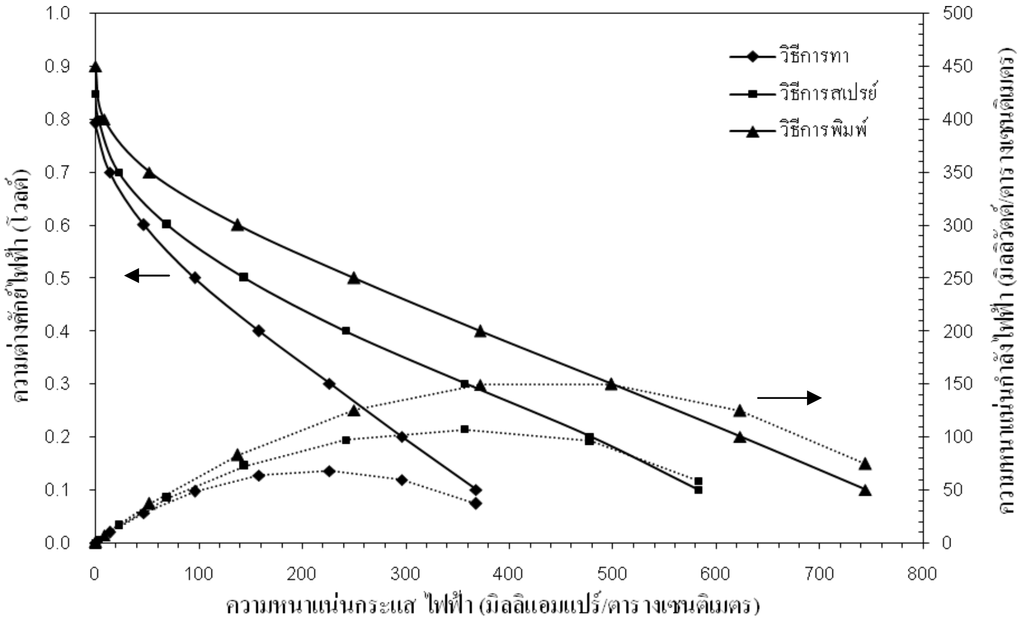


รูปที่ 4.14 กราฟ impedance แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ

จากผลการทดลองในส่วนนี้พบว่า เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักนั้น มีแนวโน้มของกราฟโพลาไรเซชันใกล้เคียงกับกราฟโพลาไรเซชันของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัม (ดังรูปที่ 4.5) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเท่ากัน และมีสัดส่วนของปริมาณโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาต่อตัวรองรับคาร์บอนที่สามารถให้ค่าสมรรถนะที่สูงในการเตรียมทุกวิธี ขณะที่วิธีการพิมพ์นั้นสามารถพอกพูนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊สที่มีความบางกว่าชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีอื่นๆ จึงทำให้กราฟโพราไรเซชั่นในช่วงการสูญเสียทางไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์มีความแตกต่างจากวิธีอื่นอย่างชัดเจน

4.4.3 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

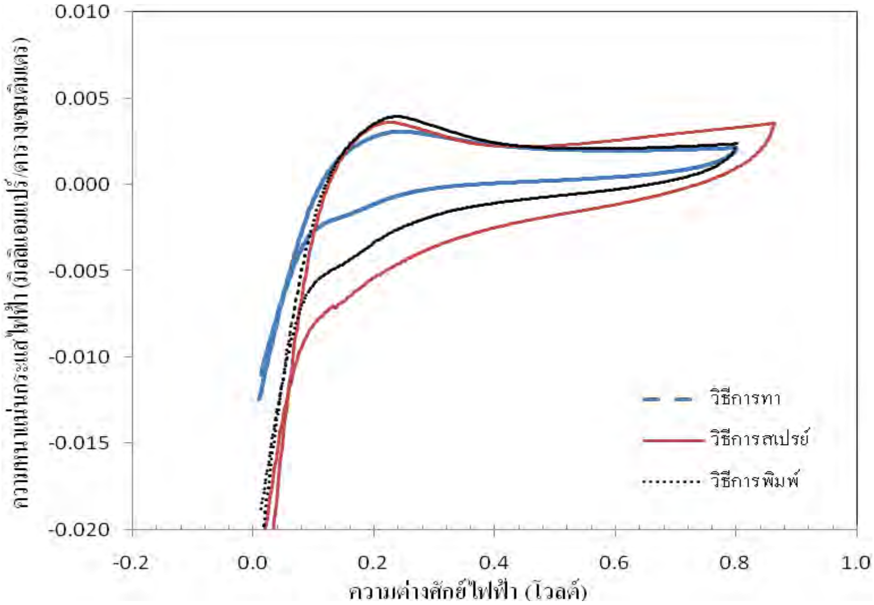
ในการทดลองนี้จะทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมแพลทินัมต่อตารางเซนติเมตร ที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ เป็นขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมแพลทินัมรูทิเนียมต่อตารางเซนติเมตร เป็นขั้วไฟฟ้าด้านแคโทด จากนั้นนำไปทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ



รูปที่ 4.15 โพลาไรเซชันและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ

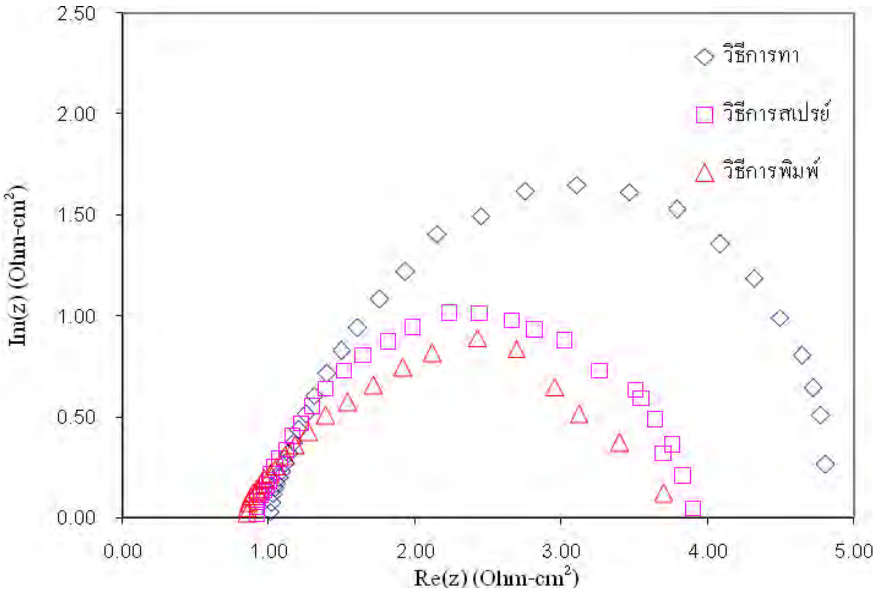
จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมที่ความเข้มข้นอื่นๆข้างต้น จากกราฟโพลาไรเซชันในรูปที่ 4.15 นั้นเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 138 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์ร้อยละ 97.1 และมากกว่าวิธีการทาร้อยละ 193 โดยมีความแตกต่างอย่างมากของกราฟโพลาไรเซชันทั้งในช่วงการสูญเสียทางการเกิดปฏิกิริยาเคมีและช่วงการสูญเสียเนื่องจากโอห์มมิก จากรูปที่ 4.16 กราฟ cyclic

voltammetry แสดงถึงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทามีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.63 ตารางเมตรต่อกรัม และเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา 0.73 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับวิธีการทา ส่วนเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์นั้นมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าสองวิธีข้างต้นเกือบ 2 เท่า โดยมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา 1.35 ตารางเมตรต่อกรัม ทำให้กราฟโพลาไรเซชันในช่วงการสูญเสียทางการเกิดปฏิกิริยาเคมีของวิธีการพิมพ์มีแตกต่างจากวิธีการทาและวิธีการสเปรย์อย่างมาก



รูปที่ 4.16 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ

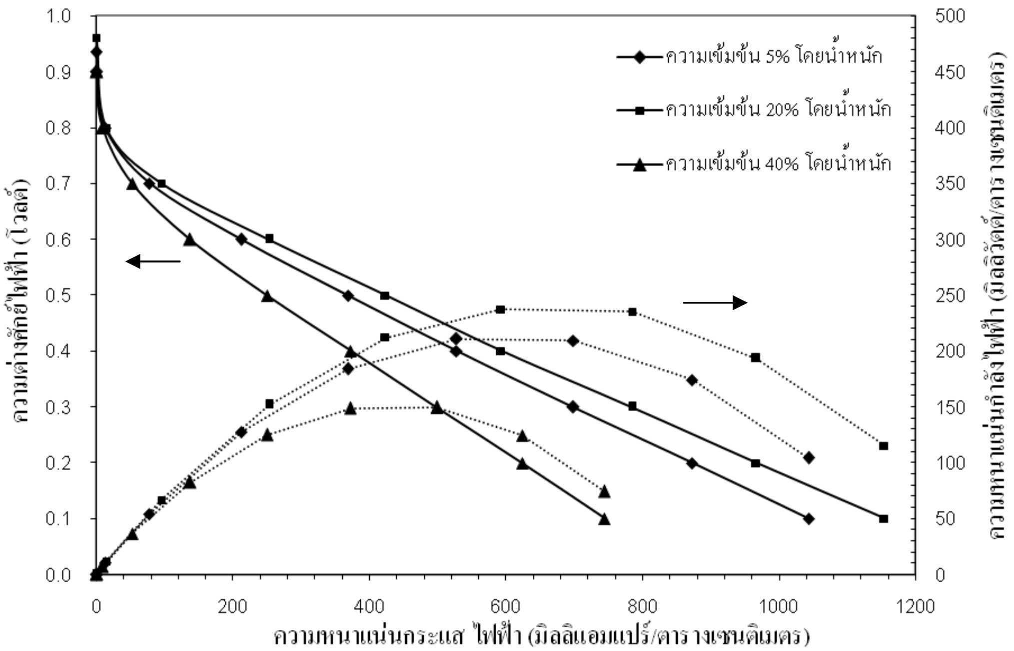
ส่วนกราฟโพลาไรเซชันในช่วงการสูญเสียเนื่องจากโอห์มมิก พบว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์และวิธีการสเปรย์นั้นมีความชันที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีผลมากจากความต้านทานทางไฟฟ้าของทั้งสองวิธีในกราฟอิมพีแดนซ์ รูปที่ 4.17 มีค่าใกล้เคียงกันคือเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์นั้นมีความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ที่ 0.875 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร และวิธีการสเปรย์มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ที่ 0.916 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ส่วนเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทานั้นมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามากที่สุดอยู่ที่ 1.12 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.17 กราฟ impedance แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมโดยวิธีต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ให้สมรรถนะต่ำที่สุด เนื่องจากการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ที่มีปริมาณโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาในสัดส่วนที่มากนั้น จึงใช้จำนวนครั้งที่น้อยมากในการพอกพูนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาให้ได้ตามปริมาณที่ต้องการ ดังนั้นวิธีการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการทาและสเปรย์ไม่สามารถควบคุมชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นชั้นแพร่แก๊สในปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำได้ โดยมีความหนาเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนอยู่ที่ 0.686±0.14 และ 0.677±0.12 มิลลิเมตร ตามลำดับ หรือมีค่าเบี่ยงเบนคิดเป็นร้อยละ 20.4 และร้อยละ 17.7 ขณะที่เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์นั้น มีความหนาเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนอยู่ที่ 0.664±0.002 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าเบี่ยงเบนเพียงร้อยละ 0.3 เนื่องจากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ตสามารถควบคุมการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแม้ในปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยให้มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นชั้นแพร่แก๊สได้ดีกว่าวิธีการทาและวิธีการสเปรย์อย่างมาก เพราะหัวพิมพ์สามารถพ่นหมึกที่มีขนาดหยดหมึกเล็กเพียง 3 พิโกลิตร [34] ดังนั้นสมรรถนะของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยสองวิธีข้างต้นจึงมีสมรรถนะที่ต่ำกว่าการเตรียมด้วยวิธีการพิมพ์

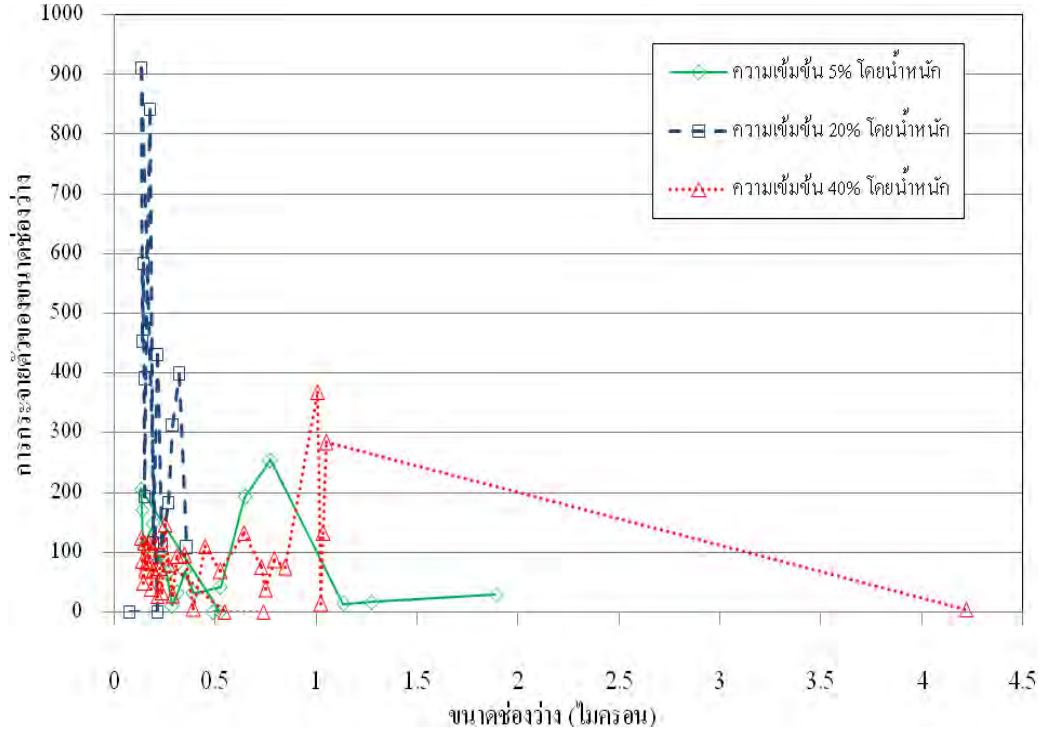
4.4.4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียม



รูปที่ 4.18 โพลาไรเซชันของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์เปรียบเทียบความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียม

จากผลการทดลองทั้ง 3 ตอนข้างต้นพบว่า ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมที่ทำให้เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์มีสมรรถนะดีที่สุด คือ ความเข้มข้นที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 253 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 0.961 โวลต์รองลงมา คือ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 213 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 0.935 โวลต์ และความเข้มข้นที่ให้สมรรถนะต่ำที่สุดคือที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 138 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 0.902 โวลต์ จากรูปที่ 4.19 พบว่า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักนั้นมีขนาดช่องว่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.216 ±0.076 ไมโครเมตร ขนาดช่องว่างเฉลี่ยที่มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของขนาดช่องว่างน้อยทำให้มีพื้นที่ที่แก๊สสามารถไหลผ่านเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้มาก อีกทั้งยังเกิดการ crossover น้อยเนื่องจากแก๊สไม่แพร่ผ่านจากขั้วไฟฟ้าด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ง่าย มีผลให้เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ความเข้มข้นร้อยละ 20โดยน้ำหนัก มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดสูงกว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่มี

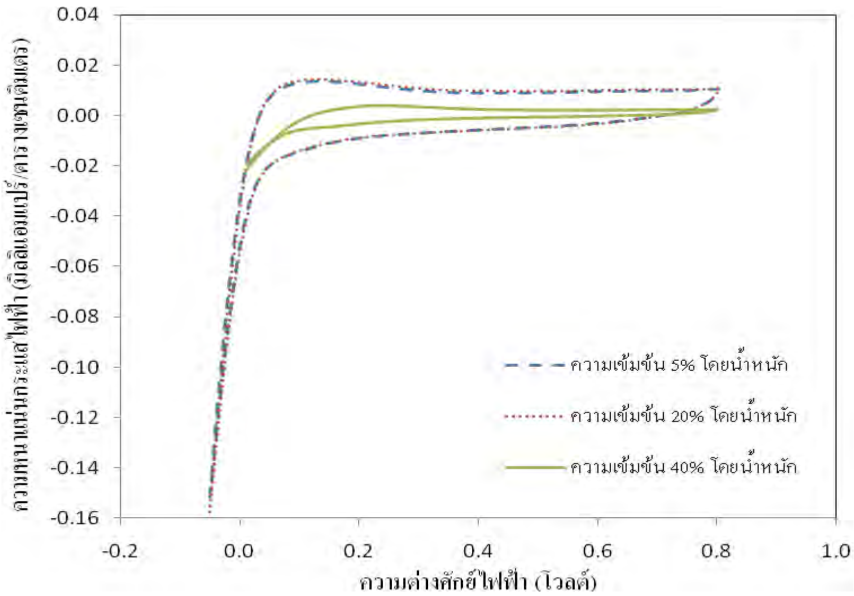
ขนาดช่องว่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.524 ±0.490 ไมโครเมตร และที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีขนาดช่องว่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.546 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดช่องว่างเฉลี่ยใหญ่ที่สุด โดยขนาดช่องว่างเฉลี่ยของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก นั้นมีค่าตั้งแต่ 0.138 ถึง 4.218 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนของขนาดช่องว่างมากที่สุด คือ 0.74 ไมโครเมตร จากการที่ขนาดช่องว่างเฉลี่ยที่มีขนาดใหญ่นั้นทำให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาน้อย อีกทั้งแก๊สเชื้อเพลิงสามารถไหลผ่านช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ได้ง่าย ทำให้เกิดการ crossover ซึ่งมีผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักมีค่าน้อยที่สุด



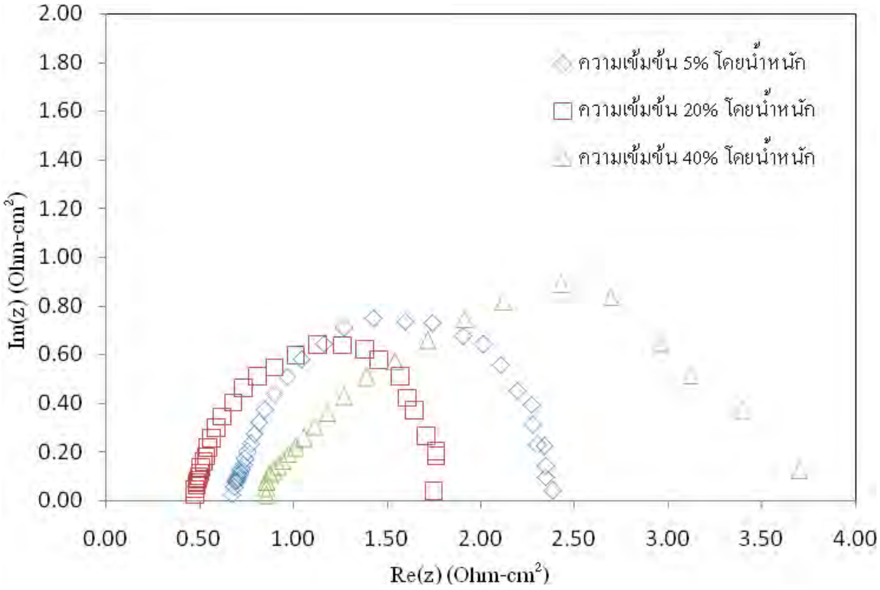
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงขนาดช่องว่างกับการกระจายตัวของขนาดช่องว่างของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.18 ช่วงการสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีมากที่สุด เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีขนาดใหญ่กว่าที่ความเข้มข้นน้อย [39] จึงทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุด คือ 1.34 ตารางเมตรต่อกรัม โดยที่ความเข้มข้นร้อย

ละ 5 โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา 8.95 ตารางเมตรต่อกรัม และความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด คือ 9.34 ตารางเมตรต่อกรัม ทั้งนี้เนื่องจาก ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก นั้นมีความหนาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.811 ±0.004 มิลลิเมตร มากกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่มีความหนา 0.754 ±0.003 มิลลิเมตร ชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความหนามากทำให้ช่องว่างที่มีขนาดเล็กบนขั้วไฟฟ้าลดลง ส่งผลทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลงตามไปด้วย อีกทั้งยังส่งผลต่อความต้านทานทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.21 เมื่อเปรียบเทียบเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ความเข้มข้นร้อยละ 5 และร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่มีความหนาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้ามากกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำให้เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความต้านทานทางไฟฟ้าเท่ากับ 0.684 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าอยู่ที่ 0.479 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.20 กราฟ cyclic voltammetry แสดงพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์



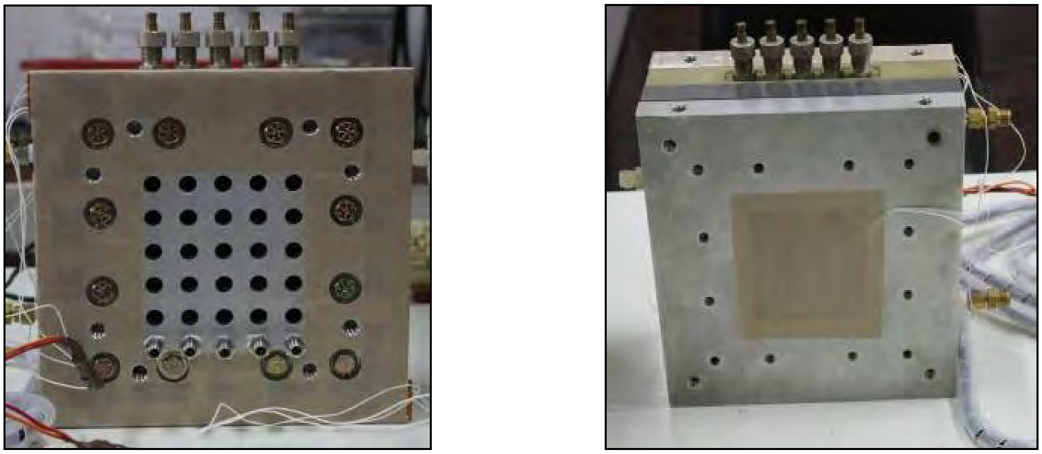
รูปที่ 4.21 กราฟ impedance แสดงความต้านทานของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการพิมพ์

จากการศึกษาพบว่าการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตมีประสิทธิภาพในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊สได้ดีกว่าวิธีการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าแบบดั้งเดิม คือ วิธีการทาและวิธีการสเปรย์ เนื่องมาจากการพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนเครื่องพิมพ์ชั้นแพร่แก๊สอาศัยกระบวนการควบคุมหมึกพิมพ์จากเครื่องจักรที่มีความแน่นอนและแม่นยำในการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนชั้นแพร่แก๊ส ต่างจากวิธีการเตรียมด้วยวิธีการทาและวิธีการสเปรย์ที่ใช้ทักษะความชำนาญ ประสบการณ์จากมนุษย์ อีกทั้งวิธีการพิมพ์ยังสามารถควบคุมการพอกพูนตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่น้อยมากๆได้และมีความสม่ำเสมอทั่วชั้นแพร่แก๊ส

4.5 การทดสอบสมรรถนะในการขยายส่วนเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ต

จากการทดลองข้างต้นทำให้ทราบว่า การเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ต ทำให้ได้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงที่สูงกว่าวิธีการเตรียมอื่นๆ และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมที่ให้สมรรถนะสูงที่สุดคือ ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบการขยายส่วนเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพในการขยายขนาดการผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าในขนาดที่ใหญ่ขึ้นในเชิงพาณิชย์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ทำการขยายขนาดขั้วไฟฟ้าจากการทดลองข้างต้นที่ทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติเมตร เป็นขนาด 100 ตารางเซนติเมตร และนำไปทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ (Array fuel cell) เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยการพิมพ์อิงก์เจ็ตและมีขั้นตอนการตรวจสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับว่าตำแหน่งก่อน-หลังมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงมากน้อยเพียงใด โดยลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับแสดงในรูปที่ 4.22

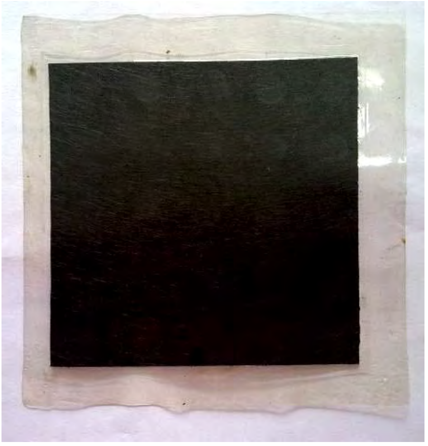


รูปที่ 4.22 แสดงเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ

4.5.1 การทดสอบอิทธิพลของตำแหน่งที่มีผลต่อสมรรถนะในแต่ละช่องของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ

ในการทดลองนี้ได้เตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (10%wt Pt 0.5 mg/cm^2) เพื่อเป็นตัวแปรควบคุมในการทดลองและเยื่อแผ่น (Nafion 115) แล้วศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งก่อน-หลังที่มีผลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับในแต่ละช่อง

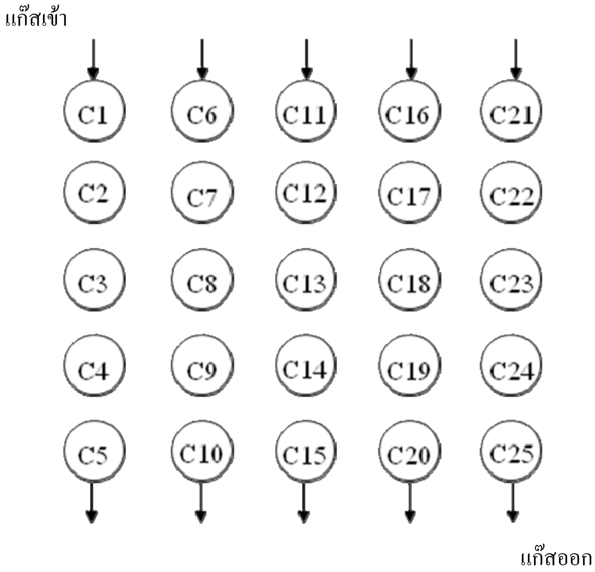
ก) ด้านแคโทด



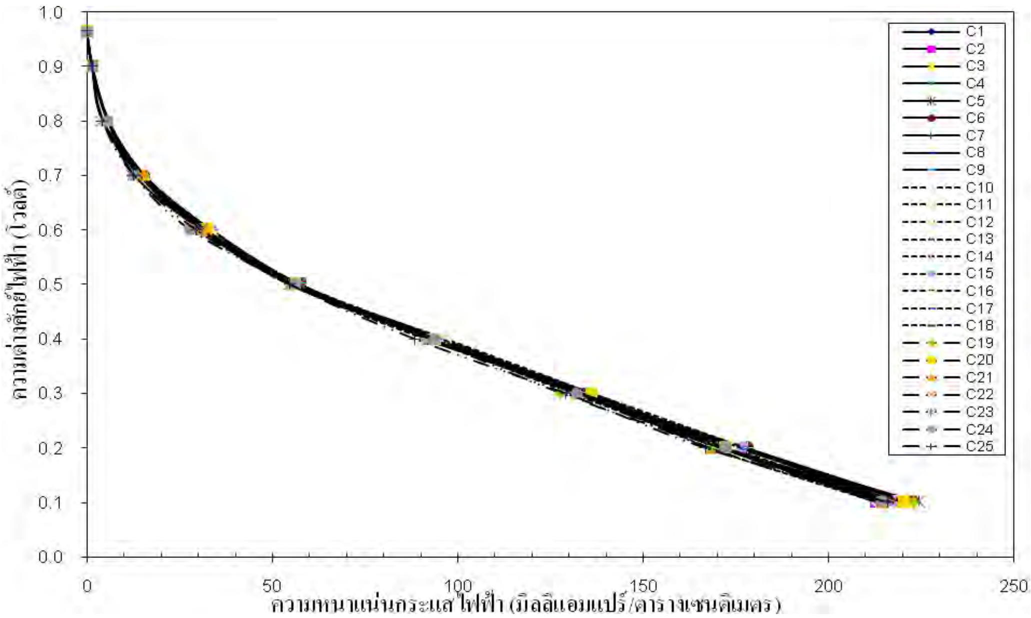
ข) ด้านแอโนด

รูปที่ 4.23 เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ

เซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับมีช่องทั้งหมด 25 ช่อง แต่ละช่องมีพื้นที่ 0.713 ตารางเซนติเมตร ซึ่งแต่ละช่องสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าแยกจากกัน ทำให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของตำแหน่งแต่ละช่องว่า ตำแหน่งที่ต่างกันมีผลทำให้สมรรถนะของแต่ละช่องแตกต่างกันหรือไม่ โดยกำหนดตำแหน่งของช่องทั้ง 25 ช่อง ดังรูปที่ 4.21 และดำเนินการที่ภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส กำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที



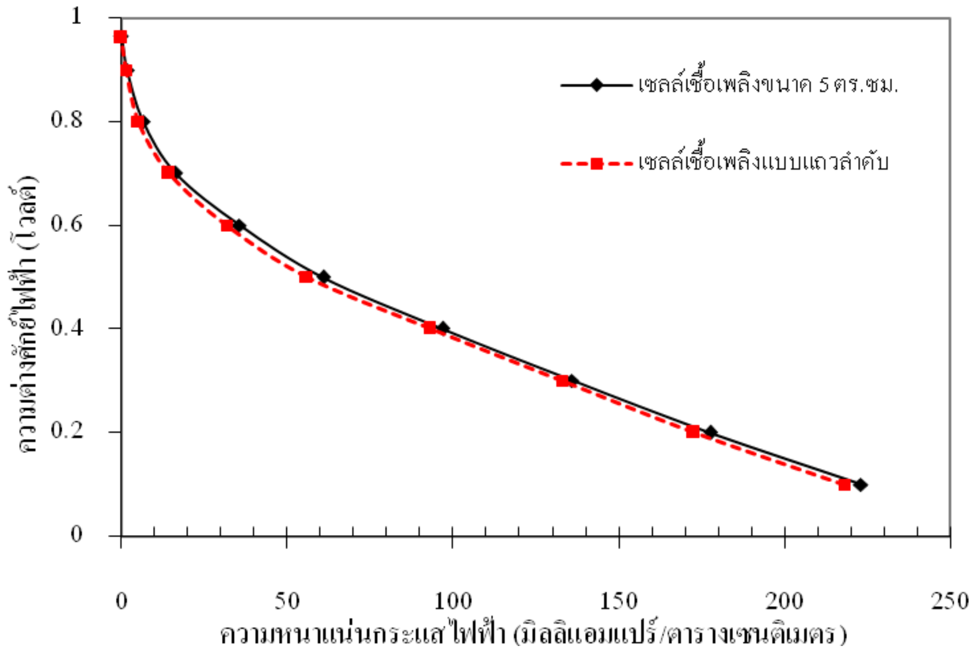
รูปที่ 4.24 การกำหนดตำแหน่งทั้ง 25 ตำแหน่งของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ



รูปที่ 4.25 กราฟโพลาไรเซชันของตำแหน่งทั้ง 25 ช่องในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ

กราฟโพลาไรเซชันในรูปที่ 4.25 พบว่าเส้นกราฟของแต่ละช่องภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ (C1-C25) นั้นมีแนวโน้มและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเพียง 1.288 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ 0.6 โวลต์ ดังนั้นตำแหน่งก่อน-หลังทั้ง 25 ตำแหน่งของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับนั้นไม่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับนี้มีการไหลของแก๊สในลักษณะการไหลแบบขนาน โดยแยกไหลเป็นแถว 5 แถว แต่ละแถวมีช่องทั้งหมด 5 ช่องและมีระยะทางระหว่างช่องสั้น แก๊สจึงสามารถไหลผ่านทั้ง 5 ช่องได้ดี ทำให้สมรรถนะของช่องในตำแหน่งก่อน-หลังมีค่าใกล้เคียงกัน

หลังจากนั้นจึงนำขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์และเยื่อแผ่นเมมเบรนชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับมาเตรียมเป็นเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าในขนาด 5 ตารางเซนติเมตร โดยใช้ภาวะเดียวกันในการเตรียมและกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และอุณหภูมิเซลล์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียสเท่ากับเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับ จากผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.26 พบว่าสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติเมตรนั้นมีค่าใกล้เคียงกับสมรรถนะเฉลี่ยที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับโดยมีความแตกต่างกันเพียงร้อยละ 8.4 ดังนั้นสมรรถนะที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับจึงเทียบเคียงกับเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติเมตรได้



รูปที่ 4.26 กราฟโพลาไรเซชันเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับกับเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติเมตร

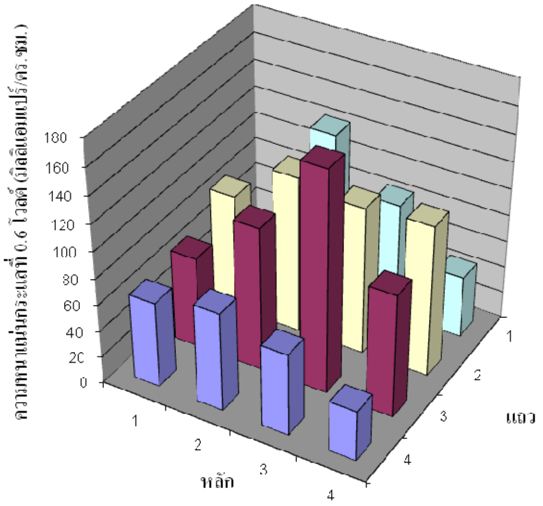
4.5.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการขยายส่วนการผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีต่างๆ

การทดลองนี้ต้องการศึกษาประสิทธิภาพในการขยายส่วนการผลิตในการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าในขนาดที่ใหญ่ขึ้นด้วยวิธีการพิมพ์และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการขยายขนาดขั้วไฟฟ้าจากการทดลองข้างต้นที่เตรียมขั้วไฟฟ้าขนาดพื้นที่ 5 ตารางเซนติเมตรเป็นขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตร ด้วยวิธีการทา การสเปรย์และการพิมพ์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการขยายขนาดขั้วไฟฟ้าที่เตรียมโดยทั้งสามวิธี จากนั้นจึงนำวิธีที่ดีที่สุดมาหาใช้ในการขยายขนาดในการผลิตขั้วไฟฟ้าในขนาด 100 ตารางเซนติเมตร และทดสอบหาประสิทธิภาพต่อไป ขั้นตอนการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าสำหรับทดสอบในการทดลองนี้ คือ เตรียมขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรด้วยวิธีการต่างๆ จากนั้นจึงตัดขั้วไฟฟ้าเป็นช่องวงกลม 16 ช่องที่เป็นตัวแทนตำแหน่งต่างๆ โดยการกำหนดแถว-หลักบนขั้วไฟฟ้าโดยให้เป็นด้านแคโทด และใช้ขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (10%wt Pt 0.5 mg/cm^2) ตัดเป็นขนาด 10 x 10 ตารางเซนติเมตรเป็นด้านแอโนด แล้วจึงทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับที่ได้

ผลการทดลองในรูปที่ 4.27 สำหรับวิธีการทาพบว่า ตำแหน่งแต่ละตำแหน่งที่วัดได้จากเซลล์เชื้อเพลิงแบบแถวลำดับให้ค่าความหนาแน่นกระแสที่ 0.6 โวลต์ มีความแตกต่างกันอย่างมาก โดยมีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยของความหนาแน่นกระแสอยู่ที่ 35.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็นร้อยละ 40.6 ของความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยอยู่ที่ 87.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แสดงว่าวิธีการทานั้นไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นวิธีการขยายส่วนการผลิตในขนาดที่ใหญ่ขึ้นต่อไป

หลัก

แถว	1	2	3	4
1	92.57	88.36	85.55	46.28
2	123.42	117.81	110.80	113.60
3	68.72	108.00	165.498	33.66
4	64.52	74.33	61.71	37.87

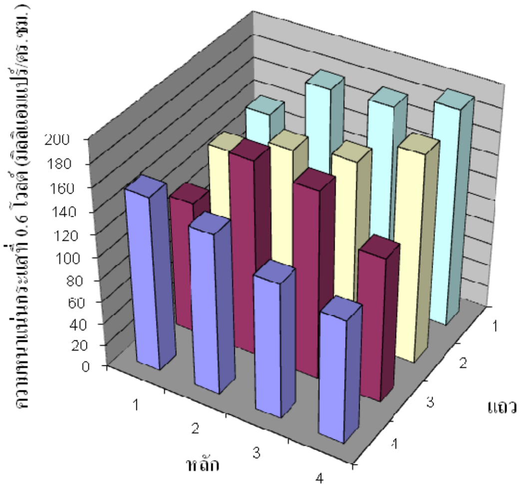


รูปที่ 4.27 ตารางและกราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับตำแหน่งต่างๆบนขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตร ที่เตรียมด้วยวิธีการทา

จากกราฟรูปที่ 4.28 แสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับตำแหน่งต่างๆ บนขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์ พบว่ามีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 152.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีค่าเบี่ยงเบนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 25.46 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 16.67 ซึ่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่งมากกว่าและยังให้ค่าความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยที่สูงกว่าวิธีการทา แต่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งบนขั้วไฟฟ้ามีความเบี่ยงเบนอยู่เกินกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมจะนำวิธีการสเปรย์มาใช้ในการขยายขนาดการผลิตขั้วไฟฟ้าขนาด 100 ตารางเซนติเมตรต่อไป

หลัก

แถว	1	2	3	4
1	139.12	177.19	178.67	193.24
2	134.79	153.60	161.24	185.02
3	118.99	174.15	167.22	129.46
4	155.74	143.26	121.39	110.80



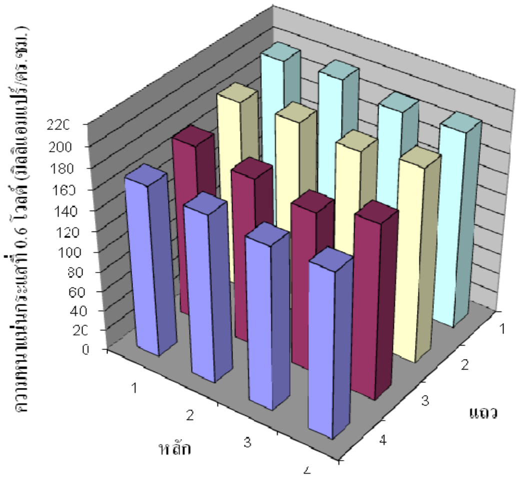
รูปที่ 4.28 ตารางและกราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับตำแหน่งต่างๆ บนขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์

จากรูปที่ 4.29 พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์ในแต่ละตำแหน่งให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 180.03 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสสูงกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทาและวิธีการสเปรย์ และมีค่าเบี่ยงเบนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า คือ 14.01 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 7.78 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทาและวิธีการสเปรย์ ดังนั้นวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการขยายขนาดการผลิตของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าในขนาด 100 ตารางเซนติเมตรต่อไป

จากการทดลองพบว่าวิธีการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตให้สมรรถนะในแต่ละตำแหน่งบนเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าในขนาด 25 ตารางเซนติเมตร มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะทำการขยายขนาดเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใหญ่ขึ้น ในการทดลองนี้จะทำการขยายขนาดการผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าในขนาด 100 ตารางเซนติเมตร

หลัก

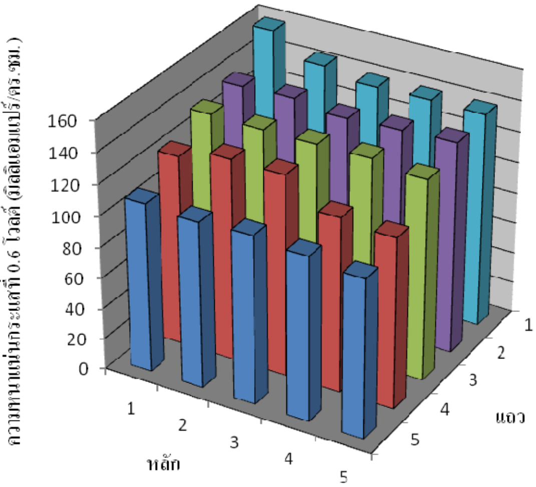
แถว	1	2	3	4
1	198.75	201.43	191.60	194.02
2	187.69	189.97	185.11	192.19
3	176.08	167.95	159.77	173.32
4	169.81	166.60	162.22	164.02



รูปที่ 4.29 ตารางและกราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับตำแหน่งต่างๆ บนขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์

จากรูปที่ 4.30 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 โวลต์ในแต่ละตำแหน่งบนขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์นั้นให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 128.50 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยให้สมรรถนะน้อยกว่าการขั้วไฟฟ้าขนาด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน เป็นผลมาจากการขยายขนาดการผลิตขั้วไฟฟ้าเป็นขนาด 100 ตารางเซนติเมตรนั้นมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นถึง 4 เท่า ทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาลดน้อยลง มีค่าความเบี่ยงเบนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 14.22 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 11.06 ความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งนั้นอาจเป็นผลมาจากการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สม่ำเสมอเท่าการเตรียมขั้วไฟฟ้าในขนาด 25 ตารางเซนติเมตร ดังนั้นวิธีการพิมพ์อิงก์เจ็ตในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการขยายขนาดการผลิตขั้วไฟฟ้าในขนาดที่ไม่เกิน 100 ตารางเซนติเมตร อีกทั้งการเปรียบเทียบระยะเวลาในการเตรียมขั้วไฟฟ้าในขนาด 25 และ 100 ตารางเซนติเมตรนั้น วิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตใช้ระยะเวลาในการเตรียมที่น้อยกว่าวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบดั้งเดิม โดยใช้เวลาในการเตรียมขั้วไฟฟ้าประมาณ 4 ชม. ขณะที่วิธีการเตรียมโดยใช้วิธีการทาและการสเปรย์นั้นใช้ระยะเวลาในการเตรียม 6 -8 ชม.

แถว \ หลัก	1	2	3	4	5
1	158.60	144.21	139.10	139.41	139.12
2	137.31	138.14	134.15	135.74	136.97
3	134.53	133.70	133.47	133.86	130.08
4	123.39	130.80	130.40	113.27	110.56
5	109.65	107.70	109.23	106.39	102.62



รูปที่ 4.30 กราฟและตารางแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับตำแหน่งต่างๆบนขั้วไฟฟ้าขนาด 100 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการพอกพูนชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมบนตัวรองรับคาร์บอนลงบนชั้นแพร่แก๊สโดยใช้เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความสม่ำเสมอ และมีความสามารถในการกำหนด ขนาด และรูปร่างของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าได้และช่วยเพิ่มสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการขยายขนาดการผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ โดยสมบัติของหมึกพิมพ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีสมบัติทางความหนืดอยู่ที่ 3.23 เซนติพอยส์ และค่าแรงตึงผิวเท่ากับ 33.8 มิลลินิวตัน/เมตร ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับสมบัติของหมึกพิมพ์ทางการค้าทั่วไป โดยทุกๆการพิมพ์ 40 ครั้งพบว่าจะมีน้ำหนักเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 0.12 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรและเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะแพลทินัมที่เตรียมได้จากวิธีการพิมพ์กับวิธีการเตรียมอื่นๆ เช่น วิธีการทาและการสเปรย์ พบว่าเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้จากวิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด คือ 537 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (ที่ 0.6 โวลต์) มากกว่าวิธีการสเปรย์ 50 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมากกว่าวิธีการทา 70 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดสูงที่สุดเท่ากับ 0.979 โวลต์ และศึกษาหาความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสมแพลทินัมรูทิเนียมที่ให้สมรรถนะสูงที่สุด จากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 253 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 0.961 โวลต์ มากกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อยู่ 40 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 115 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความเข้มข้นที่ให้สมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงสูงที่สุด คือ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

จากนั้นจึงนำมาทดสอบความสามารถในการขยายขนาดการผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าในขนาด 25 ตารางเซนติเมตร และ 100 ตารางเซนติเมตร เมื่อทดสอบสมรรถนะของเยื่อแผ่น

ประกอบขั้วไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการขยายขนาดเป็นขนาด 25 ตารางเซนติเมตร พบว่าวิธีการทาและวิธีการสเปรย์นั้นให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกระแสและได้ค่าที่ความแตกต่างกันมาก โดยวิธีการทามีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 87 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ 0.6 โวลต์ มีค่าเบี่ยงเบนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 35.35 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร หรือร้อยละ 40.61 และวิธีการสเปรย์มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 152.74 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ 0.6 โวลต์ มีค่าเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 25.46 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร หรือร้อยละ 16.67 ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการขยายขนาดที่ใหญ่ขึ้นต่อไป ส่วนวิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตนั้นให้ค่าความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยอยู่ที่ 180.03 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแสที่ 14.01 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร หรือเพียงร้อยละ7.78 โดยความแตกต่างของค่าความหนาแน่นกระแสในแต่ละจุดนั้นมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 แสดงว่าการขยายขนาดเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าในขนาด 25 ตารางเซนติเมตรด้วยวิธีการพิมพ์นั้นมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ดี และเมื่อนำวิธีการพิมพ์มาทำการขยายขนาดเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าเป็นขนาด 100 ตารางเซนติเมตร พบว่าความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยมีค่า 128.50 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาด 25 ตารางเซนติเมตรที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน และมีค่าความเบี่ยงเบนความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 14.22 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร หรือร้อยละ 11.06 เนื่องจากจากขนาดที่ใหญ่ขึ้นของการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพิมพ์ลงบนชั้นแพร่แก๊สต่ำลง ทำให้แต่ละตำแหน่งบนเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าให้ค่าความหนาแน่นกระแสที่มีความแตกต่างกันมากกว่าในขนาด 25 ตารางเซนติเมตร แต่ความเบี่ยงเบนที่วัดได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ คือ ประมาณร้อยละ 10 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการขยายขนาดการผลิตเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์ในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการขยายขนาดการผลิตได้ไม่เกิน 100 ตารางเซนติเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ใช่เครื่องพิมพ์สำหรับพิมพ์วัสดุในอุตสาหกรรมจึงมีปัญหาการอุดตันที่หัวพิมพ์ ถ้ามีการใช้งานเครื่องพิมพ์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะทำให้การเตรียมด้วยวิธีนี้มีความรวดเร็วและมีความแน่นอนในการเตรียมเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมรรถนะของเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มต่อไป

รายการอ้างอิง

[1] Appleby, A.J., and Foulkes, F.R. Fuel cell handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.

[2] Wolf, V., Hubert, A.G., and Arnold, L. Fundamentals and survey of systems. In Handbook of fuel cells, Vol. 1. New York: John Willey & Sons, 2003.

[3] เซลล์เชื้อเพลิง. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: http://www.wikipedia.com [2552, พฤษภาคม 26]

[4] เซลล์เชื้อเพลิง. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: http://www2.nstda.or.th/pr/press/fuel/ [2552, พฤษภาคม 26]

[5] เซลล์เชื้อเพลิง. [ออนไลน์]. 2547. แหล่งที่มา: http://th.wikipedia.org/wiki/เซลล์เชื้อเพลิง [2552, มิถุนายน 15]

[6] Larminie, J., and Dick, A. Fuel cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

[7] เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Inkjet_printer [2551, พฤศจิกายน 3]

[8] Mennola, T. Design and experimental characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells. Master's Thesis, Department of Engineering Physics and Math emetics Helsinki University of Technology, 2000.

[9] Electrolyte. [ออนไลน์]. 2547. แหล่งที่มา: http://students.bath.ac.uk/en2dg/Fuelcell.htm [2552, กรกฎาคม 18]

[10] เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, มหาวิทยาลัย และ นโยบายพลังงานแห่งชาติ, สำนักงานคณะกรรมการ, ใน เอกสารประกอบการประชุมผู้เชี่ยวชาญเซลล์เชื้อเพลิง ครั้งที่ 1, 21-22 มีนาคม 2543 ณ มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552

[11] Terrance, W. Dynamic Electrochemistry Transport, and Mechanistic Insight. Proceedings of the fuel cell technology workshop, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2000.

[12] Inkjet Technology. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา:
http://www.oritronic.com/hitachi_industrial_inkjet_printer_8.html
[2552, พฤษภาคม 26]

[13] Wood, D.L., Yi, J.S., and Nguyen, T.V. Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells. Electrochimica Acta 43 (1998): 3795-3809.

[14] Electrochemical Impedance Spectroscopy. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://www.ecochemie.nl./ [2552, กรกฎาคม 18]

[15] Electrochemical Impedance Spectroscopy Theory. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://www.gamry.com/App_Notes/EIS_Primer/EIS_Primer.htm
[2552, กรกฎาคม 18]

[16] วีนิตย์ บุญเทียร. ผลของตัวรองรับต่อสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

[17] Wolf, V., Hubert, A.G., and Arnold, L. Fundamentals Technology. In Handbook of fuel cells and Applications, Vol. 2. New York: John Willey & Sons, 2003.

[18] Foulkes, F.R. Fuel cell handbook. 5th ed., New York: Van Nostrand Reinhold, 2000.

[19] อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา:
http://202.29.15.135/chemistry/lesson.php?less=5&page=21
[2552,กรกฎาคม 19]

[20] Catalysts. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://education.yahoo.com/referenca/encyclopedia/entry?id=8935
[2552, กรกฎาคม 19]

[21] วิทยา เรืองพรวิสุทธิ์. คะตะไลซิสแบบเฮทเทอโรจีเนียส. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

[22] Colmati, F.Jr., Lizcano-Valbuena, W.H., Camara, G.A., Ticianelli, E. A., and Gonzalez, E.R. Carbon Monoxide Oxidation on Pt-Ru Electrocatalysts Supported on High Surface Area Carbon. J. Braz. Chem. Soc. 13 (2002): 474-482.

[23] Towne, S., Viswanathan, V., Holbery, J., and Rieke, P. Fabrication of polymer electrolyte membrane fuel cell MEAs utilizing inkjet print technology. Journal of Power Sources 171 (2007): 575–584.

[24] Taylor, A.D., Kim, E.Y., Humes, V.P., Kizuka, J., and Thompson, L.T. Inkjet printing of carbon supported platinum 3-D catalyst layers for use in fuel cells. Journal of Power Sources 171 (2007): 101–106.

[25] Smotkin, E.S., Jiang, J., Nayar, A., and Liu, R. High-throughput screening of fuel cell electrocatalysts. Applied Surface Science 252 (2006): 2573–2579.

[26] Sinha, P.K., Wang, C.Y., and Beuscher, U. Effect of flow field design on the performance of elevated-temperature polymer electrolyte fuel cells. Int. J. Energy Res. 31 (2007): 390–411.

[27] Guerin, S., Hayden, B.E., Lee, C.E., Mormiche, C., Owen, J.R., and Russell, A.E. Combinatorial Electrochemical Screening of Fuel Cell Electrocatalysts J. Comb. Chem 6 (2004): 149-158.

[28] Chen, W., Xin, Q., Sun, G., Wang, Q., Mao, Q., and Su, H. The effect of carbon support treatment on the stability of Pt/C electrocatalysts. Journal of Power Sources 180 (2008): 199–204.

[29] Kobayashi, T., Ueda, A., Yamada, Y., and Shioyama, H. A combinatorial study on catalytic synergism in supported metal catalysts for fuel cell technology. Applied Surface Science 223 (2004): 102-108.

[30] Kordesch, K., and Simader, G. Fuel cells and their applications. New York: VCH Publishers, 1996.

[31] Li, H., Sun, G., Li, N., Sun, S., Su, D., and Xin, Q. Design and Preparation of Highly Active Pt-Pd/C Catalyst for the Oxygen Reduction Reaction. J. Phys. Chem. 111 (2007): 5605-5617.

[32] Liu, J.H., Jeon, M.K., and Woo, S.I. High-throughput screening of binary catalysts for oxygen electroreduction. Applied Surface Science 252 (2006): 2580–2587.

[33] Lipkowski, J., and Ross, P.N. Electrocatalysis. New York: John Willey & Sons, 1998.

[34] Lexmark. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: http://www.lexmark.com/uncomplicate/sequentialem/home/0,7070,204812589_339212771_339350011_[2552, พฤษภาคม 27]

[35] Mehta, V., and Cooper, J.S. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. Journal of Power Sources 114 (2003): 32-53.

[36] Nguyen, K.C., Nguyen, H.V., Do, S.T., Doan, T.T., Nguyen, A.T., Le, T.V., and Nguyen, T.T. Novel Electrolyte Membrane for Fuel Cell Utilizing Nano Composite. NSTI-Nanotech (2006).

[37] Park, G.G., Yang, T.H., Yoon, Y.G., Lee, W.Y., and Kim, C.S. Effect of Pretreatment Process of Support Materials on the PEMFC Catalyst. Journal of New Materials for Electrochemical Systems 8 (2005): 91-95.

[38] Paulus, U.A., Endruschat, U., Feldmeyer, G.J., Schmidt, T.J., Bonnemann, H., and Behm, R.J. New PtRu Alloy Colloids as Precursors for Fuel Cell Catalysts. Journal of Catalysis 195 (2000): 383–393.

[39] Zhigang, Q., and Kaufman, A. Low Pt loading high performance cathodes for PEM fuel cells. Journal of Power Sources 113 (2003): 37–43

[40] Ramousse, J., Didierjean, S., Lottin, O., and Maillet, D. Estimation of the effective thermal conductivity of carbon felts used as PEMFC Gas Diffusion Layers. International Journal of Thermal Sciences 47 (2008): 1–6.

[41] Ryan, O., Suk-Won, C., Whitney, C., and Fritz, B. Fuel cell fundamentals. New York: John Willey & Sons, 2006.

[42] Tuber, K., Oedegaard, A., Hermann, M., and Hebling, C. Investigation of fractal flow-fields in portable proton exchange membrane and direct methanol fuel cells. Journal of Power Sources 131 (2004): 175–181.

[43] Wee, J.H., Lee, K.Y., and Kim, S.H. Fabrication methods for low-Pt-loading electrocatalysts in proton exchange membrane fuel cell systems. Journal of Power Sources 165 (2007): 667–677.

[44] Whitacre, J.F., Valdez, T.I., and Narayanan, S.R. A high-throughput study of PtNiZr catalysts for application in PEM fuel cells. Electrochimica Acta 53 (2008): 3680–3689.

ภาคผนวก (Apendices)

ภาคผนวก ก (Appendix A)

การคำนวณพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาจากการทดสอบ Cyclic voltametry

จาก การอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟ Cyclic voltametry ได้ค่าประจุไฟฟ้า = 0.24670 C โดยพื้นที่ขั้วไฟฟ้า = 5 ตารางเซนติเมตร

ดังนั้นประจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ = $0.24670 \div 5$

= 0.04934 C/cm^2

= 49340 $\mu C/cm^2$

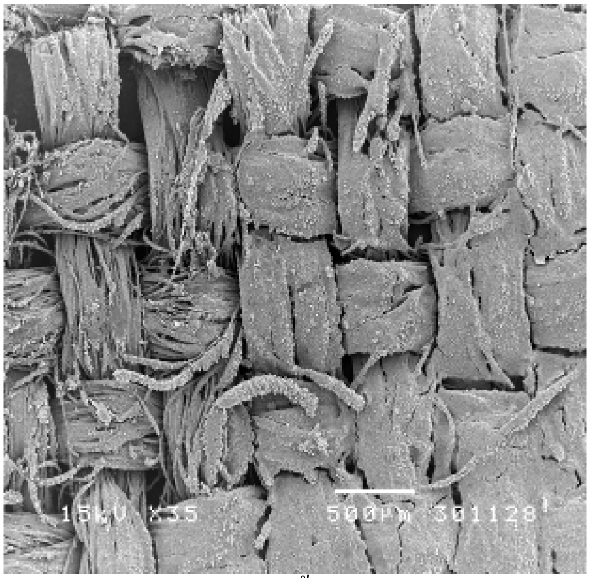
$$\text{EAS } (cm^2Pt / gPt) = \frac{49340\ \mu C/cm^2}{0.5 \times 210\ \mu C/cm^2\ Pt \times 0.0005\ g\ Pt/cm^2}$$

= 939810 cm^2/g

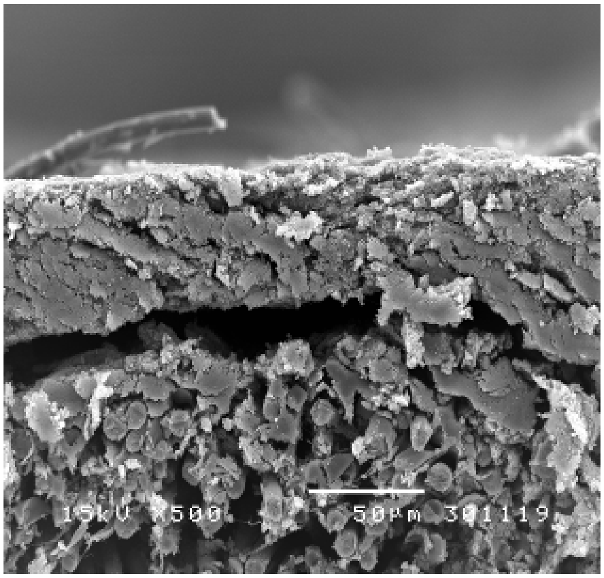
= 93.981 m^2/g

ภาคผนวก ข (Appendix B)

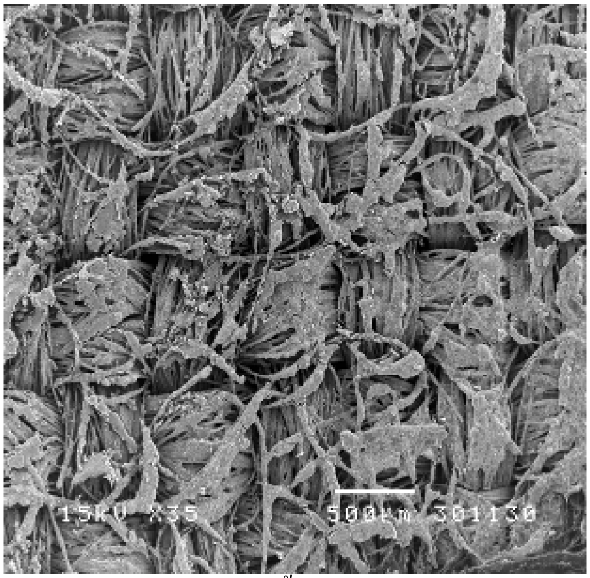
ภาพถ่ายจากเครื่อง SCANNING ELECTRON MICROSCOPE



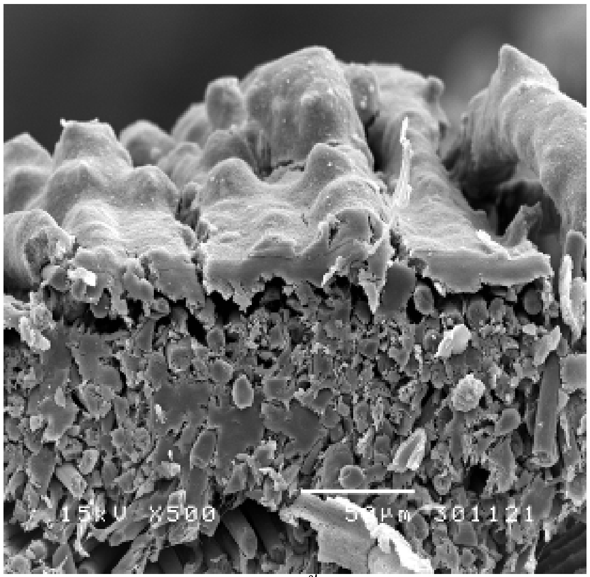
รูปที่ ข.1 ภาพถ่ายด้านบนของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทา



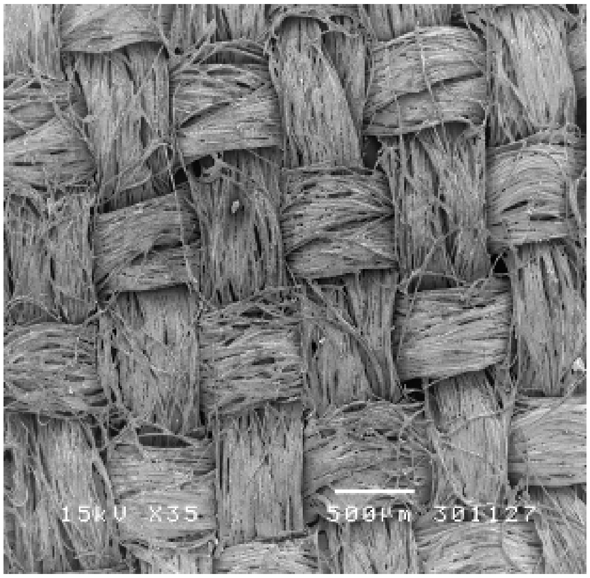
รูปที่ ข.2 ภาพถ่ายด้านตัดขวางของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการทา



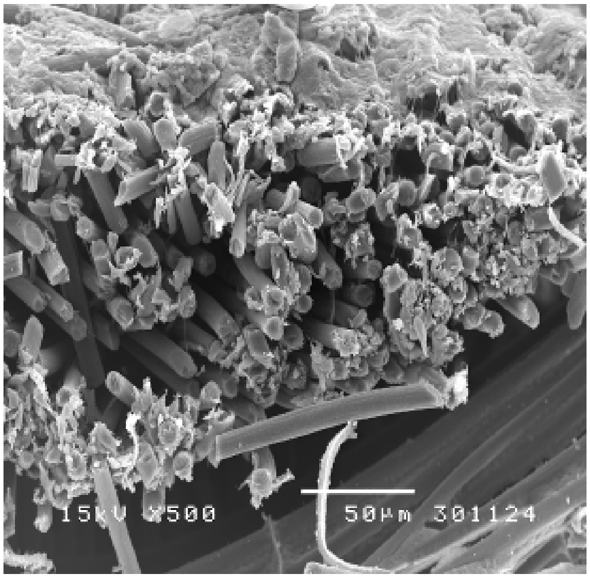
รูปที่ ข.3 ภาพถ่ายด้านบนของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์



รูปที่ ข.4 ภาพถ่ายด้านตัดขวางของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์



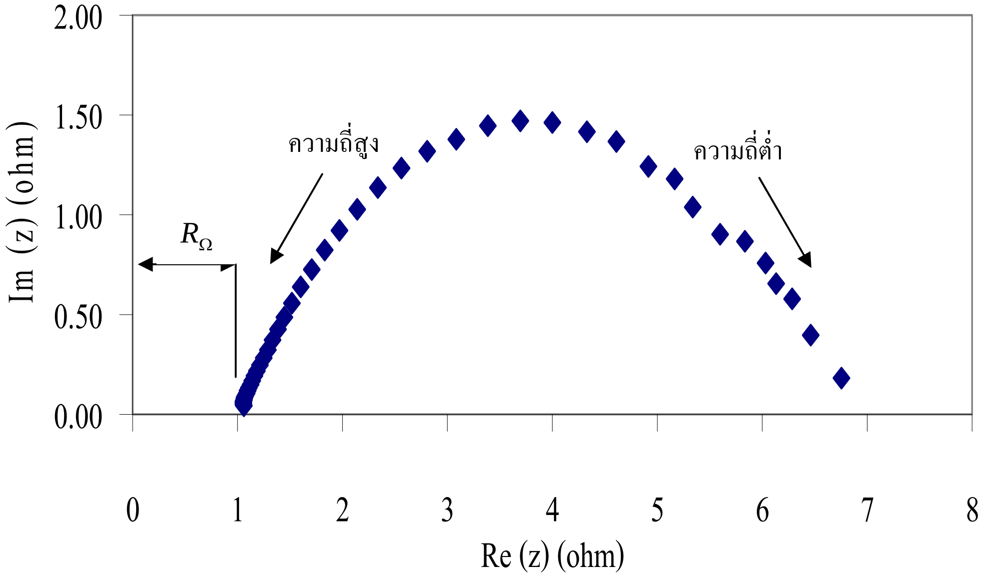
รูปที่ ข.5 ภาพถ่ายด้านบนของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์



รูปที่ ข.6 ภาพถ่ายด้านตัดขวางของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการพิมพ์

ภาคผนวก ค (Appendix C)

การคำนวณความต้านทานจากการทดสอบความต้านทานเชิงซ้อน



รูปที่ ค.1 กราฟ Nyquist จากการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนที่ค่าความต่างศักย์ 0.7 โวลต์

การหาค่าความต้านทานโอห์มมิก (R_Ω) สามารถหาได้จากกราฟ Nyquist โดยหาจากค่าตัดแกนนอนที่บริเวณความถี่สูง ในส่วนของค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ โดยในทางทฤษฎีสามารถหาได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของสวนโค้งครึ่งวงกลม แต่ในกรณีนี้จะเห็นว่าที่บริเวณความถี่ต่ำ กราฟที่ได้ไม่โค้งลงมาตัดกับเส้นแกนนอน ดังนั้นจึงได้นำวิธี Karmers-Konig Transform เข้ามาใช้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_{ct} = \left(\frac{2}{\pi}\right)\int_0^{\infty}\left[\frac{Z''(x)}{x}\right]dx \approx \left(\frac{2}{\pi}\right)\int_{x_{\min}}^{x_{\max}}\left[\frac{Z''(x)}{x}\right]dx \qquad (ค.1)$$

โดยที่ R_{ct} คือ ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ (โอห์ม)

$Z''(x)$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพที่ความถี่ใดๆ (โอห์ม)

x คือ ความถี่ (เฮิรตซ์)

จากการคำนวณโดยการหาพื้นที่ใต้กราฟที่พล๊อตระหว่าง $[Z''(x)/x]$ กับ x จะได้ค่า R_{ct}

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วิทวัส รัตนถาวร เกิดวันที่ 13 ธันวาคม 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนทวีธาภิเศก จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550