

การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอสิตเคลือบโลหะ



นายพรชัย จิณสา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

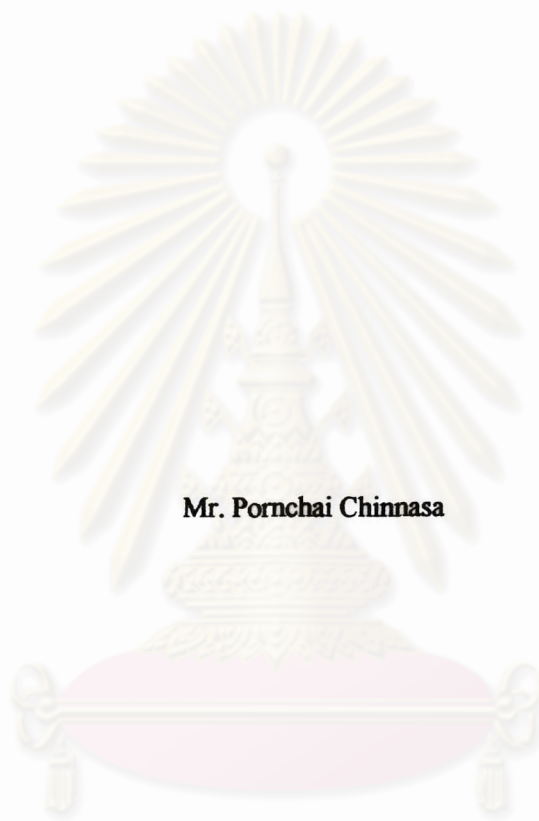
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF METAL COATED CARBON COMPOSITE BIPOLAR PLATE



Mr. Pornchai Chinnasa

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology**

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

520280

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองชั้นชนิดคาร์บอน
คอมพอสิตเคลือบโลหะ

โดย

นายพรชัย ชินสา

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

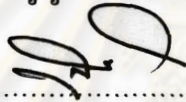
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. เก่งวดี พุกษาทร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

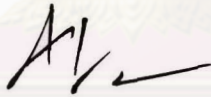
รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

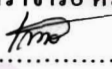


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

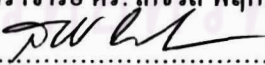
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



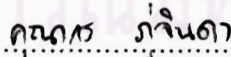
..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิศานต์)



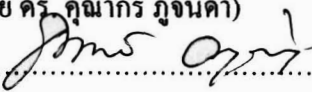
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เก่งวดี พุกษาทร)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย)



..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. कुमार ภูจินดา)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ธนวัฒน์ อรรถเดชดำรง)

พรชัย ชิมสา : การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอสิตเคลือบโลหะ. (PREPARATION OF METAL COATED CARBON COMPOSITE BIPOLAR PLATE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. เก็จวุฒิ พุกงาทร, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย, 98 หน้า.

การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยการฉีดพ่นสารเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมจากผงแกรไฟต์กับตัวประสานบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าและค่าการกักกร่อน ตัวแปรที่ศึกษาคือชนิดของสารช่วยยึดเกาะสองชนิดคือ อีพอกซีเรซินและซิงค์เรซิน ชนิดของผงแกรไฟต์ ปริมาณของผงแกรไฟต์ ความหนาในการเคลือบผิว และอุณหภูมิการอบก่อนและหลังการเคลือบผิว ผลการทดลองพบว่า อีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะที่ให้ค่าความต้านทานสัมผัสสูงกว่าซิงค์เรซิน ผงคาร์บอนที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนที่สูงคือ ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และผงแปรงถ่าน (CB) แต่ผงแปรงถ่าน (CB) มีค่ากระแสการกักกร่อนที่ต่ำสุด ปริมาณของผงคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานสัมผัสและค่าการกักกร่อนลดลง เมื่อความหนาของสารเคลือบเพิ่มมากขึ้นค่าการนำไฟฟ้าแนวแกนและค่ากระแสไฟฟ้าของการกักกร่อนลดลง อุณหภูมิการอบก่อนและหลังการเคลือบผิว ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัส เมื่อนำแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ (382.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) น้อยกว่าเมื่อใช้แผ่นช่องทางการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ชนิดแกรไฟต์ (422.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นช่องทางการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตมีความเสถียรต่ำ

ภาควิชา เคมีเทคนิค
 สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
 ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต พรชัย ชิมสา
 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

#4972395723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : METABOLIC BIPOLAR PLATE / CARBON COMPOSIT / COATED

PORNCHAI CHINNASA: PREPARATION OF METAL COATED CARBON

COMPOSITE BIPOLAR PLATE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. DR.

KEJVALEE PRUKSATHORN, THESIS CO-ADVISOR ASSOC. PROF. DR.

SOMSAK WORAMONGKOLCHAI, 98 pp.

Preparation metal coated with composite carbon bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell was studied. Carbon composite was composed of graphite powder and binder. The carbon composite was coated on stainless steel by spraying method. This research studied the parameter effects on the conductivity and the corrosion of coated metal. Studied parameters were types of binders (epoxy resin and Zn resin), types of graphite powder, the amount of graphite powder, thickness of coating and temperature before and after coating. As the results, carbon composite with epoxy resin binder had higher Interfacial Contact Resistance (ICR) than Zn resin binder. Carbon brush powder (CB) and graphite (BDH) gave higher the in-plane conductivity, but Carbon brush powder (CB) had lower corrosion rate. ICR and corrosion rate decreased with increasing of carbon powder. The increasing of the thickness coating from 0.05 to 0.2 mm decreased the in-plane conductivity and corrosion. The temperature before and after coating had no effect on ICR. From the cell performance test, flow field plate of stainless steel coated carbon composite gave the current density at 0.6 V (382.4 mA/cm^2) lower than the commercial graphite flow field plate (422.8 mA/cm^2) because stainless steel coated carbon composite flow field plate may be low stability.

Department : Chemical Technology.....

Student's Signature Pornchai Chinnasa

Field of Study : Fuel Technology.....

Advisor's Signature K. Pruksathorn

Academic Year : 2009.....

Co-Advisor's Signature Saksak Woramongkolchai

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุฒษาทร อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และคณาจารย์ทุกท่าน
ในกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนา
บัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และ
สำนักงานพลังงานแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและ
อำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ
และให้กำลังใจ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้าย ขอขอบพระคุณบิดา มารดา หลวงลุง และแม่กำนัน ที่เป็นกำลังใจ ให้ความ
ช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	๓
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แหล่งพลังงานและเชื้อเพลิง.....	4
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงและระบบเซลล์เชื้อเพลิง.....	5
2.2.1 ตัวแปรรูปเชื้อเพลิง.....	7
2.2.2 อุปกรณ์แปลงพลังงาน – ชุดเซลล์เชื้อเพลิง.....	7
2.2.3 ตัวแปลงและปรับแต่งกระแสไฟฟ้า.....	8
2.2.4 ระบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่.....	8
2.3 การใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง.....	9
2.4 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM.....	14
2.5 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate).....	17
2.5.1 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน.....	20
2.5.2 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคอมพอสิต.....	20
2.5.3 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะ.....	21
2.5.3.1 แผ่นโลหะที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว.....	21

บทที่	หน้า
2.5.3.2 แผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบ.....	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	32
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	32
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	33
3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผงแกรไฟต์และคาร์บอน.....	33
3.3.2 การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว.....	34
3.3.3 กระบวนการเคลือบผิวโดยการใช้สารยึดเกาะอีพอกซีเรซิน.....	34
3.3.4 กระบวนการเคลือบผิวโดยการใช้สารยึดเกาะซิงค์เรซิน.....	35
3.3.5 การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์.....	36
3.3.6 การวัดค่าการกักความร้อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์.....	37
3.3.7 การวัดค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงาน.....	39
3.3.8 ผลของปริมาณผงแกรไฟต์ที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้า.....	42
3.3.9 ผลของอุณหภูมิในการอบผิวก่อนการเคลือบผิวชิ้นงานและอุณหภูมิการอบผิวหลังการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้า.....	42
3.3.10 การทดสอบสมบัติเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบผิวเตรียมเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม.....	42
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	44
4.1 สมบัติทางกายภาพของสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน.....	44
4.2 ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน (In-plane) ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบอีพอกซีเรซิน.....	45
4.3 ค่าการกักความร้อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบอีพอกซีเรซิน.....	47
4.4 ค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงาน.....	49
4.5 ผลความหนาของสารเคลือบผิวและปริมาณผงคาร์บอนที่มีต่อค่าความต้านทานสัมผัสของสารเคลือบที่ประกอบด้วยอีพอกซีเรซิน.....	51
4.6 ผลของค่าการความต้านสัมผัสและค่าการกักความร้อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีซิงค์เรซินเป็นองค์ประกอบ.....	54

บทที่	หน้า
4.7 ผลของค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและค่าการกักกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบด้วย สารเคลือบซิงค์เรซิน.....	61
4.8 ผลของอุณหภูมิก่อนการเคลือบผิวและอุณหภูมิหลังการเคลือบผิวที่มีผลต่อค่า ความต้านทานสัมผัส.....	63
4.8.1 สารเคลือบอีพอกซีเรซิน.....	63
4.8.2 สารเคลือบซิงค์เรซิน.....	64
4.9 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตจากงานวิจัย.....	66
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	74
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	81
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	98

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบรวมตัวที่เกิดขึ้นบนดาวฤกษ์.....	4
2.2	ระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	6
2.3	เซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อเรียงกันเป็นหน่วยขั้น.....	8
2.4	การใช้เซลล์เชื้อเพลิงในรถยนต์.....	10
2.5	โทรศัพท์เคลื่อนที่ และคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบ DMFC.....	11
2.6	เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (AFC) สำหรับยานโคจร และ โรงไฟฟ้าเซลล์ เชื้อเพลิง แบบ PAFC ขนาด 1 MW ที่ Minato-ku, Tokyo.....	12
2.7	แนวโน้มการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต.....	14
2.8	โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM 1 เซลล์ (Single cell).....	15
2.9	โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM เมื่อนำมาต่อกันแบบขั้น (Fuel cell stack).....	16
2.10	เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM.....	17
2.11	แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากวัสดุชนิดต่างๆ.....	19
2.12	ค่าประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดี่ยวของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว เคลือบฟอสฟอรัสคาร์ไบด์ลงบนอะลูมิเนียมเทียบกับแกรไฟต์ภายใต้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ 1000 ชั่วโมง.....	27
3.1	การวัดค่าการไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane) ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย แกรไฟต์.....	36
3.2	การวัดค่าการกักร้อนของชิ้นงาน.....	39
3.3	การการวัดความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส (ICR).....	40
3.4	ค่าความต้านทานเป็นความชันของกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และ กระแสไฟฟ้า.....	40
3.5	การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานเชิงผิวสัมผัส (ICR).....	41
4.1	ความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสอง ขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตของผงแกรไฟต์ชนิดต่างๆ โดยใช้ผง แกรไฟต์: อีพอกซีเรซิน: สารช่วยในการแข็งตัว: ตัวทำละลายโทลูอีน, 10:10:10:70 โดยน้ำหนักกับความหนาในการเคลือบผิว.....	46

ภาพที่	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสของการกักกร่อนของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสอง ขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตกับความหนาในการเคลือบผิวของผ งแกรไฟต์ชนิดต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนผงแกรไฟต์: อีพอกซีเรซิน: สารช่วยในการ แข็งตัว: ตัวละลายโทลูอินร้อยละ 10:10:10:70 โดยน้ำหนัก.....	48
4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทาน ของเครื่องมือ.....	49
4.4 ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทาน ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว.....	50
4.5 ค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ชนิดต่างกัน.....	51
4.6 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่เคลือบผิวด้วยผงแกรไฟต์ชนิดต่างๆกับความหนาในการเคลือบผิวโดยใช้อี- พอกซีเรซิน: สารช่วยในการแข็งตัว: ผงคาร์บอน: ตัวทำละลายโทลูอินร้อยละ 10:10:10:70 โดยน้ำหนัก.....	52
4.7 ความสัมพันธ์ค่าความต้านทานสัมผัสกับปริมาณผงแกรไฟต์ของสารช่วยยึดเกาะ อีพอกซีเรซินที่ความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 0.228 มิลลิเมตร.....	53
4.8 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสและค่าการกักกร่อนของแผ่นเหล็กกล้า ไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้จิ้งค์เรซินอย่างเดียวกั้ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ	54
4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสและค่าการกักกร่อนของแผ่นเหล็ก กล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้แกรไฟต์ชนิด BDH :จิ้งค์เรซิน10:90 โดยน้ำหนัก ที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ.....	55
4.10 ความสัมพันธ์ของค่า ICR ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้แกรไฟต์ (BDH) ในอัตราส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักที่แตกต่างกันและที่ความหนาในการเคลือบ ผิวต่างๆ.....	56
4.11 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัส และค่าการกักกร่อนของแผ่นเหล็ก กล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้ แกรไฟต์ชนิดBDH: จิ้งค์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอิน ร้อยละ20:10:70 โดยน้ำหนักที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ.....	57
4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้ผงแปรงถ่าน (CB) ในอัตราส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักที่แตกต่างกันและที่ความ หนาในการเคลือบผิวต่างๆ.....	58

ภาพที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัส และค่าการกักความร้อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยสารเคลือบประกอบด้วยผงแปร่งถ่าน (CB): ชิงค์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน ในอัตราส่วน 25:10:65 โดยน้ำหนักที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ.....	59
4.14 เปรียบเทียบค่าความต้านทานสัมผัสของโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่ความหนาในการเคลือบผิวที่แตกต่างกัน.....	60
4.15 ความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ของผงแกรไฟต์ชนิดต่างๆ โดยใช้ผงแกรไฟต์: ชิงค์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน, 20:10:70 โดยน้ำหนักกับความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ.....	61
4.16 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสการกักความร้อนเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ของผงแกรไฟต์ ชนิดต่างๆ โดยใช้ผงแกรไฟต์: ชิงค์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน, 20:10:70 โดยน้ำหนักกับความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ.....	62
4.17 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสที่ความหนาต่างๆ ในการเคลือบผิว โดยใช้สารเคลือบอีพอกซีเรซินผสมผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก.....	63
4.18 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสที่ความหนาต่างๆ ในการเคลือบผิว โดยใช้สารเคลือบอีพอกซีเรซินผสมผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก.....	64
4.19 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสที่ความหนาต่างๆ ในการเคลือบผิว โดยใช้สารเคลือบชิงค์เรซินผสมผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก.....	65
4.20 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสที่ความหนาต่างๆ ในการเคลือบผิว โดยใช้สารเคลือบชิงค์เรซินผสมผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก.....	65
4.21 โพลาริเซชันของซุกเซลด์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตความหนาในการเคลือบผิวประมาณ 0.085 มิลลิเมตรที่ปริมาณผงแปร่งถ่าน (GB) ร้อยละ 20 และ 25 โดยน้ำหนัก.....	66

ภาพที่	หน้า
4.15 โพลาริเซชันของซุกเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ เปรียบเทียบกับซุกเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพหุมิติ.....	67
4.16 Nyquist plot ของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สที่ได้จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพหุมิติที่ค่าความต่างศักย์ 0.7 โวลต์.....	69
4.17 โพลาริเซชันของซุกเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตความหนาในการเคลือบผิวประมาณ 0.085 มิลลิเมตรและแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพหุมิติในการใช้งานแต่ละครั้ง.....	70
4.18 Nyquist plot ของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สที่ได้จากงานวิจัยภายหลังจากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ครั้งที่ 1 ถึง 4 และเปรียบเทียบกับแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพหุมิติที่ค่าความต่างศักย์ 0.7 โวลต์.....	71

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	วัสดุที่ใช้เคลือบผิวและกระบวนการเคลือบผิวของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบ โลหะ	24
2.2	ลักษณะของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเมื่อใช้วัสดุที่แตกต่างกัน.....	28
4.1	สมบัติทางกายภาพของสารนำไฟฟ้าที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ.....	45



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมาแหล่งพลังงานที่ใช้กันส่วนใหญ่ได้มาจากน้ำมันเชื้อเพลิง แต่ความต้องการที่เพิ่มขึ้นและแหล่งผลิตที่มีอยู่อย่างจำกัดทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง อีกทั้งการใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงยังมีผลต่อสภาพแวดล้อม จากเหตุดังกล่าวจึงได้มีการค้นคว้าและพัฒนาแหล่งพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพและพลังงานจากไฮโดรเจน ซึ่งพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่สะอาดและไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะพลังงานไฮโดรเจน เซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้กับการแปลงพลังงานที่กำลังมีการศึกษาวิจัยและพัฒนากันอย่างกว้างขวาง [1]

เซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมคือ เซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton Exchange Membrane Fuel cell) เนื่องจากมีการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ หลักการทำงานอาศัยเชื้อเพลิงคือ แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนจากอากาศเป็นแก๊สออกซิไดส์ โดยเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เรียกว่าออกซิเดชันจากแก๊สไฮโดรเจนทางด้านขั้วแอโนดได้เป็นโปรตอนเคลื่อนผ่านแผ่นเมมเบรน (Membrane) และอิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านวงจรภายนอก ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนทางด้านขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้ำบริสุทธิ์ออกมา แรงดันไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าประมาณ 1 โวลต์ [2] ซึ่งถ้านำมาต่อกัน (Fuel cell stack) เพื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าจะต้องใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมาคั่นระหว่างเซลล์ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนิยมทำจากแกรไฟต์เพราะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงและทนการกัดกร่อนได้ดี แต่แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนี้จะมีน้ำหนักมากคิดเป็นร้อยละ 80 ของน้ำหนักทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงและต้นทุนในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชุดจะขึ้นอยู่กับต้นทุนในการผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) ในเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมีหน้าที่หลักคือ กระจายเชื้อเพลิงและสารออกซิไดส์เข้าสู่เซลล์ จัดการนำภายในเซลล์ นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์หนึ่งสู่อีกเซลล์หนึ่ง ระบายความร้อนออกจากพื้นที่ทำปฏิกิริยาและป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส ดังนั้นการนำวัสดุมาใช้ผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบ

สองขั้วต้องมีสมบัติดังนี้คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี แก๊สไม่สามารถซึมผ่านได้ มีความแข็งแรงต่อการบีบอัด ทนต่อปฏิกิริยาเคมีและไม่มีสารที่เป็นพิษต่อเยื่อแผ่นพอลิเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยา ราคาไม่แพงและสามารถขึ้นรูปหรือปรับแต่งได้ง่าย [3]

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วส่วนใหญ่ใช้แกรไฟต์เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากมีสมบัติทนการกัดกร่อนและนำไฟฟ้าได้ดีแต่แกรไฟต์จะขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากเปราะและแตกง่าย จึงมีการพัฒนาใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอสิตแต่พบว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดนี้มีการนำกระแสไฟฟ้าที่ต่ำ [4] จึงมีการพัฒนาแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบโลหะเพราะนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ราคาถูก สมบัติเชิงกลดีและขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือจะเกิดการกัดกร่อนของโลหะเนื่องจากสภาพภายในเซลล์มีความเป็นกรดสูง นอกจากนี้ยังอาจเกิดออกไซด์ฟิล์มเคลือบผิวของโลหะทำให้สภาพการนำไฟฟ้าสูญเสียไป [5] ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงศึกษาและพัฒนาการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง
2. ศึกษาผลของสารเคลือบต่อสมบัติของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. โลหะที่ใช้เคลือบเพื่อเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304)
2. เตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตด้วยวิธีการฉีคพ่น
3. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารเคลือบที่ประกอบด้วย อีพอกซีเรซิน หรือ ซิงค์เรซิน สารช่วยในการแข็งตัว แกรไฟต์ และตัวทำละลายยูโธลิน
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต

5. ทดสอบการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

1. สามารถเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิด โลหะเคลือบคาร์บอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
2. เป็นแนวทางในการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิด โลหะเคลือบคาร์บอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มภายในประเทศ



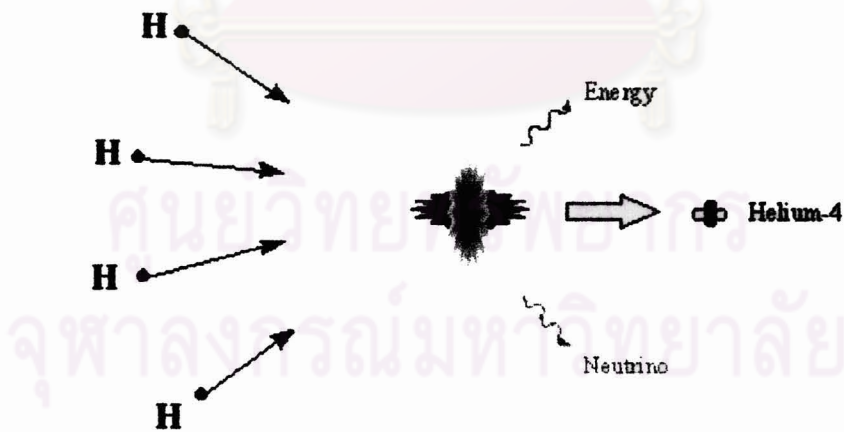
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งพลังงานและเชื้อเพลิง

พลังงานทั้งหมดในเอกภพมีจุดเริ่มต้นมาจากสิ่งเดียวกันคือไฮโดรเจน ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีโครงสร้างอะตอมง่ายที่สุดที่มนุษย์รู้จัก แต่อะตอมของไฮโดรเจนมีโปรตอนและอิเล็กตรอนอย่างละ 1 ตัวเท่านั้น ดาวฤกษ์ทุกดวงเริ่มต้นมาจากไฮโดรเจน พลังงานในระบบสุริยะมาจากไฮโดรเจน ดวงอาทิตย์เป็นลูกกลมที่ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สฮีเลียม ภายในดวงอาทิตย์อะตอมของไฮโดรเจน 4 อะตอมจะรวมตัวกันกลายเป็นอะตอมของฮีเลียม และได้พลังงานแผ่รังสีออกมา กระบวนการนี้เรียกว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบรวมตัว (Nuclear fusion) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พลังงานที่แผ่รังสีออกมานี้ทำให้สิ่งมีชีวิตบนโลกสามารถดำรงอยู่ได้ พลังงานแสงอาทิตย์ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ ทำให้เกิดลม ฝนตก พลังงานถูกเก็บในรูปของเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานส่วนใหญ่ที่เราใช้ทุกวันนี้มาจากดวงอาทิตย์ซึ่งมีจุดเริ่มต้นมาจากไฮโดรเจน [6]



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบรวมตัวที่เกิดขึ้นบนดาวฤกษ์ [6]

ไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่มีมากที่สุด ไม่ใช่เฉพาะบนโลกเท่านั้นแต่รวมถึงในเอกภพด้วย มีประมาณร้อยละ 90 ของเอกภพโดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม โดยปกติจะไม่พบในรูปของไฮโดรเจนบริสุทธิ์ (H_2)

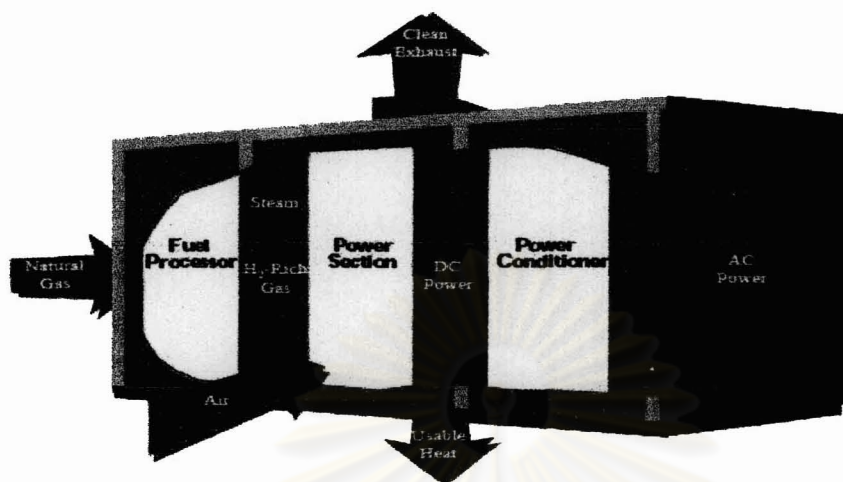
ไฮโดรเจนจะรวมกับธาตุอื่นที่พบมากที่สุดคือรวมกับออกซิเจนเป็นน้ำ (H_2O) และในสารอินทรีย์ รวมถึงพืช ปิโตรเลียม ถ่าน แก๊สธรรมชาติ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ สิ่งที่น่าสนใจสำหรับไฮโดรเจนคือ ไฮโดรเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ที่สะอาดไม่ผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ (แก๊สเรือนกระจก) หรือปล่อยแก๊สพิษ และสามารถใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า การขนส่ง และพลังงานอื่นๆที่ต้องการ [7] เนื่องจากสถานการณ์ราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน และจากความต้องการใช้ที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณน้ำมันสำรองที่พบในโลกกำลังจะลดลงทำให้หลายฝ่ายมองหาพลังงานทางเลือกอื่นและเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ก็เป็นหนึ่งในทางเลือกที่ได้รับความสนใจพัฒนา

เซลล์เชื้อเพลิง เกิดขึ้น โดยการคิดค้นและวิจัยของ Sir William Grove จากประเทศอังกฤษ [8] โดยเซลล์เชื้อเพลิงจะสร้างพลังงานไฟฟ้าขึ้นมาจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งอาจเป็นออกซิเจนล้วนหรือจากอากาศสดเข้าไป การทำปฏิกิริยาจะไม่ทำให้เกิดมลพิษ เพราะผลิตภัณฑ์ที่ปล่อยออกมาเป็นน้ำและความร้อน ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกพัฒนามาใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป เพื่อลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงและระบบเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงคืออุปกรณ์สำหรับทำหน้าที่แปลงพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน หรือเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้มข้น) โดยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้พลังงานไฟฟ้า หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างจากแบตเตอรี่ คือกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่ลดลง และไม่มีการประจุไฟใหม่ เซลล์เชื้อเพลิงจะให้กระแสไฟฟ้า ความร้อน และน้ำคราบเท่าที่เชื้อเพลิงและออกซิเจนยังป้อนให้กับเซลล์เชื้อเพลิง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [9]

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงมีส่วนประกอบหลายส่วนแต่ละส่วนทำหน้าที่แตกต่างกัน เช่น ดังเก็บเชื้อเพลิงมีหน้าที่เก็บเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นเชื้อเพลิงจากถังเก็บเชื้อเพลิงจะผ่านกระบวนการปรับปรุงแก๊สธรรมชาติ เมทิลแอลกอฮอล์ หรือแก๊สโซลีน เพื่อให้ได้ไฮโดรเจนสำหรับจุดเซลล์เชื้อเพลิง จากนั้นป้อนไฮโดรเจนเข้าขั้วแอโนดและป้อนอากาศเข้าขั้วแคโทดของจุดเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในจุดเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากันเกิดความร้อนและน้ำขึ้น ภายในจุดเซลล์เชื้อเพลิงมีระบบไล่น้ำออก ระบายความร้อน และการนำความร้อนกลับมาใช้อีกจากพื้นที่ที่ร้อน มีระบบควบคุมและตรวจสอบความปลอดภัย มีตัวปรับปรุงกำลังเอาต์พุตเพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้งานได้

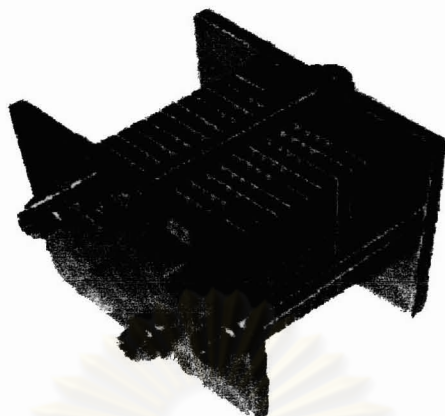
การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงค่อนข้างซับซ้อน แปรเปลี่ยนไปตามชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงและการประยุกต์ใช้งาน อย่างไรก็ตามระบบเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน 4 อย่าง คือ ตัวแปรรูปเชื้อเพลิง (Fuel processor) อุปกรณ์แปลงพลังงาน (เซลล์เชื้อเพลิง หรือจุดเซลล์เชื้อเพลิง) ตัวแปลงกระแสไฟฟ้า และ ระบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ (โดยปกติใช้กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิสูงที่ใช้กับงานที่ไม่มีเคลื่อนย้าย) โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ตัวแปรรูปเชื้อเพลิง

ส่วนประกอบแรกของเซลล์เชื้อเพลิงคือ ตัวแปรรูปเชื้อเพลิง ทำหน้าที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของพลังงานที่เซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำไปใช้ได้ ถ้าป้อนไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงส่วนของตัวแปรรูปเชื้อเพลิงไม่จำเป็นต้องใช้ เซลล์เชื้อเพลิงอาจต้องการเพียงตัวกรองเพื่อกรองสิ่งเจือปนออกจากแก๊สไฮโดรเจน ถ้าเชื้อเพลิงของระบบเป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่ใช้กันทั่วไปเช่น เมทิลแอลกอฮอล์ แก๊สโซลีน หรือแก๊สชีววมวล จะต้องใช้ตัวแปรรูปเชื้อเพลิงเพื่อเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สผสมไฮโดรเจนและสารประกอบคาร์บอน ในหลายกรณีจะส่งแก๊สผสมจากตัวแปรรูปเชื้อเพลิงไปแยกสิ่งเจือปนเช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือซัลเฟอร์ ที่คาปฏิกรณ์อีกเตาหนึ่งก่อนที่จะส่งไปยังชุดเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อป้องกันสิ่งเจือปนในแก๊สไปรวมตัวกับตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ลดประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงบางชนิดเช่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอนเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell) และ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell) มีการทำงานที่อุณหภูมิสูงเพียงพอที่เชื้อเพลิงจะถูกแปรรูปเชื้อเพลิงภายในตัวเซลล์เชื้อเพลิงเอง เรียกว่าตัวแปรรูปเชื้อเพลิงภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งการแปรรูปเชื้อเพลิงภายในยังคงต้องการตัวคักเพื่อเอาสิ่งเจือปนออกจากเชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้ปรับปรุงก่อนที่เชื้อเพลิงจะเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ตัวแปรรูปเชื้อเพลิงทั้งแบบภายในและภายนอกได้ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา แต่น้อยกว่าจำนวนที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น เครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิง [10]

2.2.2 อุปกรณ์แปลงพลังงาน – ชุดเซลล์เชื้อเพลิง

ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานจากพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง ไปอยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้า ชุดเซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตพลังงานไฟฟ้าในรูปของไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากปฏิกิริยาเคมีซึ่งเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์โดยปกติให้แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 1 โวลต์ เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงเพียงพอต่อการใช้งาน จะต้องนำเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์มาต่อกันอย่างอนุกรมเป็นชุดเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2.3 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชุดเซลล์เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ กระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวทั้งหมดของแต่ละเซลล์



รูปที่ 2.3 เซลล์เชื้อเพลิงที่ต่อเรียงกันเป็นหน่วยชั้น [11]

2.2.3 ตัวแปลงและปรับแต่งกระแสไฟฟ้า

จุดประสงค์ของตัวแปลงและปรับแต่งกระแสไฟฟ้าเพื่อปรับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับกระแสไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าตามต้องการ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าเช่นมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างง่ายหรือระบบการใช้อำนาจไฟฟ้าที่ซับซ้อน เซลล์เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวเท่านั้น แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กันตามบ้านและสำนักงานส่วนใหญ่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลทั้งสองทิศทางสลับกันเป็นวัฏจักร ถ้าต้องใช้เซลล์เชื้อเพลิงกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ ไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงต้องมีการปรับแต่ง การปรับแต่งกำลังไฟฟ้ารวมถึงการควบคุมการไหลของกระแส (แอมแปร์) แรงดัน (โวลต์) ความถี่ และคุณลักษณะอื่น ๆ ของกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าต้องการ การแปลงและปรับแต่งกระแสไฟฟ้าจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 2 ถึง 6 [12]

2.2.4 ระบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่

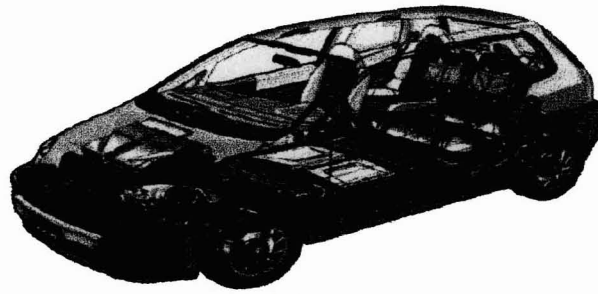
ระบบเซลล์เชื้อเพลิงในเบื้องต้นไม่ได้ใช้เพื่อการผลิตความร้อน อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงบางระบบได้ผลิตความร้อนออกมาจำนวนมาก โดยเฉพาะเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงเช่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell) และ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell) พลังงานความร้อนส่วนเกินนี้สามารถนำไปใช้ผลิตไอน้ำหรือน้ำร้อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยผ่านกังหันแก๊สหรือเทคโนโลยีอื่น ซึ่งเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมทั้งหมดของระบบ

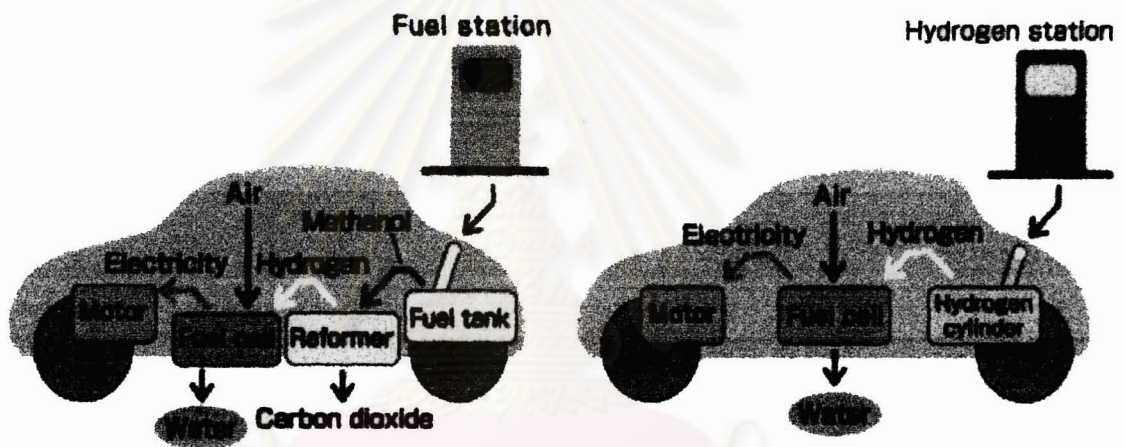
2.3 การใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายเพราะมันคือแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ชนิดหนึ่งในขณะนี้ผู้ผลิตรถยนต์ส่วนใหญ่กำลังสร้างรถยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงเพื่อการพาณิชย์ เซลล์เชื้อเพลิงสามารถใช้เป็นแหล่งกำลังสำหรับรถยนต์ เรือ รถไฟ เครื่องบิน หรือแม้แต่รถจักรยาน เครื่องขยายสินค้าแบบหยอดเหรียญ เครื่องทำความสะอาดแบบสูญญากาศ และสัญญาณไฟตามทางหลวง เซลล์เชื้อเพลิงขนาดพกพาสามารถใช้ได้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์กระเป๋าหิ้ว และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทที่นำติดตัวไปได้หรือใช้ในสถานที่ต่างๆ เช่น โรงพยาบาล โรงแรม สถานีตำรวจหรือธนาคารสามารถใช้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงขนาดใหญ่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ เครื่องใช้ไฟฟ้าและสิ่งอำนวยความสะดวก เซลล์เชื้อเพลิงสามารถใช้ร่วมกับบ่อกักขังและบ่อ บำบัดน้ำเสียโดยเปลี่ยนรูปแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นในบ่อกักขังและบ่อบำบัดน้ำเสียให้เป็นพลังงาน ไฟฟ้า ความเป็นไปได้ในการใช้เซลล์เชื้อเพลิงยังมีอีกมากมาย [13]

เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกนำมาทดสอบ เพื่อจะแทนที่เครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่ง ลักษณะรถยนต์พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell electric vehicle : FCEV) คล้ายกับรถยนต์พลังงาน ไฟฟ้า ต่างกันเพียงแค่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงแทนแบตเตอรี่ และใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง เครื่องยนต์ที่ใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงเป็นเครื่องยนต์สะอาด นอกจากนี้ยังไม่มีชิ้นส่วนอุปกรณ์ ใดๆ เคลื่อนไหว ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงอาจจะสูงกว่าเครื่องยนต์เผาไหม้ ประมาณ 1-3 เท่า เพราะการทำงานของเครื่องยนต์มีการเปลี่ยนพลังงานของเชื้อเพลิงเป็นพลังงาน ความร้อนแล้วจึงเปลี่ยนมาเป็นพลังงานกล เครื่องยนต์ที่ใช้แปลงพลังงานชนิดนี้มีประสิทธิภาพ โดยรวมกันน่าจะอยู่ในระดับ 30-35% เท่านั้น แต่เซลล์เชื้อเพลิงเป็นการทำงานเปลี่ยนพลังงานของ เชื้อเพลิงเป็นกระแสไฟฟ้าโดยตรง จึงให้ประสิทธิภาพสูงกว่า อาจถึง 80% รถที่ใช้พลังงานเซลล์ เชื้อเพลิง สามารถรับกำลังและแรงบิดได้มากกว่ารถไฟฟ้าทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นรถขับเคลื่อนธรรมดา หรือขับเคลื่อน 4 ล้อ แต่ปัญหาสำคัญคือ แก๊สไฮโดรเจน มีราคาค่อนข้างสูง และเป็นสารไวไฟ



(ก) รถคันแบบเซลล์เชื้อเพลิง



(ข) ระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
ในรถยนต์ที่มีเชื้อเพลิงอยู่ในรูป
ทั่วไป

(ค) ระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง
ในรถยนต์ที่มีเชื้อเพลิงอยู่ในรูป
แก๊สไฮโดรเจน

รูปที่ 2.4 การใช้เซลล์เชื้อเพลิงในรถยนต์ [14]

ส่วนประกอบต่างๆในรถคันแบบเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 2.4 (ก) ส่วนท้ายของรถยนต์ประกอบด้วยถังเก็บเชื้อเพลิงสองถังต่อเข้ากับชุดเซลล์เชื้อเพลิงที่อยู่ตรงกลางของรถยนต์และส่วนหน้าของรถยนต์เป็นมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนโดยต่อเข้ากับชุดเซลล์เชื้อเพลิง ส่วนรูปที่ 2.4 (ข) แสดงระบบเซลล์เชื้อเพลิงในรถยนต์ที่มีเชื้อเพลิงอยู่ในรูปทั่วไป เช่น แก๊สธรรมชาติ เมทิลแอลกอฮอล์ หรือแก๊สโซลีน จากสถานีส่งเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปทั่วไปผ่านเข้าสู่ถังเก็บเชื้อเพลิง จากนั้นไหลผ่านตัวแปรรูปเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้แก๊สไฮโดรเจนสำหรับเซลล์

เชื้อเพลิง เมื่อแก๊สไฮโดรเจนไหลผ่านชุดเซลล์เชื้อเพลิงจะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มาจากอากาศเปลี่ยนเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้า จากนั้นพลังงานไฟฟ้าจะขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนทำให้เครื่องยนต์ทำงาน และรูปที่ 2.4 (ค) จากสถานีส่งเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปแก๊สไฮโดรเจนผ่านเข้าสู่ถังเก็บเชื้อเพลิง จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนไหลผ่านชุดเซลล์เชื้อเพลิงเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจากอากาศเปลี่ยนเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยไม่ต้องผ่านตัวแปรรูปเชื้อเพลิง จากนั้นพลังงานไฟฟ้าจะขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ แต่การเก็บเชื้อเพลิงในรูปของแก๊สไฮโดรเจนในเครื่องยนต์นั้น จำเป็นต้องใช้พื้นที่มาก เพราะแก๊สไฮโดรเจนมีความหนาแน่นต่ำทำให้ถังเก็บไฮโดรเจนมีขนาดใหญ่

แหล่งพลังงานพกพา (Portable Power) เซลล์เชื้อเพลิงจะถูกนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์กระเป๋าหิ้ว โทรศัพท์มือถือ เครื่องช่วยฟังซึ่งสามารถใช้งานได้นานกว่าแบตเตอรี่และสามารถประจุไฟใหม่ได้อย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) และ 2.5 (ข)



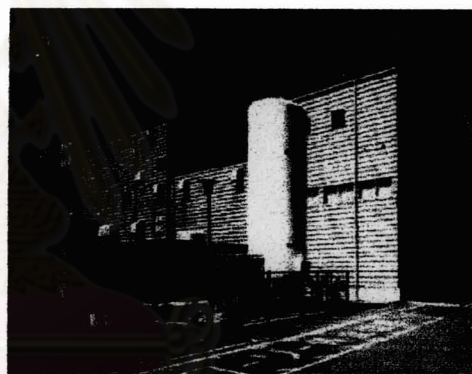
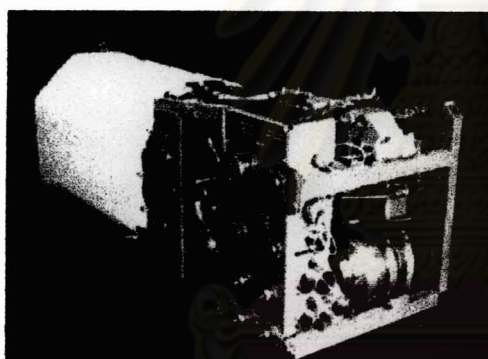
(ก) โทรศัพท์เคลื่อนที่

(ข) คอมพิวเตอร์กระเป๋าหิ้ว

รูปที่ 2.5 โทรศัพท์เคลื่อนที่ และคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบ DMFC [14]

รูปที่ 2.6 (ก) แสดงเซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (AFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงยุคแรกที่มีการสร้างขึ้นมาใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐฯ ในช่วงปี ค.ศ. 1960 เคยถูกใช้ในยานอวกาศ Apollo คือให้พลังงานไฟฟ้าและน้ำดื่มกับมนุษย์อวกาศ ข้อเสียก็คือต้องใช้ทองคำขาว (Platinum) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เชื้อเพลิงคือไฮโดรเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์เท่านั้น ทำให้มีราคาสูงและไวต่อการปนเปื้อน อีกทั้ง Electrolyte มีลักษณะเป็นของเหลวที่อาจรั่วซึมได้ [14]

เครื่องผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ (Large Power Generation) เซลล์เชื้อเพลิงจะถูกนำมาใช้แทนโรงไฟฟ้าที่ใช้พลังงานความร้อน เพราะให้ประสิทธิภาพการผลิตได้มากกว่า นอกจากนี้ยังสามารถใช้ความร้อนและน้ำที่ได้ปั่นเทอร์ไบน์เพื่อผลิตไฟฟ้าได้ด้วยรูปที่ 2.6 (ข) เป็นโรงไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PAFC มีกำลังผลิตขนาด 1 MW ที่ Minato-ku, Tokyo [14]



(ก) เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (AFC) (ข) โรงไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PAFC

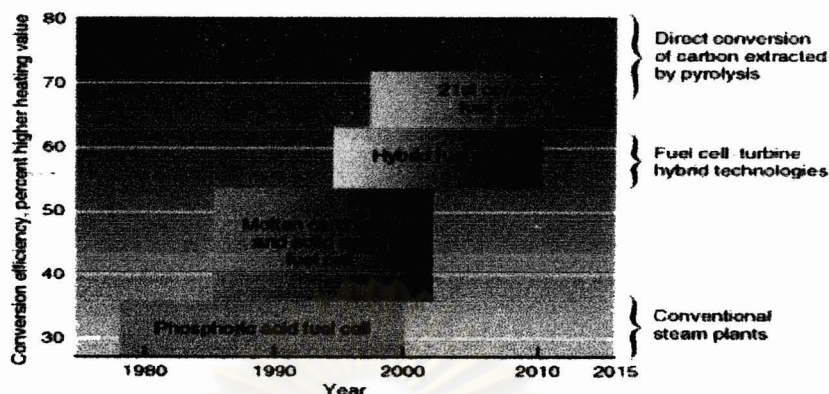
รูปที่ 2.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (AFC) สำหรับยานโคจร และ โรงไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PAFC ขนาด 1 MW ที่ Minato-ku, Tokyo [14]

เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการปฏิบัติการผลิตพลังงานไฟฟ้า เทคโนโลยีนี้เหมาะสำหรับการกระจายระบบการผลิตและส่งกำลังไฟฟ้าไปยังที่ต่าง ๆ เพื่อลดการสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการกระจายโรงงานไฟฟ้าออกไปยังที่ต่าง ๆ สายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีความยาวหลายร้อยกิโลเมตรก็ไม่มีผลทำให้ลดการลงทุนในด้านการส่งกำลังไฟฟ้า นอกจากนั้นเทคโนโลยีนี้ยังให้มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าโรงงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในปัจจุบัน การใช้เซลล์เชื้อเพลิงจะช่วยลดมลพิษทางอากาศและเสียง การปนเปื้อนของน้ำ

ได้คืน ช่วยปรับปรุงคุณภาพชีวิตของประชาชน ปลอดภัยจากการลดการแพร่กระจายของเชื้อเพลิง และแก๊สเรือนกระจก [15]

รูปที่ 2.7 แสดงแนวโน้มการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิง ในช่วงปี 1980 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric-acid fuel cell) ถูกพัฒนาในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น เครื่องผลิตไฟฟ้าภายในบ้าน (Home Power Generation) เซลล์เชื้อเพลิงนี้ผลิตได้ทั้งกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อน แต่ความร้อนที่ผลิตได้ยังมีน้อยจึงทำให้ประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าต่ำ ในช่วงปี 1990 ได้มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเกลือคาร์บอเนตหลอมเหลว (Molten Carbonate Fuel Cell) และ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell) เซลล์เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่ผลิตได้สามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกจึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงสองชนิดนี้มีค่าสูง แต่เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงสองชนิดนี้มีขนาดใหญ่จึงไม่เหมาะสมในการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมเครื่องยนต์ ต่อมาในช่วงปี 2000 ได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์ระบบไฮบริดซึ่งมีการทำงานสองระบบคือระบบเชื้อเพลิงที่เป็นน้ำมันและแก๊สโซลีนและระบบไฟฟ้าโดยระบบไฟฟ้าจะใช้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงทำงานร่วมกันจึงทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพการทำงานสูง แต่ในสภาวะปัจจุบันยังประสบปัญหาในเรื่องราคาน้ำมันและภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นน้ำมันและแก๊สโซลีนทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ และในช่วงปี 2010 ได้มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นและลดราคาเซลล์เชื้อเพลิงให้มีราคาที่ต่ำ เพราะเซลล์เชื้อเพลิงไม่มีปัญหาในเรื่องมลพิษที่ทำให้เกิดโลกร้อนและเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการวิจัยและพัฒนามากคือเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM เนื่องจากมีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิต่ำคือประมาณ 80 องศา มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และเหมาะสมในการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมเครื่องยนต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



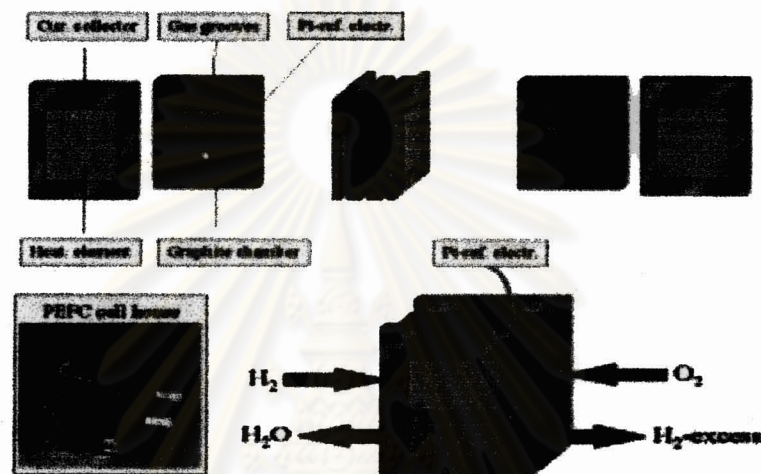
รูปที่ 2.7 แนวโน้มการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต [16]

2.4 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM

โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ประกอบด้วยอิเล็กโทรดทางด้านเชื้อเพลิง (ขั้วแอโนด) และอิเล็กโทรดทางด้านออกซิเจน (ขั้วแคโทด) ซึ่งต่างก็ทำมาจากวัสดุ Porous-carbon โดยมีแพลทินัม (Pt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) กระจายตัวและฝังตัวอยู่ที่ขั้วทั้งสองอย่างสม่ำเสมอเพื่อช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นและมีแผ่น Gas Diffusion Backing ประกบปิดอีกชั้นหนึ่งเพื่อทำหน้าที่เป็นช่องทางผ่านของแก๊สที่เข้ามาทำปฏิกิริยาและรักษาความชื้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงด้วย และทั้งสองขั้วจะถูกแยกออกจากกันด้วยชั้นอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการนำโปรตอนได้ดี (Ion-Conducting) ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนโปรตอนระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด ด้วยเหตุนี้เองจึงได้เรียกว่า Proton Exchange Membrane (PEM) โดยอิเล็กโทรไลต์มีสมบัติเป็นตัวนำสำหรับโปรตอนแต่เป็นฉนวนสำหรับอิเล็กตรอนและมีตัวกันการแทรกซึมของแก๊สด้วยเมื่อนำแต่ละส่วนประกอบมารวมกัน จะเรียกรวมกันว่า Membrane Electrode Assembly (MEA)

ในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงหนึ่งเซลล์นั้นจะต้องมีแผ่นประกบที่ค้ำวางอยู่แต่ละด้านของ MEA โดยแผ่นประกบนี้ต้องถูกทำให้ผิวหน้าที่สัมผัสกับ MEA เป็นช่องทางไหลของแก๊ส (Flow-channel) เพื่อเป็นทางเดินของแก๊สให้เข้าทำปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรด ต้องมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและทนต่อสภาวะความเป็นกรดสูงได้ เรียกแผ่นประกบนี้ว่า แผ่นช่องทางการไหลของแก๊ส (Flow field plate) และทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าโดยวัสดุที่นิยมใช้คือ แกรไฟต์ นอกจากนั้นยังต้องมีแผ่นประกบ (Gasket) ที่มีสมบัติยืดหยุ่น ทนต่ออุณหภูมิสูงและแรงกดอัดได้ดี ซึ่งวัสดุที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันคือ Teflon หรือ Silicone โดยทำหน้าที่ป้องกันแก๊สไม่ให้รั่วซึม ซึ่งจะแทรกไว้ในแต่ละหน้า

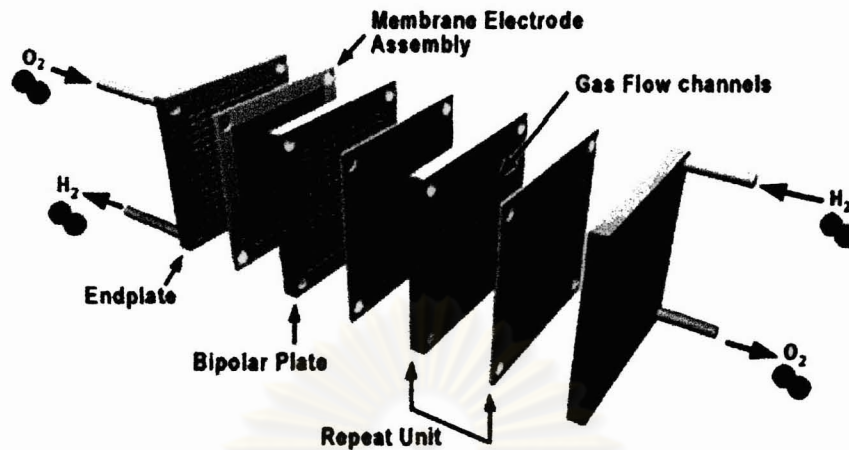
ประกบกันระหว่างแผ่นนำกระแสไฟฟ้ากับ MEA องค์ประกอบทั้งหมดจะถูกประกบติดกันเรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM 1 เซลล์ (Single cell) [17]

สำหรับการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงหลายๆเซลล์หรือเรียกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบชั้น (Fuel cell stack) จะเป็นการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาเรียงต่อกันหรือเรียงซ้อนกันเป็นชั้น (รูปที่ 2.9) เพื่อเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้า โดยใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว เป็นตัวเชื่อมเซลล์โดยทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดของเซลล์หนึ่งและขั้วแคโทดของอีกเซลล์หนึ่ง

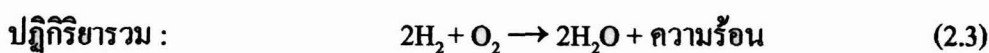
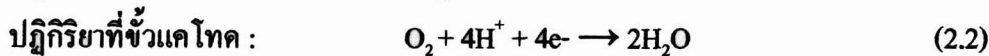
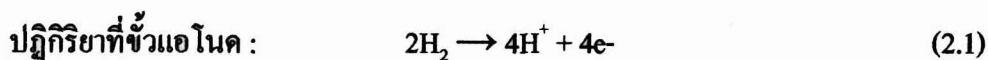
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

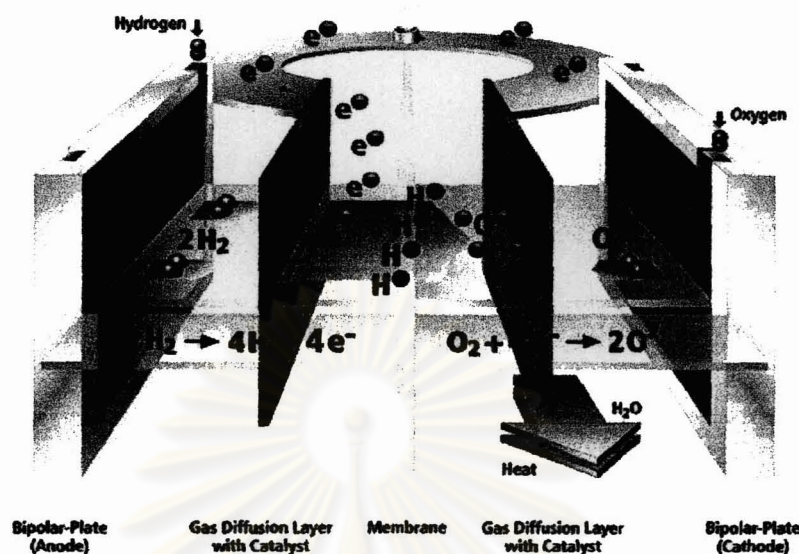


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เมื่อนำมาต่อกันแบบชั้น (Fuel cell stack) [18]

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM มีการทำงานที่อุณหภูมิค่ามีประสิทธิภาพสูงเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง จึงมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาองค์ประกอบต่างๆของเซลล์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้น ในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สามารถทำได้โดยนำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน (Fuel cell stack) โดยใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมาเชื่อมต่อระหว่างเซลล์

เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ได้รับความนิยมมากเพราะให้ความหนาแน่นพลังงานสูงและมีข้อได้เปรียบที่น้ำหนักเบาและปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ใช้พอลิเมอร์แข็งเป็นอิเล็กโทรไลต์และใช้คาร์บอนพอร์เป็นขั้วไฟฟ้าโดยมีแพลทินัม (Pt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากรูปที่ 2.10 ไฮโดรเจนไหลเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงทางขั้วแอโนดและถูกแยกออกเป็นไฮโดรเจนไอออน (โปรตอน) และอิเล็กตรอน ไฮโดรเจนไอออนแพร่ผ่านเมมเบรนที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ผ่านไปยังขั้วแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนไหลผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกป้อนกำลังให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า ออกซิเจนถูกป้อนเข้าทางด้านแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิง และรวมเข้ากับอิเล็กตรอนและไฮโดรเจนไอออนกลายเป็นน้ำและความร้อน ปฏิกิริยาทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นดังสมการต่อไปนี้





รูปที่ 2.10 เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [19]

2.5 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate)

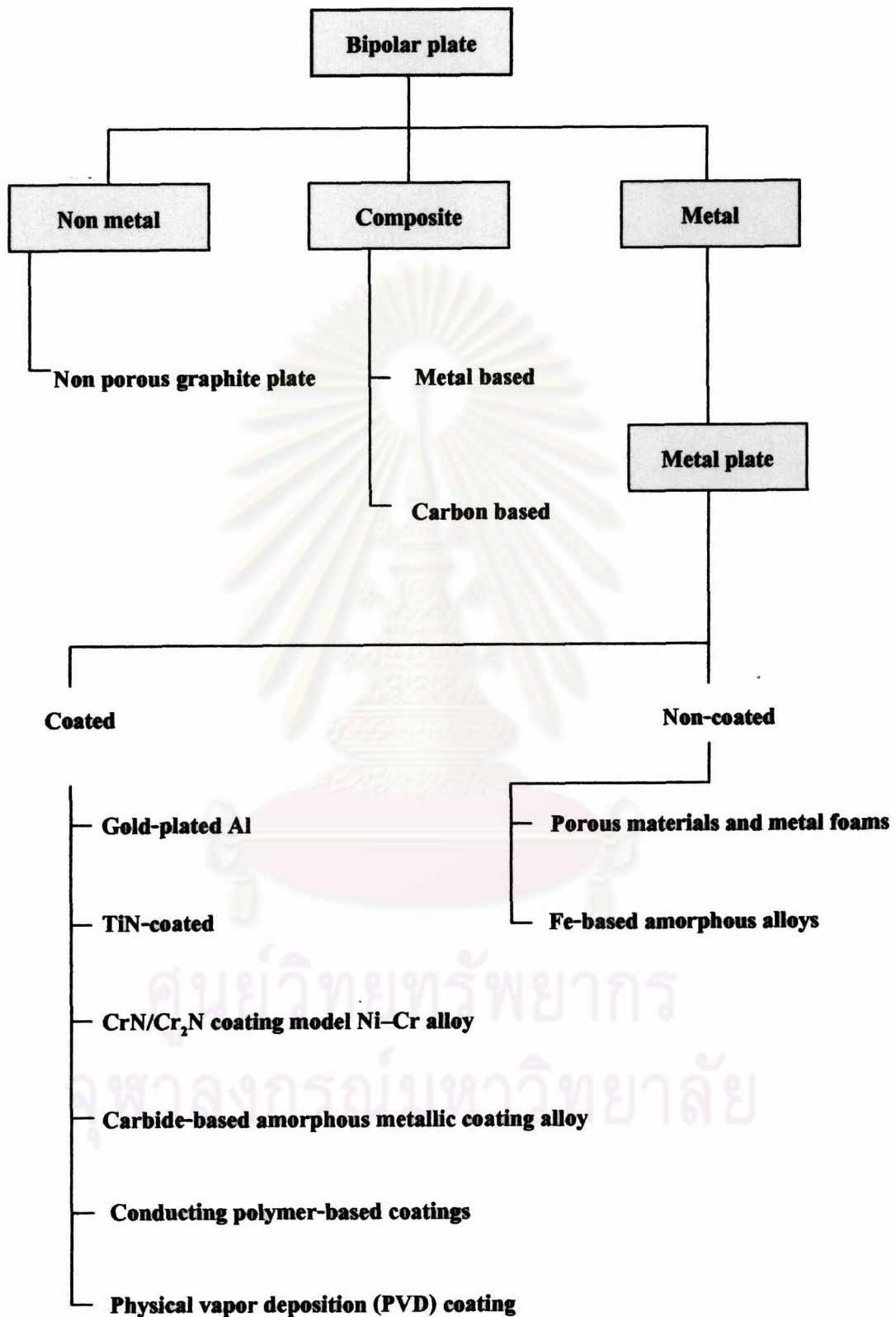
เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เป็นพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีการเปลี่ยนเป็นพลังงานที่สะอาด เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plates) และแผ่นประกอบเมมเบรน (MEA) โดยแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมีน้ำหนักและปริมาณมากกว่าร้อยละ 80 ของเซลล์เชื้อเพลิงทั้งหมดและการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วด้วย [20]

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมีหน้าที่หลักคือ เป็นช่องการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน นำไฟฟ้าระหว่างเซลล์ แยกน้ำและจัดการความร้อนที่ไหลผ่านเซลล์ การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วต้องเตรียมขึ้นจากวัสดุที่ขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูก นำไฟฟ้าได้สูง และทนต่อการกัดกร่อนสารเคมีได้ดี แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ที่นิยมใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงทำมาจากแกรไฟต์เนื่องจากทนการกัดกร่อนได้ดีและมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าน้อย แต่ราคาแพงและขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากเปราะ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวัสดุต่างๆ เพื่อใช้แทนแกรไฟต์สำหรับทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว คาร์บอนคอมพอสิตได้ใช้เป็นวัสดุมาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เพราะว่ามีค่าความต้านทานสัมผัสที่ต่ำและมีค่าทนต่อการกัดกร่อนที่สูง แต่คาร์บอนคอมพอสิตยังมีข้อเสียในด้านการนำไฟฟ้า การแพร่ซึมแก๊สสูงและมีการขึ้นรูปที่ยากเมื่อเทียบกับโลหะเช่น อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม นิกเกิล ไทเทเนียม

มีการพิจารณาประยุกต์ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการขนส่ง เพราะโลหะจะมีสมบัติเชิงกลที่สูง มีความคงทนต่อแรงอัด การกระแทก ไม่มีการแพร่ซึมของแก๊ส และมีการขึ้นรูปได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ทำมาจากคาร์บอน อย่างไรก็ตามข้อเสียของโลหะก็คือการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะการทำงานที่เป็นกรดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวของโลหะจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดต่ำลง ดังนั้นจึงมีการพิจารณาใช้โลหะที่มีการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเช่น แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยไนไตรด์และคาร์ไบด์ โดยลดค่าความต้านทานสัมผัสและได้วัสดุที่ราคาถูกลง ซึ่งมีการวิจัยหาวัสดุหลายชนิดเพื่อผลิตเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.11



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจากวัสดุชนิดต่างๆ [21]

2.5.1 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน (Non-porous graphite plates)

แกรไฟต์ชนิดที่ไม่มีรูพรุนมีความสามารถทนต่อสารเคมีเมื่อใช้ในบรรยากาศของเซลล์เชื้อเพลิง มีค่าการนำไฟฟ้าและค่าการนำความร้อนสูง และการแพร่ผ่านของแก๊สหรือความสามารถในการให้แก๊สซึมผ่านมีค่าต่ำ แต่แกรไฟต์ยังมีราคาแพง และขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากมีสมบัติเปราะและแตกง่าย ในการผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงนั้นมีการใช้ทั้งแกรไฟต์ธรรมชาติและแกรไฟต์สังเคราะห์ในการผลิต

2.5.2 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคอมโพสิต (Composite bipolar plates)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

แผ่นคอมโพสิตฐานโลหะ (Metal based) แผ่นคอมโพสิตชนิดนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1) แกรไฟต์ชนิดรูพรุน ซึ่งมีสมบัติทางด้านการป้องกันการกัดกร่อน 2) เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นส่วนให้ความแข็งแรงกับโครงสร้างของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าซึ่งสะดวกต่อการขึ้นรูปเพื่อให้ได้ช่องการไหลของแก๊สตามต้องการ 3) พลาสติกพอลิคาร์บอเนตเป็นส่วนช่วยในการยึดติดระหว่างแกรไฟต์ชนิดรูพรุนและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมและช่วยในการต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิง แต่แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคอมโพสิตฐานโลหะที่มีพลาสติกพอลิคาร์บอเนตเป็นส่วนช่วยในการยึดติดยังให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำส่งผลให้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคอมโพสิตฐานโลหะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำด้วย [22]

แผ่นคอมโพสิตฐานคาร์บอน (Carbon based) ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนเมทริกซ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก จัดเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) รวมทั้งเป็นส่วนห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกัน โดยทั่วไปจะประกอบด้วย พอลิเมอร์และสารนำไฟฟ้าประเภทคาร์บอน และส่วนเสริมแรงซึ่งเป็นวัสดุที่ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) มีลักษณะรูปร่างได้หลายแบบ อาจเป็นแผ่น เส้นใย หรืออนุภาคเล็กๆก็ได้ แต่แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคอมโพสิตฐานคาร์บอนยังให้ค่าการนำไฟฟ้าและความแข็งแรงที่ต่ำ

2.5.3 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะ (metal bipolar plates)

การปรับเปลี่ยนวัสดุและโลหะผสมเพื่อพัฒนาแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วสำหรับใช้ในสถานะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM จึงได้นำข้อดีของทั้งแกรไฟต์และโลหะมารวมกันเพื่อให้ได้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนและมีค่าความต้านทานสัมผัสที่ต่ำคล้ายกับแกรไฟต์และมีสมบัติเชิงกลที่ดีไม่มีการแพร่ซึมของแก๊สและไม่เปราะแตกง่ายเหมือนกับโลหะเช่น แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม ไทเทเนียม ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะ มีการปรับเปลี่ยนชนิดของโลหะ และวิธีการเคลือบผิว เพื่อลดค่าความต้านทานสัมผัส และป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะที่สถานะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.5.3.1 แผ่นโลหะที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว (Non-coated metal bipolar plates) ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมยังเป็นโลหะชนิดเดียวที่มีความเหมาะสมในการผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว เนื่องจากตัววัสดุค่อนข้างมีความแข็งแรงสูง มีความทนทานต่อสารเคมี การซึมผ่านได้ของแก๊สต่ำ มีช่วงของการทำเป็นอัลลอยที่กว้างสามารถผลิตในปริมาณมากได้และมีราคาถูก อย่างไรก็ตาม ได้มีผู้ศึกษาการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณ โครเมียมสูงในการผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วพบว่ามีความเหมาะสม [23] แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- เหล็กจำพวกอะมอร์ฟัสอัลลอย (Fe-based amorphous alloys)

Jayaraj et al. [24] เปรียบเทียบค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอะมอร์ฟัสอัลลอย 2 จำพวกคือ Fe48Cr15Mo14Y2C15B6 และ Fe50Cr18Mo8A12Y2C14B6 ภายใต้สถานะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง แก๊สไฮโดรเจน ความดันบรรยากาศ สารละลาย 1 โมลาร์ของกรดซัลฟิวริกและฟลูออโรอิก 2 ppm ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ทดลองภายใต้ความสัมพัทธ์ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดในสถานะการทำงานคล้ายการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน Fe50Cr18Mo8A12Y2C14B6 อะมอร์ฟัสอัลลอย ได้แสดงค่าการป้องกันการกัดกร่อนได้สูง เพราะมีส่วนประกอบของโครเมียมเป็นองค์ประกอบ เมื่อมีปริมาณของโครเมียมสูงจะมีส่วนสำคัญในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดี

- วัสดุที่เป็นรูพรุนและโลหะ (Porous materials and metal foams)

Kumar and Reddy [25] ศึกษาวัสดุที่เป็นรูพรุนคือ โลหะนิกเกิล-โครเมียม (เพิ่ม Fe 8%, Cr 2%, Ni เท่าเดิม) ซึ่งปกคลุมด้วยขนาดรูพรุน 50 Pore per inch (PPI) และแผ่นเหล็กกล้า

ไร้สนิมชนิด SUS 316L มีขนาดรูพรุน 20 PPI เตรียมเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วพบว่า ไอออนจะสามารถเคลื่อนที่ไปตามโลหะได้ดี อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการจัดการน้ำของการต่อเรียงกันเป็นหน่วยชั้นเซลล์ แต่โลหะสามารถขึ้นรูปแบบช่องการไหลได้เหมาะสมกว่า ในอนาคตพบว่าโลหะสามารถลดการแพร่ซึมของแก๊ส และสามารถทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เกี่ยวกับขนาด ความลึก และการกระจายตัวในโลหะ ข้อได้เปรียบอีกอย่างของโลหะคือเรื่องของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าโดยใช้คาร์บอนเป็นขั้วอิเล็กโทด

2.5.3.2 แผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว (Coated metal bipolar plates)

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิด โลหะที่เคลือบผิวจะป้องกันการกัดกร่อน การเคลือบผิวจะยึดติดแน่นกับโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน วัสดุสองชนิดที่เลือกในการเคลือบผิวคือ คาร์บอนและโลหะ [26] คาร์บอนที่เป็นสารเคลือบผิวจะรวมถึงแกรไฟต์ โพลีเมอร์นำไฟฟ้า คาร์บอนที่โครงสร้างคล้ายเพชร ออร์แกนิก โมโนพอลิเมอร์ ส่วนโลหะ โลหะไนไตรด์ และโลหะคาร์ไบด์ ทั้งหมดจะเป็นวัสดุที่ถูกเคลือบผิว ในอนาคตจะมีการเคลือบผิวโลหะ โดยการใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวทำให้เกิดรูพรุนในระดับไมโครเมตร [27] โดยกระบวนการเคลือบผิวจะขึ้นกับเทคนิคของการพัฒนาการเคลือบผิวของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว Mehta [28] การใช้คาร์บอนและโลหะเป็นวัสดุที่ถูกเคลือบและชนิดของคาร์บอนที่ใช้เป็นสารเคลือบคือ แกรไฟต์ โพลีเมอร์นำไฟฟ้า คาร์บอนคล้ายเพชร โมโนพอลิเมอร์อินทรีย์ โลหะ โลหะไนไตรด์ และโลหะคาร์ไบด์ สรุปการค้นพบการเคลือบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วและเทคนิคในการเคลือบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ได้สรุปรวมเกี่ยวกับค่าการขยายตัวของอุณหภูมิ (CTE) การป้องกันการกัดกร่อนของการเคลือบผิวในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน โดยการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีการทำงานที่อุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียส และการทำงานของเครื่องยนต์เริ่มมีการทำงานและหยุดการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่าง 75-125 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดการทำงานของเครื่องยนต์ ค่าการขยายตัวของอุณหภูมิมิมีค่าแตกต่างกันมากทำให้พื้นผิวของวัสดุที่เคลือบผิวถูกทำลาย แต่ก็มีเทคนิคหนึ่งที่ทำให้ค่าการขยายตัวของอุณหภูมิมิมีค่าความแตกต่างกันน้อยคือ การเคลือบผิวด้วยวัสดุจำพวก อะลูมิเนียม ทองแดง และนิกเกิล แต่จะทำให้มีค่าการกัดกร่อนสูงในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน อย่างไรก็ตามการเคลือบผิวด้วยวัสดุอย่างเช่น อะลูมิเนียม ฟอสฟอรัส นิกเกิล ให้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับแกรไฟต์ที่เป็นต้นแบบของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ดังนั้นจึงได้มีการแสดงวิธีการและกระบวนการในการเคลือบผิวของโลหะชนิดต่างๆ และสารเคลือบที่ต่างชนิดกัน ได้ดังนี้

- การเคลือบผิวด้วยทองลงบนอะลูมิเนียม (Gold-plated Al)

การเคลือบผิวด้วยทองลงบนแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อเตรียมเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วแทนแผ่นแกรไฟต์ โดยทดสอบแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยทองเทียบกับแผ่นแกรไฟต์ในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ได้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงของแผ่นแกรไฟต์อยู่ที่ 1.2 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ความต่างศักย์ 0.5 โวลต์ แต่เมื่อใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยทองนั้นพบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงลดต่ำลง วิเคราะห์ได้ว่าเนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวทองได้เกิดการกัดกร่อน และหลุดออกบนผิวหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยทอง ภายหลังจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดต่ำลง

- เคลือบผิวด้วยพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conducting polymer-based coatings)

Shine et al. [29] ศึกษาการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ด้วยพอลิเมอร์พอลิอะนิลีน (PANI) และพอลิไพโรน (PPY) ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า โดยใช้กระบวนการ Cyclic - voltametry ในการทำพอลิเมอร์โรเซชัน และการพอกพูนของพอลิเมอร์ การเคลือบพอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมทดสอบค่าการกัดกร่อนและความต้านทานสัมผัสภายใต้สภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน มีการปรับปรุงค่าการกัดกร่อนและค่าความต้านทานสัมผัสที่ยอมรับได้แต่ราคาความคงทนและปริมาณที่ผลิตยังไม่เหมาะสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 วัสดุที่ใช้เคลือบผิวและกระบวนการเคลือบผิวของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบโลหะ [30]

วิธีการเคลือบ	วัสดุที่ใช้ในการเคลือบ	กระบวนการเคลือบ	แผ่นวัสดุที่เป็นฐานในการเคลือบผิว อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม ไททาเนียม นิกเกิล			อ้างอิง
เคลือบด้วยพอลิเมอร์นำไฟฟ้า	พอลิเมอร์นำไฟฟ้า	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ			[29]
เคลือบด้วยคาร์บอนคล้ายเพชร	คาร์บอนคล้ายเพชร	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ			[29]
เคลือบผิวชั้นบนด้วยทอง	ทองผสมนิกเกิลและทองแดง	กระแสไฟฟ้าสลับ	×			[29]
เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์	(1) เคลือบผิวด้วยอนุภาคแกรไฟต์ ด้วยการละลายหรือการทำโดยผสม สารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซินและ ตัวทำละลายทูลูอิน (2) เคลือบด้วย แผ่นแกรไฟต์บาง	ทาหรือการอัด	×	×	×	[29]
เคลือบผิวชั้นบนด้วยแกรไฟต์	(1) ผสมไททาเนียม อะลูมิเนียม หรือ ไนโคลด์ (2.a) ผสมโลหะด้วยโครเมียม (ไททาเนียม นิกเกิล เหล็ก โคบอล) หรือ (2.b) เคลือบผิวชั้นบนด้วยแกรไฟต์	กระบวนการ PVD (การสปัตเตอร์ริง)	×	×	×	[31]
อินเดียมผสมไททาเนียมออกไซด์ และเลคออกไซด์เคลือบผิว	อินเดียมผสมทินออกไซด์ (SnInO ₂)	สปัตเตอร์ริง	×			[31]

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) วัสดุที่ใช้เคลือบผิวและกระบวนการเคลือบผิวของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบโลหะ

วิธีการเคลือบ	วัสดุที่ใช้ในการเคลือบ	กระบวนการเคลือบ	แผ่นวัสดุที่เป็นฐานในการเคลือบผิว			อ้างอิง
			อะลูมิเนียม	เหล็กกล้าไร้สนิม	ไททาเนียม นิกเกิล	
โมโนพอลิเมอร์อินทรีย์เคลือบผิวเคลือบผิวบนซิลิกอนคาร์ไบด์	บนด้วยเลคออกไซด์	ไม่ระบุ กระบวนการ PVD	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	×	[32]
	โมโนพอลิเมอร์อินทรีย์					[32]
เคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม	(1) เคลือบบนซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิด N	กระบวนการ PVD และ กระบวนการ CVD	×	×	×	[33]
	(2) เคลือบผิวบนทอง					
ไททาเนียม อะลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบผิว	(1) เคลือบผิวด้วยโครเมียม นิกเกิลบนเหล็กกล้าไร้สนิมหรือนิกเกิล-ฟอสฟอรัส (2) เคลือบผิวชั้นบนด้วยไททาเนียมไนไตรด์	สปีดเคอร์ริง	×			[34]
	ไททาเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์เคลือบผิว					
ไททาเนียมไนไตรด์เคลือบผิว	ไททาเนียมไนไตรด์เคลือบผิว	สปีดเคอร์ริง		×		[34]

- การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยไททาเนียมไนไตรด์ (TiN-coated)

Li et al. [31] ศึกษาการเคลือบผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 316) ด้วยไททาเนียมไนไตรด์จะ ให้เพิ่มสมบัติทนต่อการกัดกร่อนในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน และได้ทดสอบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 316) ที่เคลือบผิวด้วยไททาเนียมไนไตรด์ใน สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์ต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยใช้แก๊สออกซิเจนและแก๊ส ไฮโดรเจน ใช้เทคนิควิธีการวัดทางเคมีไฟฟ้า พบว่าการเคลือบด้วยไททาเนียมไนไตรด์จะสามารถป้องกันการ กัดกร่อนได้ดี และไม่ทำให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการผุกร่อนเมื่อเคลือบผิวด้วยไททาเนียมไน ไไตรด์ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง 4 ชั่วโมง พบว่ามีการสูญเสียการเคลือบผิวไททาเนียม ไนไตรด์เมื่ออยู่ในสภาวะการทำงานของแก๊สออกซิเจน 1000 ชั่วโมง และแก๊สไฮโดรเจน 240 ชั่วโมง ตามลำดับ การเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยไททาเนียมไนไตรด์ พบว่าจะมีค่าป้องกันการกัดกร่อนและ ค่าการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวและในอนาคตจะได้ปรับปรุงคุณภาพ และการเสถียรของการเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยไททาเนียมไนไตรด์ภายใต้ระบบการเคลือบผิวที่ ต้องการ

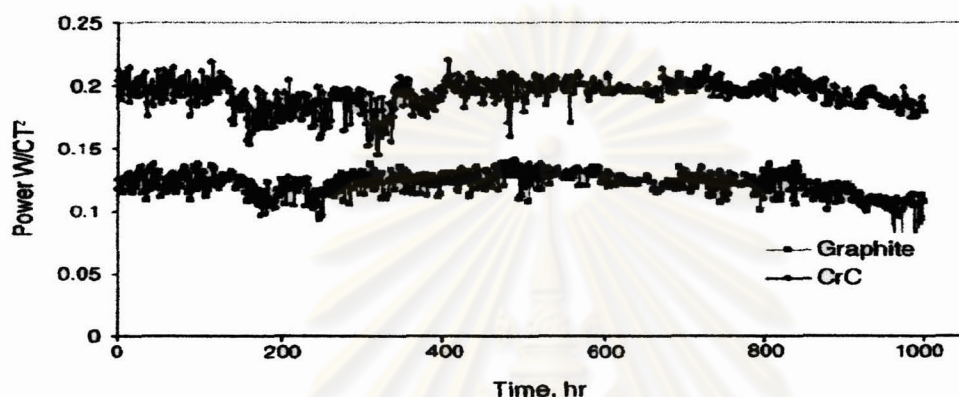
- CrN/Cr₂N เคลือบผิวบนนิเกิล-โครเมียมอัลลอย (CrN/Cr₂N coating model Ni-Cr alloy)

Hung et al. [32] ศึกษาการพัฒนากระบวนการไนไตรด์เคชันด้วยความร้อนในการเคลือบ CrN/Cr₂N เคลือบผิวบนนิเกิล-โครเมียมอัลลอย พบว่าทำให้ป้องกันการกัดกร่อนได้ดีและมีค่าความ ต้านทานสัมผัสที่ต่ำ อีกจุดหนึ่งที่สำคัญมีค่าการนำไฟฟ้าสูง ค่าการกัดกร่อนบนผิว Cr-N สามารถเปลี่ยน รูปเป็น Ni-Cr และ Ni (Fe)-Cr บนอัลลอยของโครเมียมที่ระดับน้อยกว่าร้อยละ 35 ของการทำไนไตรด์ เคชันด้วยความร้อน การเพิ่มไนไตรด์เคชันของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 446 ภายใต้เงื่อนไขการทำเป็นฟิล์ม บาง แต่จะไม่อยู่ในรูป Cr-N บนพื้นผิว พบว่าสามารถลดค่าความต้านทานสัมผัสได้มากกว่าหลายเท่า โดย ไม่เกิดการกัดกร่อนบนพื้นผิวและทำให้เกิดการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ชนิดโลหะในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอน

- ฟอสฟอรัสคาร์ไบด์เคลือบบนโลหะอัลลอย (Carbide-based amorphous metallic coating alloy)

Fronk et al. [33] มีพัฒนาการป้องกันการกัดกร่อนโดยการเคลือบฟอสฟอรัสคาร์ไบด์ลงบน อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อเตรียมเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วขนาดเซลล์เดี่ยวพื้นที่ การทำปฏิกิริยา 6.25 ตารางเซนติเมตรเปรียบเทียบกับแกรไฟต์ภายใต้ตัวแปรและการทำงานคล้ายกัน ดัง แสดงในรูปที่ 2.12 ที่แสดงประสิทธิภาพและสภาวะการทำงานจริงไปพร้อมๆกันของแกรไฟต์และแผ่น

นำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบโลหะภายใต้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ 1000 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพลดต่ำลง เพราะพันธะที่ยึดกันมีค่าแข็งแรงมากระหว่างสารเคลือบผิวและวัสดุที่ถูกเคลือบ โดยการเคลือบมีความเร็วสูงใช้แก๊สออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้ระบบการฉีดพ่นด้วยความร้อนทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรในการเคลือบผิวจึงทำให้ป้องกันการกัดกร่อนได้ดี และอนาคตศึกษาการเคลือบผิวที่มีความคงทนและทำให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น



รูปที่ 2.12 ค่าประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดี่ยวของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเคลือบฟอสฟอรัสคาร์ไบด์ลงบนอะลูมิเนียมเทียบกับแกรไฟต์ภายใต้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ 1000 ชั่วโมง [33]

- เคลือบด้วยกระบวนการ PVD (Physical vapor deposition (PVD) coating)

Lee et al. [34] ศึกษาการประยุกต์กระบวนการ PVD ในการเคลือบ YZU001 ฟิล์มคล้ายเพชรลงบนอะลูมิเนียมอัลลอย 5052 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316 ทดสอบประสิทธิภาพเทียบกับแกรไฟต์ โดยอัตราการกัดกร่อนหาได้จากวิธีการกราฟโพลาริเซชัน แผ่นอะลูมิเนียมและ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบผิวเทียบกับแกรไฟต์ ทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดี่ยววัดความต้านทานสัมผัสและทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบโลหะ ที่เคลือบด้วยกระบวนการ PVD บนแผ่นอะลูมิเนียม 5052 และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316 YZU001 ที่เคลือบผิวลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316 ให้ค่าการกัดกร่อนมากกว่า YZU001 ที่เคลือบผิวลงบนแผ่นอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบผิวจะมีความต้านทานสัมผัสที่ต่ำกว่าจึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานมากกว่าแผ่นอะลูมิเนียมที่เคลือบผิว

อย่างไรก็ตามวัสดุที่นำมาผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองแบบสองขั้วนั้น ไม่มีวัสดุชนิดใดที่จะเป็นไปตามเกณฑ์ทั้งหมด ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการเลือกวัสดุสำหรับผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว รวบรวมแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเมื่อใช้วัสดุที่แตกต่างกัน [30]

แกรไฟต์ (เขาระว่องโดยใช้เครื่องจักร)	โลหะ	แกรไฟต์คอมพอสิต
ข้อได้เปรียบ		
มีความเสถียร	ค่าการนำความร้อนสูง	ค่าความต้านทานสัมผัสต่ำ
ความหนาแน่นจำเพาะต่ำ	สามารถรีไซเคิลได้	ทนการกัดกร่อนสูง
ความต้านทานสัมผัส	ผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอ	
ทนต่อการกัดกร่อนสูง		
ข้อเสียเปรียบ		
ราคาแพงเมื่อเขาระว่องด้วยเครื่องจักร	ต้องการเคลือบ	ค่าการนำไฟฟ้ารวมต่ำ
เปราะ	เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม	
มีความหนา	เกิดฉนวนออกไซด์ที่พื้นผิว	

โดยสรุปแล้วการออกแบบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนั้นจะขึ้นอยู่กับราคาและมวลโดยรวมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง และความทนทานต่อภาวะในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำและอุณหภูมิสูง แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วควรมีคุณสมบัติดังนี้ [30]

- ค่าการนำไฟฟ้า: ค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร
- ค่าการนำความร้อน: มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
- ค่าการซึมผ่านของแก๊ส: น้อยกว่า 10^{-4} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที. ตารางเซนติเมตร
- ความทนแรงอัด: มากกว่า 22 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- ค่าความต้านทานสัมผัส: น้อยกว่า 20 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร
- ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน: น้อยกว่า 16 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shigehiro et al. [22] ได้ทำการพัฒนาแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะที่ป้องกันการกัดกร่อนและนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งจะเคลือบที่ผิวด้วยคาร์บอนผสมเรซินบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสารเคลือบจะประกอบด้วยผงแกรไฟต์ อีพอกซี เรซินและ ฟีนอล โดยหาส่วนผสมที่ดีที่สุดและมีการหาค่าการนำไฟฟ้าและความเสถียรทางด้านเคมีของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะ พบว่าป้องกันการกัดกร่อนได้ดีโดยทดสอบที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ของกรดซัลฟิวริก อุณหภูมิ 90°C นานกว่า 2000 ชั่วโมง และพบสภาพด้านทานที่ผิวน้อยกว่า 13.8 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร เคลือบด้วยกระบวนการฉีดพ่นที่สภาวะการเคลือบที่อุณหภูมิคงที่ 1053 เคลวิน นาน 5 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงเหลือ 373 เคลวิน นาน 1.5 ชั่วโมง

Tomokazu et al. [37] ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทำเป็นฟิล์มบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งการเคลือบคาร์บอนจะเตรียมด้วยวิธี CVD ศึกษาลักษณะทั่วไปด้วย Raman Spectroscopy และ Atomic Force Microscopy ศึกษาการกัดกร่อนด้วยกรดซัลฟิวริกโดยพิจารณาค่าความต้านทานภายในก่อนและหลังการกัดกร่อนและความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทดสอบในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ผลการทดลองแสดงว่าสามารถป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมได้ แผ่นฟิล์มผสมกับโลหะออกไซด์สามารถลดความต้านทานภายในระหว่างแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วและช่องการไหลของแก๊ส การลดความต้านทานภายในและการกัดกร่อนจะทำให้สมบัติของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าดีขึ้น

Dhakate et al. [38] ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วฐานแกรไฟต์ด้วยเทคนิคการอัดความดัน โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดน้ำหนักและราคาแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วสำหรับการประยุกต์ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง โดยพัฒนาแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วผสมแกรไฟต์ แผ่นคอมพอสิตที่เตรียมได้จะเพิ่มความแข็งแรงที่แตกต่างกัน โดยเพิ่ม แกรไฟต์ธรรมชาติ แกรไฟต์สังเคราะห์ คาร์บอนแบล็ก คาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งผสมด้วยสารเติมแต่งด้วยเรซินชนิดแข็งและของเหลวในอัตราส่วนในการผสมระหว่างร้อยละ 5-40 โดยปริมาตรและศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกล โดยได้ค่าสมบัติต่างๆดังนี้ ความหนาแน่นประมาณ 1.85 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความนำไฟฟ้ามากกว่า 150 ซีเมนส์/เซนติเมตร

เอื้องควา [39] ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองแบบชั่วคราวสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยน โปรตอนคือ การเตรียมจากพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยสารเติมแต่งที่นำไฟฟ้า และศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา การนำไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมในงานวิจัยนี้ พบว่าผลกระทบร่วมในพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าร่วมระหว่างอะเซทิลีนแบล็กกับเส้นใยคาร์บอนให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าชนิดเดียว โดยพอลิเมอร์คอมพอสิตของอะเซทิลีนแบล็กร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมพอสิตของอะเซทิลีนแบล็กร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และพอลิเมอร์คอมพอสิตของอะเซทิลีนแบล็กร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 3.3 ซีเมนส์/เซนติเมตร เมื่อพิจารณาต้นทุนในการผลิต พบว่าการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของอะเซทิลีนแบล็กร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีต้นทุนต่ำสุด การเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตทำได้โดยการเติมสารเติมแต่ง ซึ่งการเตรียมซิงค์สเตียเรต 5 phr ร่วมกับไททานเนียมออกไซด์ 3 phr ในพอลิเมอร์คอมพอสิตของอะเซทิลีนแบล็กร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กับเส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.006 ซีเมนส์/เซนติเมตร อีกทั้งยังพบว่าการเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดนี้ ส่งผลต่อความหนาแน่นและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดูดซับน้ำและความแข็งแรงโค้งลดลง

เสาวลักษณ์ [40] ศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสแบบสองชั้นชนิดคอมพอสิตฐานแกรไฟต์โดยใช้สารยึดติดประเภทเทอร์โมเซต ได้แก่ พอลิอีพทีเรท (POE) ฟีนอลิก โมดิฟายด์แอลคิเดเรซิน (PhA) เรซินผสม (POE และ 10% wt. PhA) และอีพอกซีเรซิน (EP) รวมทั้ง โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และเชิงกล ผลการทดลองพบว่า POE สามารถรวมตัวกับผงแกรไฟต์ได้ในปริมาณที่มากกว่า PhA และเรซินผสม (อิมิต์ที่ผงแกรไฟต์ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก) รวมทั้งให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า (ค่าการนำไฟฟ้า 4.2 ซีเมนส์/เซนติเมตร) ส่วนสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน (EP) จะทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ในการศึกษาผลของสารเติมแต่ง (เส้นใยคาร์บอน (CF) ไททานเนียมออกไซด์ (TiO_2) และซิงค์สเตียเรท (ZnSt)) พบว่าไททานเนียมออกไซด์และซิงค์สเตียเรทจะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานลดลงเล็กน้อย แต่จะช่วยลดค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงาน นอกจากนี้ไททานเนียมออกไซด์จะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของชิ้นงานดีขึ้น ส่วนเส้นใยคาร์บอนจะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และร้อยละการดูดซับน้ำของชิ้นงานเพิ่มขึ้นทั้งในชิ้นงานที่ใช้ POE และ EP เป็นสารช่วยยึดเกาะการนำส่วนผสมที่ได้จากกระบวนการเวทเลย์ (Wet-lay) ผสมในส่วนผสมแกรไฟต์และเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ POE เป็นสารช่วยยึดเกาะ สามารถ

เพิ่มสมบัติเชิงกลและลดค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงาน เมื่อนำแผ่นแกรไฟต์คอมพอสิตมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง พบว่ายังให้ความหนาแน่นกระแสที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ (34 มิลลิแอมต่อตารางเซนติเมตร) น้อยกว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบทองขาวเชิงพาณิชย์



ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C	บริษัท สุริยุไนเต็ลคาร์บอน จำกัด
2. ผงแกรไฟต์ชนิด BDH	U. S. Laboratory
3. ผงแปร่งถ่าน (CB)	บริษัท สุริยุไนเต็ลคาร์บอน จำกัด
4. ผงแกรไฟต์ชนิด High conductivity	บริษัท สุริยุไนเต็ลคาร์บอน จำกัด
5. ผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black)	บริษัท สุริยุไนเต็ลคาร์บอน จำกัด
6. อีพอกซีเรซิน No. 100	บริษัท รุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาส จำกัด
7. พอลิเอไมด์ No. 100	บริษัท รุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาส จำกัด
8. กรดไนตริกเข้มข้น 65%	บริษัท Sigma-Aldrich
9. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98%	บริษัท Sigma-Aldrich
10. โทลูอีน	บริษัท เมอร์ค จำกัด
11. ซิลเวอร์เพนซ์	บริษัท SPI Supplies
12. ซิงค์เรซิน	บริษัท Research Product International
13. ซิติโคน	บริษัท คีซีโมโต้ ชงกิโอ
14. น้ำกลั่น	

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) รุ่น HY 3002 ยี่ห้อ COMMUE
2. เครื่องวัดความหนา (Thickness gauge) รุ่น 547-401 Mitutoyo
3. มัลติมิเตอร์ (Multi-miter) Model RM-15 Sangchai meter
4. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat Model μ 3AUT70558 μ AUTOLAB
5. เครื่องฉีดพ่น Model 175 Crescendo air brush เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ความดันปั๊มลม 10 lb/in²

6. เครื่องกวนสาร (Overhead stirrer) รุ่น RW20.n ยี่ห้อ KIKA works
7. Laser particle size analyser
8. ตู้อบ
9. นาฬิกาจับเวลา
10. เวอร์เนีย
11. เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง
12. แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304)
13. แผ่นทองแดง
14. แผ่นอะลูมิเนียม
15. บีกเกอร์และอ่างผสมสแตนเลส
16. ผ้าคาร์บอน (Carbon Cloth)
17. ปากกาหนีบชิ้นงาน

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผงแกรไฟต์และคาร์บอน

วิเคราะห์หาขนาดของอนุภาค (Particle size) ของผงแกรไฟต์และคาร์บอน โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาค Laser particle size โดยศึกษาตัวอย่างแกรไฟต์ 5 ชนิด คือ ผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH ผงแกรไฟต์ชนิด High conductivity ผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) และผงแปรงถ่าน (CB)

วิเคราะห์หาความหนาแน่น (Density) ของผงแกรไฟต์ทำโดยนำผงแกรไฟต์ไปอบแห้งที่เตาอบความร้อนอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นลงในโถดูดความชื้นแล้วนำไปอัดในกระบอกตวงขนาดปริมาตร 6 มิลลิลิตร อัดผงแกรไฟต์ในกระบอกตวงจนแน่นให้ได้ปริมาตร 3 มิลลิลิตร พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักก่อนการอัดและหลังการอัดจากนั้นหาความหนาแน่นตามสมการที่ (3.1)

$$\text{ความหนาแน่น} = \text{มวล/ปริมาตร} \quad (3.1)$$

3.3.2 การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว

การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิวเพื่อกำจัดออกไซด์บนผิวหน้าของชิ้นงานออก โดยออกไซด์บนผิวชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานมีค่าการกัดกร่อนที่สูงและมีค่าการนำไฟฟ้าที่ลดต่ำลง [8] ซึ่งลำดับขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานได้ดังนี้

- (1) นำแผ่นชิ้นงาน คือแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) นำไปแช่ในกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 เป็นเวลานาน 15 นาที
- (2) ล้างออกด้วยน้ำสะอาดแล้วปล่อยให้ชิ้นงานแห้งที่อุณหภูมิห้อง
- (3) นำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายจนผิวของชิ้นงานราบเรียบสม่ำเสมอจะได้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิวหลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิว

3.3.3 กระบวนการเคลือบผิวโดยการใช้สารยึดเกาะอีพอกซีเรซิน

กระบวนการเคลือบผิวโดยการใช้สารยึดเกาะอีพอกซีเรซิน มีลำดับขั้นตอนในการเคลือบผิว ดังนี้

- (1) นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิวแล้วทำการวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา (Thickness gauge) โดยวัด 5 จุดของชิ้นงานคือวัดที่มุมทั้ง 4 และตรงกลางของชิ้นงานอีก 1 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว
- (2) เตรียมผงแกรไฟต์ (ผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปร่งถ่าน (CB)) ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพราะผงแกรไฟต์มีน้ำหนักน้อย ต้องการความละเอียดสูง
- (3) เมื่อได้ผงแกรไฟต์ตามน้ำหนักที่ต้องการจากนั้นผสมด้วยสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซินตามขนาดที่ต้องการและผสมตัวทำละลายที่เป็น โทลูอินทั้งหมดลงในบีกเกอร์ ต่อจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนสาร (Overhead stirrer) เป็นเวลานาน 30 นาทีโดยปรับใบพัดของเครื่องกวนสารให้อยู่ในระดับต่ำสุดที่ 100 รอบต่อนาที เพื่อให้เกิดการกวนอย่างสม่ำเสมอทำให้สารเคลือบเป็นเนื้อเดียวกัน
- (4) เดิมพอลิเอไมด์ลงในบีกเกอร์ กวนด้วยเครื่องกวนสารเป็นเวลานาน 30 นาที จะได้สารเคลือบที่เหมาะสมในการเคลือบผิว

วัดที่มุมทั้ง 4 และตรงกลางของชิ้นงานอีก 1 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการเคลือบผิวจะ ได้ความหนาในการเคลือบผิวของชิ้นงาน

- (6) เปลี่ยนจากเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นทองแดงและอะลูมิเนียม เพื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของโลหะทั้ง 3 ชนิดเมื่อเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิว

3.3.5 การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน (In-plane) ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์

การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ได้แสดงอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1 ให้กระแสไฟฟ้าเข้าด้านข้างของชิ้นงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ 0.1 แอมแปร์ และวัดค่าความต่างศักย์ของชิ้นงานด้วยมัลติมิเตอร์ (Multimeter) และเทคนิคที่ใช้ในการวัดคือเทคนิค 4 จุด (Four point probe) เมื่อได้ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า 0.1 แอมแปร์ นำค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ามาค่าความต้านทานโดยใช้สมการที่ 3.2

แหล่งจ่ายไฟฟ้า

มัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.1 การวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน (in-plane) ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วย แกรไฟต์

$$R = V/I \quad (3.2)$$

เมื่อ

V คือ ความต่างศักย์ (โวลต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)

นำค่าความต้านทานจากสมการที่ 3.2 ไปคำนวณวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ ในสมการที่ 3.3 โดยค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จะแสดงในหน่วยของค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์/เซนติเมตร)

$$\sigma = D/(RA) \quad (3.3)$$

เมื่อ

σ คือ สภาพการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์/เซนติเมตร)

D คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของเครื่องมือวัด (เซนติเมตร) = 0.3 เซนติเมตร

A คือ พื้นที่ชิ้นงานที่สัมผัสกับขั้วไฟฟ้า = 0.78 ตารางเซนติเมตร

3.3.6 การวัดค่าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์

เตรียมชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวจากนั้นทำการเคลือบผิวด้วยซิลิโคนเหลือบริเวณที่ต้องการทดสอบขนาด 1 ตารางเซนติเมตร เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลต่อลิตร โดยจัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.2 และต่อขั้วไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย Counter electrode ใช้เป็นขั้วแพลทินัม, ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ใช้เป็น Ag/AgCl และขั้ว Working electrode เป็นชิ้นงานในการทดสอบ โดยขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ขั้วจุ่มอยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลต่อลิตร [35]

- เข้าโปรแกรมการศึกษาการกัดกร่อน

(1) เข้าโปรแกรม GPES

(2) เรียก method linear sweep voltammetry (staircase) : normal

(3) สำหรับการหา Corrosion rate ให้กำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้น

หน้าต่าง Edit procedure-Page 1

(3.1) Begin potential (V) = -0.1

(3.2) End potential (V) = 0.5

(3.3) Step potential (V) = 0.001

(3.4) Scan rate (V/s) = 0.001

หน้าต่าง Edit procedure-Page 2

(3.5) define (vertex) potential wrt OCP = active

(3.6) Time to wait for OCP (s) = 0

(3.7) tafel plot = active

(4) เตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ให้พร้อม

(5) กดปุ่ม Start

(6) โปรแกรมเริ่มทำงานและวัดค่ากระแสออกมาสามารถดูกราฟได้ที่หน้าต่าง data presentation

(7) เมื่อได้กราฟที่ต้องการแล้วสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้ต่อไป

- คำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อน

(1) เตรียมกราฟที่ได้มาจากการวัดการกัดกร่อน

(2) เลือกเมนู Analysis – corrosion rate แล้วกดปุ่ม Tafel plot

(3) ใส่ค่าที่จำเป็นต่อการคำนวณการหาค่าอัตราการกัดกร่อน คือ Surface area (cm^2)
Equivalent weight (g/eq) และ Density (g/cm^3) ของตัวอย่าง

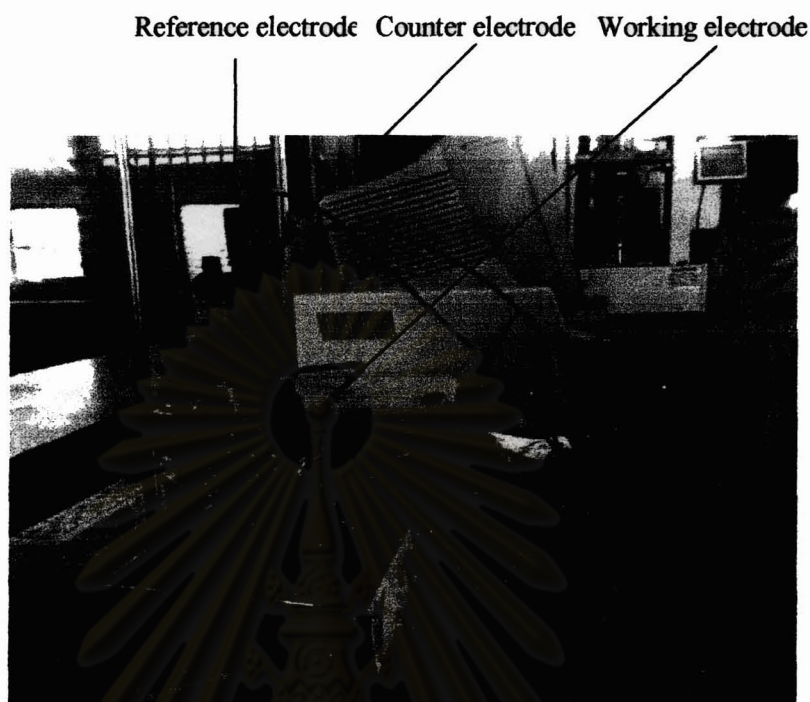
(4) กดปุ่ม Tafel slope

(5) กำหนดจุด 2 จุด ที่ด้านล่างของกราฟ แล้วกดปุ่ม OK

(6) กำหนดจุด 2 จุด ที่ด้านบนของกราฟ แล้วกดปุ่ม OK จะได้เส้นตรง 2 เส้นตัดกัน

(7) กดปุ่ม Start fit

(8) โปรแกรมจะคำนวณค่าอัตราการกัดกร่อนให้



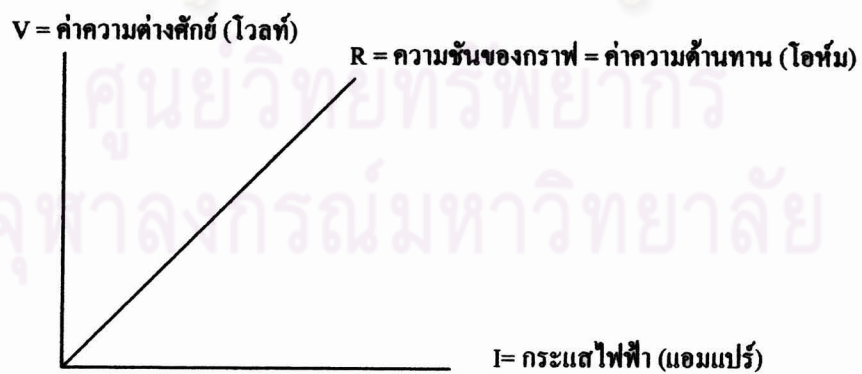
รูปที่ 3.2 การวัดค่าการกักคร่อนของชิ้นงาน

3.3.7 การวัดค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงาน (Interfacial Contact Resistance, ICR)

การวัดค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงาน ที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ได้แสดง อุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.3 ให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.4 แอมแปร์ และวัดค่าความต่างศักย์ของชิ้นงานด้วยมัลติมิเตอร์ (Multi-miter) เมื่อได้ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.4 แอมแปร์ นำไปเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้างดรูปที่ 3.4 เพื่อดำเนินการหาความต้านทาน โดยความชันของกราฟคือค่าความต้านทาน

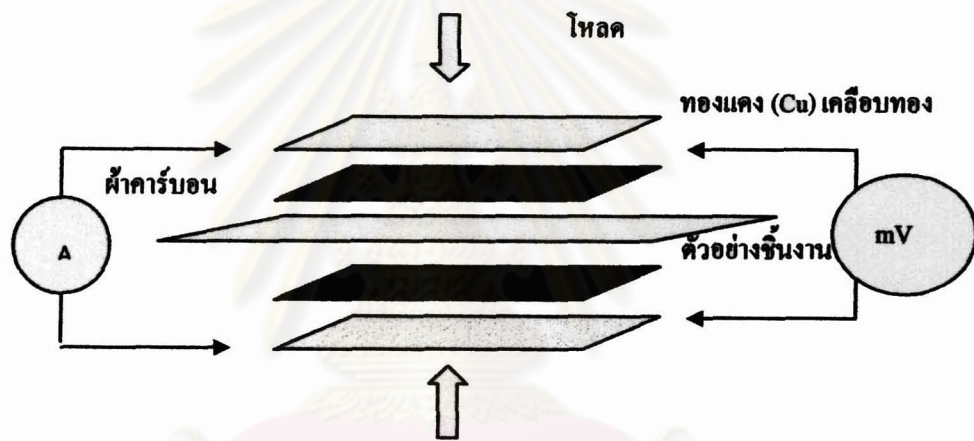


รูปที่ 3.3 การการวัดความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส (ICR)



รูปที่ 3.4 ค่าความต้านทานเป็นความชันของกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

ความต้านทานสัมผัสมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า โดยให้ A คือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า ดังนั้นค่าความต้านทานสัมผัสจะเท่ากับค่าความต้านทานคูณกับพื้นที่ผิวสัมผัส โดยวัดความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด โดยไม่มีชิ้นงาน กำหนดให้ค่าความต้านทานสัมผัสเท่ากับ R_1 และวัดค่าความต้านทานสัมผัสตอนมีชิ้นงาน กำหนดให้ค่าความต้านทานสัมผัสเท่ากับ R_2 และหาค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส (ICR) ได้จากสมการการที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานระหว่างสัมผัส (ICR)



รูปที่ 3.5 การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานเชิงผิวสัมผัส (ICR) [36]

$$ICR = (R_2 - R_1)/2 \quad (3.4)$$

เมื่อ

ICR = ค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส

R_1 = วัดค่าความต้านทานเชิงผิวสัมผัสของเครื่องมือวัด (Ωcm^2)

R_2 = วัดค่าความต้านทานเชิงผิวสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (Ωcm^2)

3.3.8 ผลของปริมาณผงแกรไฟต์ที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้า

การศึกษาปริมาณผงแกรไฟต์ที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ทำโดยเพิ่มปริมาณผงแกรไฟต์ในสารเคลือบที่มีอีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ โดยใช้ปริมาณผงแกรไฟต์ (BDH) และผงแบเรง-ถ่าน (CB) เป็นร้อยละ 9, 10, 12, 15 และ 18 โดยน้ำหนัก โดยเคลือบให้ความหนาครั้งที่ (0.228 มิลลิเมตร) จากนั้นทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าต่อไป

3.3.9 ผลของอุณหภูมิในการอบผิวก่อนการเคลือบผิวชิ้นงานและอุณหภูมิการอบผิวหลังการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้า

การศึกษาอุณหภูมิในการอบผิวก่อนการเคลือบผิวชิ้นงานและอุณหภูมิการอบผิวหลังการเคลือบผิวชิ้นงาน โดยการศึกษาอุณหภูมิอบผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิวคือเมื่อได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานตามขั้นตอนที่ 3.3.2 จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิความร้อนที่อุณหภูมิ 80 และ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที นำชิ้นงานที่ผ่านการอบผิวทำการฉีพ่นสารเคลือบซิงค์เรซินหรืออีพอกซีเรซินที่มีผงแบเรงถ่าน (CB) เป็นองค์ประกอบ ทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าต่อไป ส่วนการศึกษาอุณหภูมิอบผิวชิ้นงานหลังการเคลือบผิวคือเมื่อได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานตามขั้นตอนที่ 3.3.2 นำชิ้นงานไปทำการฉีพ่นสารเคลือบ จากนั้นนำชิ้นงานอบที่อุณหภูมิความร้อนที่อุณหภูมิ 80 และ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าต่อไป

3.3.10 การทดสอบสมบัติเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบผิวเตรียมเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเซลล์

นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ไปเจาะร่องให้เกิดช่องการไหลของแก๊ส จากนั้นทำการฉีพ่นสารเคลือบลงแผ่นชิ้นงาน โดยสารเคลือบที่ใช้เตรียมจะเลือกที่องค์ประกอบที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด โดยทำการฉีพ่นสารเคลือบลงบนชิ้นงานที่ความหนาในการเคลือบผิวที่ 0.085 มิลลิเมตร โดยขนาดและช่องการไหลแก๊สจะยึดรูปแบบมาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc ดำเนินการเจาะร่อง โดยบริษัทสุริโยไนเต็คาร์บอน จำกัด

จากนั้นนำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตมาทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเซลล์ โดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ที่มีแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมมเบรนชนิด 115 และแผ่นการแพร์

ของแก๊สเป็นฝ้ายคาร์บอนเปรียบเทียบกับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกรไฟต์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็ลล์

ขั้นตอนในการทดสอบประสิทธิภาพมีดังนี้

1. ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊ส (Flow field plate) ชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ได้จากงานวิจัย 2 แผ่นและแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร ประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้หนีบ จากนั้นจึงใช้ประแจปอนด์เพื่อทำการอัดส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันโดยใช้โมเมนต์การหมุนที่ 40 ปอนด์แรง-นิ้วจะได้เซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิง

2. ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น เมื่อตรวจสอบสภาพความพร้อมเรียบร้อยของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในสภาพการทดสอบแล้ว จะทดสอบหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้กราฟโพลาริเซชันและใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน 100 SCCM เท่ากัน ภาวะการให้ความชื้นอิ่มตัว อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส

3. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-2 เปลี่ยนแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต เป็นแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ และแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดแกรไฟต์ของ Electrochem, Inc

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิด โลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต ซึ่งสารเคลือบจะประกอบด้วยสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพคือความหนาแน่น และขนาดของอนุภาคของคาร์บอนแต่ละชนิด ผลของสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน และซิงค์เรซิน ศึกษาค่าการนำไฟฟ้าทั้งด้านแนวแกนและในแนวทงูผ่าน โดยศึกษาค่าการนำไฟฟ้าในแนวทงูผ่านจะวัดเป็นค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัส (ICR) และค่าการกัดกร่อนของชิ้นงานเมื่อเคลือบด้วยสารเคลือบที่ความหนาต่างๆ

4.1 สมบัติทางกายภาพของสารนำไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารนำไฟฟ้าที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 5 ชนิด คือ ผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH ผงแกรไฟต์ชนิด High conductivity ผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) และผงแปร่งถ่าน (CB) โดยศึกษาขนาดของอนุภาค (Particle size) ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ Laser particle size และความหนาแน่น (Density) ผลการวิเคราะห์ สรุปได้ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดอนุภาคของผงแกรไฟต์ชนิด High conductivity มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูง ส่วนผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) มีขนาดอนุภาคที่กระจายตัว ไม่สม่ำเสมอและมีความหนาแน่นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผงแกรไฟต์ทั้ง 5 ชนิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของสารนำไฟฟ้าที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

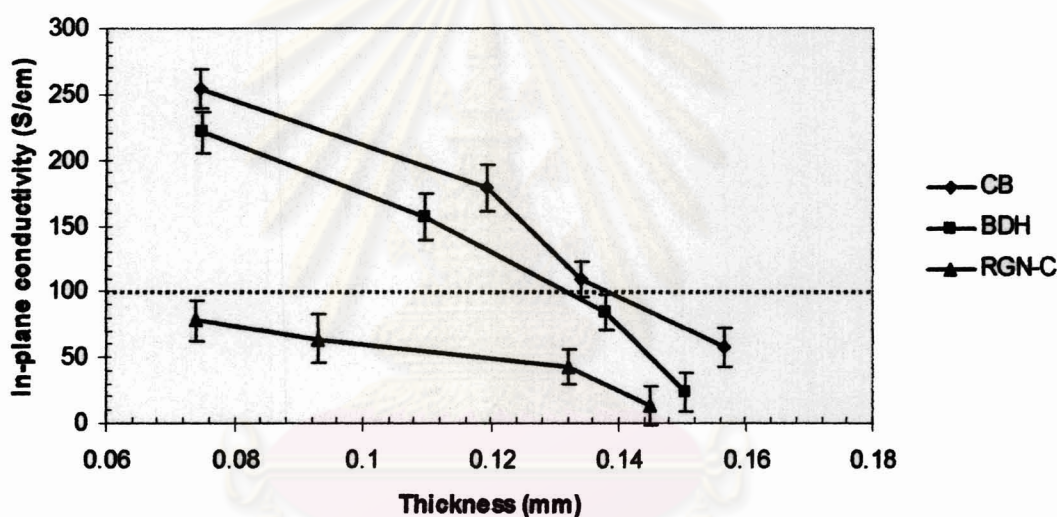
ชนิดของแกรไฟต์	ขนาดของอนุภาค (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ผงแกรไฟต์ชนิด BDH	11.67 ± 0.17	0.276
ผงแกรไฟต์ชนิด High conductivity	98.46 ± 0.21	1.351
ผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black)	13.27 ± 0.57	0.068
แกรไฟต์ชนิด RGN-C	6.54 ± 0.12	0.345
ผงแปร่งถ่าน (GB)	18.93 ± 0.13	0.728

จากการผสมองค์ประกอบของสารเคลือบคือสารช่วยยึดเกาะสำหรับผงคาร์บอนและตัวทำละลายโทลูอีน พบว่า ผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และผงแปร่งถ่าน (CB) จะรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี ส่วนผงแกรไฟต์ชนิด High conductivity และ ผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) จะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากแกรไฟต์ชนิด High conductivity มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีความหนาแน่นสูง เมื่อฉีดพ่นสารเคลือบลงบนชิ้นงานเกิดเป็นตะกอนของอนุภาคแกรไฟต์ ส่วนคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) จะมีความหนาแน่นที่ต่ำและขนาดอนุภาคมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทำให้เมื่อเตรียมเป็นสารเคลือบจะไม่รวมกันเป็นเนื้อเดียวกันเกิดการตกตะกอนของผงคาร์บอนแบล็ก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และผงแปร่งถ่าน (CB) เป็นสารนำไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาผลของการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่มี อีพอกซีเรซิน หรือซิงค์เรซิน เป็นสารช่วยยึดเกาะ

4.2 ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน (In-plane) ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบอีพอกซีเรซิน

เตรียมอีพอกซีเรซินเป็นสารเคลือบผิว โดยเตรียมสารเคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ 3 ชนิด คือผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปร่งถ่าน (CB) ผสมกับสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน ตัวทำละลายโทลูอีน และพอลิเอไมด์ ในอัตราส่วนผสม ผงแกรไฟต์: สารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน: พอลิเอไมด์ เป็นร้อยละ 10:10:70:10 โดยน้ำหนัก ทำการฉีดพ่นลงบนชิ้นงานที่ความหนาต่างๆ จากนั้นนำมาวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน (In-plane) ด้วยเทคนิค

4 จุด (Four point probe) โดยให้กระแสไฟฟ้าเข้าด้านข้างของชิ้นงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ 0.1 แอมแปร์ และวัดค่าความต่างศักย์ของชิ้นงานด้วยมัลติมิเตอร์ (Multi-meter) นำค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ามาหาค่าความต้านทานโดยสมการที่ 3.2 เมื่อได้ค่าความต้านทานจากสมการที่ 3.2 จากนั้นหาค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยแกรไฟต์ จากสมการที่ 3.3 โดยค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จะแสดงในหน่วยของค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ซีเมนส์/เซนติเมตร) รูปที่ 4.1 แสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าและค่าความหนาของสารเคลือบผิว โดยค่าการนำไฟฟ้ามาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมีค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนเท่ากับ 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตรขึ้นไป



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตของผงแกรไฟต์ชนิดต่างๆ โดยใช้ผงแกรไฟต์: อีพอกซีเรซิน: พอลิเอไมด์: คิวทำละลายโทลูอิน, 10:10:10:70 โดยน้ำหนักกับความหนาในการเคลือบผิว

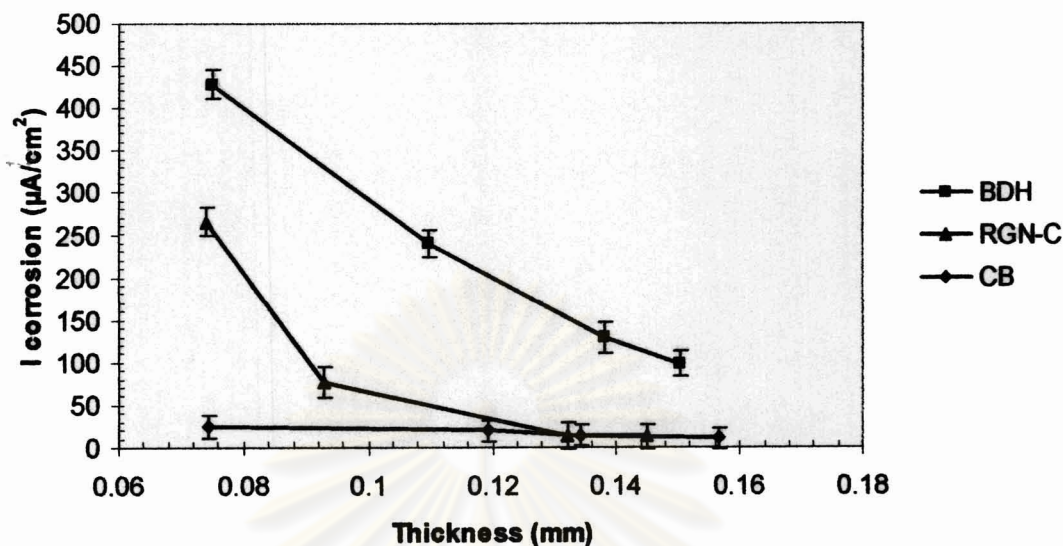
จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อค่าความหนาในการเคลือบผิวของสารเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนมีแนวโน้มลดต่ำลง แสดงว่าค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจะขึ้นกับความหนาของสารเคลือบที่เคลือบชิ้นงาน เพราะเมื่อสารเคลือบชิ้นงานมีความหนาเพิ่มมากขึ้นปริมาณของอีพอกซีเรซินจะเพิ่มขึ้น ซึ่งอีพอกซีเรซินไม่นำไฟฟ้าจึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของผงแกรไฟต์ทั้ง 3 ชนิดคือ ผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และ ผง

แปร่งถ่าน (CB) ที่ความหนาในการเคลือบผิวระหว่าง 0.07 - 0.13 มิลลิเมตร พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของ ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปร่งถ่าน (CB) มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสอง ขั้วมาตรฐานเชิงพาณิชย์ ที่มีค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนเท่ากับ 100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร [11] แต่ แกรไฟต์ชนิด RGN-C มีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมาตรฐานเชิงพาณิชย์ ดังนั้นจึงเลือกผงแกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปร่งถ่าน (CB) ทำการศึกษาต่อไป

4.3 ค่าการกักคร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบอีพอกซีเรซิน

การศึกษาค่าการกักคร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมอีพอกซีเรซิน โดยใช้ แกรไฟต์ 3 ชนิด คือ RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปร่งถ่าน (CB) ผสมกับสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน ตัวทำละลายโทลูอีน และพอลิเอไมด์ ในอัตราส่วนผสม ผงแกรไฟต์: สารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน: พอลิเอไมด์ เป็นร้อยละ 10:10:70:10 โดยน้ำหนัก ทำการฉีดพ่นสารเคลือบลงบนชิ้นงานที่มีความหนาต่างๆ ในการเคลือบผิว จากนั้นทำการเคลือบผิวด้วยซิลิโคนเคลือบพื้นที่บริเวณที่ไม่ถูกเคลือบเฉพาะบริเวณที่ต้องการหาค่าการกักคร่อน โดยพื้นที่การกักคร่อนจะใช้พื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรทำการวัดค่าการกักคร่อนด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยเข้าไปโปรแกรม GPES เปรียบเทียบค่ากระแสการกักคร่อนของสารเคลือบของแกรไฟต์ทั้ง 3 ชนิดกับความหนาของสารเคลือบ โดยค่ากระแสไฟฟ้าของการกักคร่อนมีค่าสัมพันธ์กับความหนาของสารเคลือบดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยค่ากระแสไฟฟ้าของการกักคร่อนค่ามาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์ เท่ากับ 16 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร [30]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



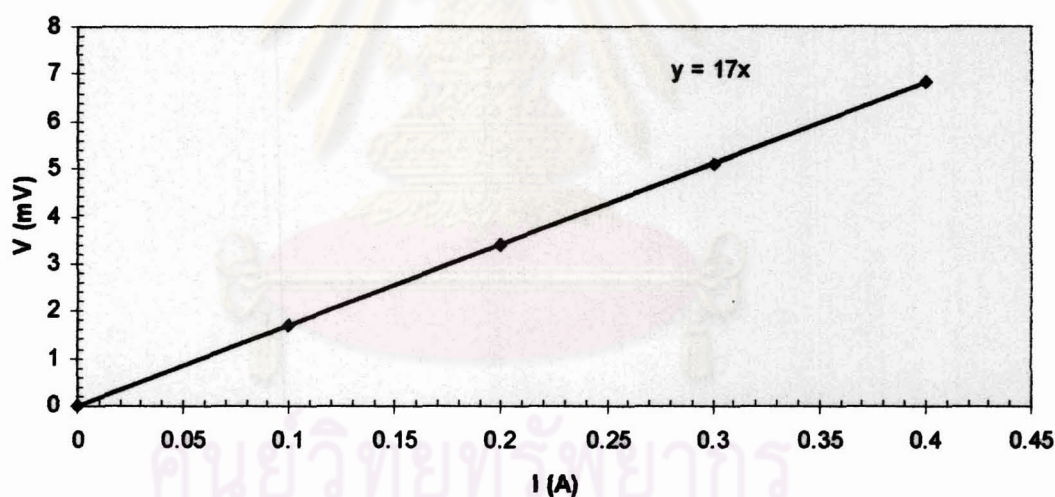
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสของการกัดกร่อนของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตกับความหนาในการเคลือบผิวของแผงกริดชนิดต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนแผงกริด ไฟต์: อีพอกซีเรซิน: พอลิเอไมด์: ตัวละลายโทลูอินร้อยละ 10:10:10:70 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตกับความหนาในการเคลือบผิว พบว่าเมื่อค่าความหนาในการเคลือบผิวของสารเคลือบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนมีแนวโน้มลดต่ำลง แสดงว่าค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนของชิ้นงานจะขึ้นกับความหนาของสารเคลือบที่เคลือบชิ้นงาน เพราะเมื่อสารเคลือบชิ้นงานมีความหนาเพิ่มมากขึ้นปริมาณของอีพอกซีเรซินจะเพิ่มขึ้น ซึ่งอีพอกซีเรซินไม่นำไฟฟ้าจึงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนลดต่ำลงและเมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสการกัดกร่อนของแผงกริดไฟต์ทั้ง 3 ชนิดคือ แผงกริดชนิด RGN-C แผงกริดชนิด BDH และ แผงปรองถ่าน (CB) ที่ความหนาในการเคลือบผิวเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนของแผงกริดไฟต์ชนิด RGN-C และแผงกริดไฟต์ชนิด BDH มีค่ากระแสการกัดกร่อนที่สูงกว่าค่ามาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์คือ 16 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรมาก ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนของแผงปรองถ่าน (CB) มีค่ากระแสการกัดกร่อนใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์

4.4 ค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงาน (Interfacial Contact Resistance, ICR)

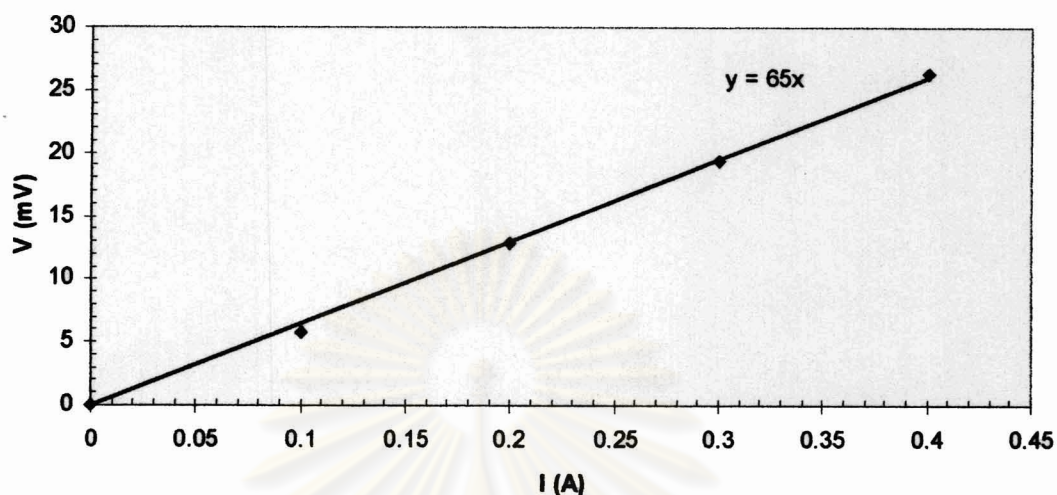
จากการวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนดังแสดงอุปกรณ์การวัดในรูปที่ 3.1 และเทคนิคที่ใช้ในการวัดคือเทคนิค 4 จุด (Four point probe) พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่เคลือบผิวเมื่อทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน ผิวของชิ้นงานตัวอย่างจะถูกกดด้วยขดลวดที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าอาจทำให้ขดลวดที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าถูกกดลึกลงไปในผิวชิ้นงานจนถึงผิวของโลหะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนที่วัดได้อาจมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงาน ดังแสดงอุปกรณ์การวัดในรูปที่ 3.3

ค่าความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงานคำนวณได้ตามสมการ 3.4 โดยความต้านทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า จากการที่วัดความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัดที่ไม่มีชิ้นงาน แสดงผลดังรูปที่ 4.3



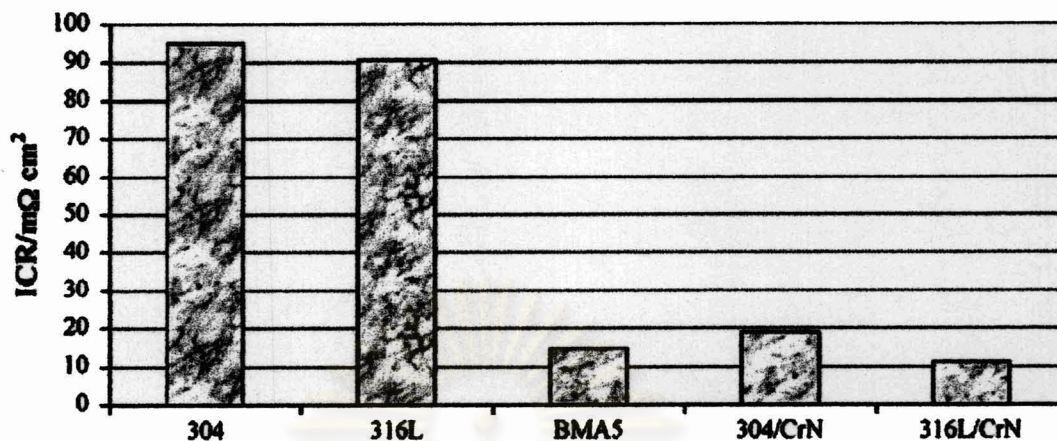
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของเครื่องมือ

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของเครื่องมือ พบว่าค่าความชันของกราฟหรือค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 17 มิลลิโอม เครื่องมือมีพื้นที่สัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 3.9 ตารางเซนติเมตร สามารถหาความต้านทานผิวสัมผัสของเครื่องมือวัดที่ไม่มีชิ้นงาน (R_s) เท่ากับ 66.3 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการวัดค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว

จากรูปที่ 4.4 ค่าความชันของกราฟหรือค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 65 มิลลิโอห์ม เมื่อหาความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว (R_2) ได้เท่ากับ 254.3 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร จากนั้นคำนวณหาค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว ตามสมการ 3.4 ได้เท่ากับ 93.6 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ชนิดเดียวกันของ ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่เป็นชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในงานวิจัย มีค่าความต้านทานสัมผัส ประมาณเท่ากับ 95 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยไม่ได้บอกความหนาของชิ้นงาน แต่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าการนำไฟฟ้าที่ตีพอสมควรจึงน่าจะกล่าวได้ว่าเครื่องมือวัดค่าความต้านทานสัมผัสที่เตรียมจากงานวิจัยสามารถใช้วัดค่าความต้านทานสัมผัสได้ดีเมื่อเทียบกับเครื่องมือจากงานวิจัยของ Pozio [36]



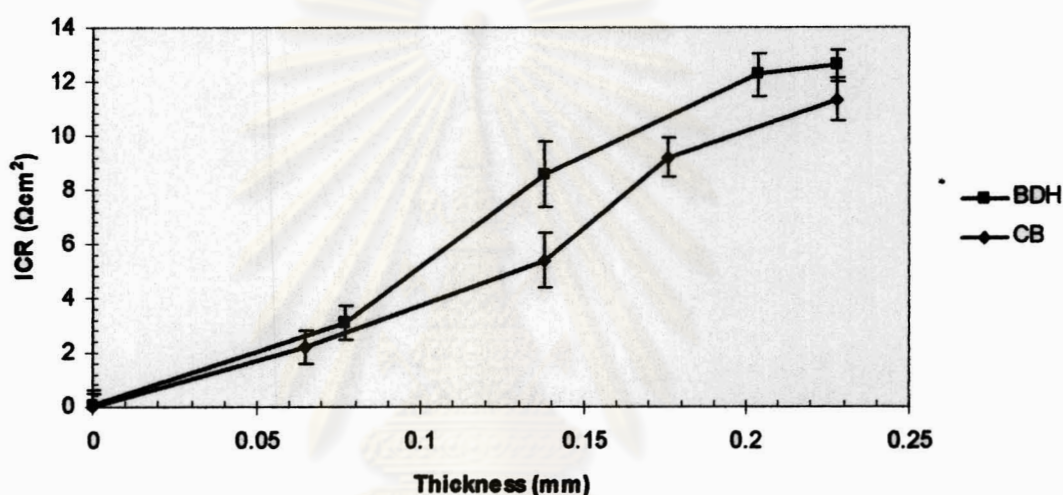
รูปที่ 4.5 ค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ชนิดต่างกัน [36]

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานสัมผัสของโลหะชนิดต่างๆ กับค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นแกรไฟต์เชิงพาณิชย์พบว่า ค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นทองแดงที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวเท่ากับ 45.5 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตรมีค่าต่ำสุด รองลงมาคือแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) 93.6 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร และแผ่นอะลูมิเนียม 140.8 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร ส่วนแผ่นแกรไฟต์เชิงพาณิชย์มีค่าความต้านทานสัมผัสเท่ากับ 39.6 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร พบว่าโลหะที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิวยังให้ค่าความต้านทานสัมผัสที่สูงกว่าแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ และโลหะที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิวขึ้นงานเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจะมีค่าการกัดกร่อนที่สูงทำให้ลดประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เพราะแผ่นโลหะเมื่อเตรียมเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงมีสภาพเป็นกรดแผ่นโลหะจึงเกิดการกัดกร่อน ดังนั้นโลหะที่ต้องการเตรียมเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าจึงต้องเคลือบผิวขึ้นงานเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

4.5 ผลความหนาของสารเคลือบผิวและปริมาณผงคาร์บอนที่มีต่อค่าความต้านทานสัมผัสของสารเคลือบที่ประกอบด้วยอีพอกซีเรซิน

ศึกษาผลของความหนาของสารเคลือบผิวที่มีต่อค่าความต้านทานสัมผัส ทำการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยเลือกศึกษาผงคาร์บอนแกรไฟต์ชนิด BDH และผงแปร่งถ่าน (CB) เนื่องจากผงแกรไฟต์ทั้งสองชนิดให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนที่ความหนา

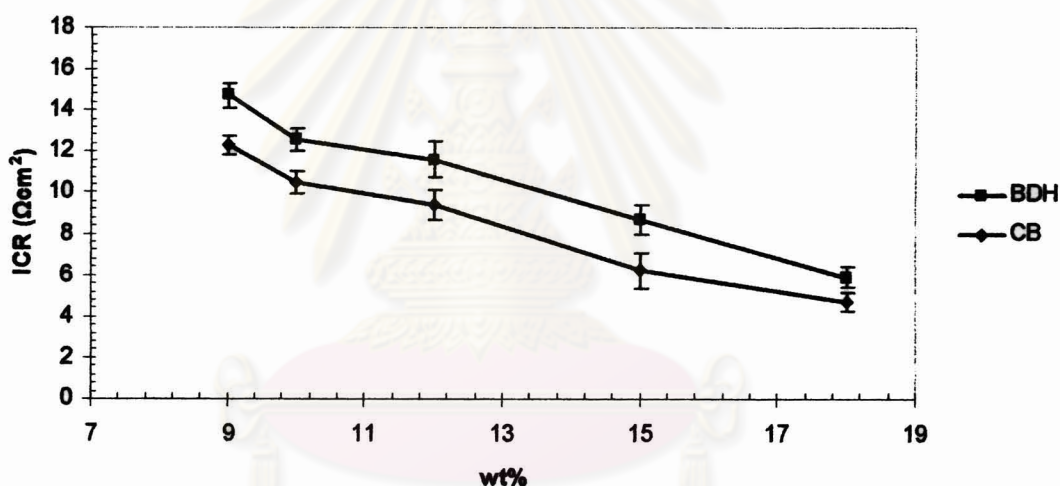
ในการเคลือบผิวเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรที่แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของแผงโฟลด์ชนิด BDH และ แผงแปรงถ่าน (CB) มีค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนสูงกว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมาตรฐานเชิงพาณิชย์ ที่มีค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนเท่ากับ 100 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร โดยใช้สารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน ซึ่งสารเคลือบผิวประกอบด้วย ผงคาร์บอน: อีพอกซีเรซิน: ทำละลายโทลูอิน: พอลิเอไมด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10:10:70:10 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาค่าความต้านทานสัมผัสเมื่อทำการเคลือบผิวที่ความหนาในการเคลือบผิวแตกต่างกัน แสดงผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่เคลือบผิวด้วยแผงโฟลด์ชนิดต่างๆกับความหนาในการเคลือบผิวโดยใช้อีพอกซีเรซิน: พอลิเอไมด์: ผงคาร์บอน: ตัวทำละลายโทลูอินร้อยละ 10:10:70 โดยน้ำหนัก

พบว่าเมื่อความหนาของสารเคลือบผิวเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานสัมผัสมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความหนาของสารเคลือบที่เคลือบผิว เพราะเมื่อสารเคลือบชั้นงานมีความหนาเพิ่มมากขึ้นปริมาณของอีพอกซีเรซินจะเพิ่มขึ้น ซึ่งอีพอกซีเรซินไม่นำไฟฟ้าจึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงและส่งผลให้ค่าความต้านทานสัมผัสมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานสัมผัสของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่ประกอบด้วย แผงโฟลด์ชนิด BDH และแผงแปรงถ่าน (CB) พบว่าแผงแปรงถ่าน (CB) ให้ค่าความต้านทานสัมผัสที่ต่ำกว่า แผงโฟลด์ชนิด BDH และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนดังรูปที่ 4.1 พบว่าแผงแปรงถ่าน (CB) ให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนที่สูงกว่าแผงโฟลด์ชนิด BDH แสดงว่าความต้านทานสัมผัสและค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนมีแนวโน้มเดียวกัน

ในการศึกษาผลของปริมาณผงคาร์บอนในการเคลือบผิวที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัส โดยทำการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ปริมาณผงคาร์บอนที่แตกต่างกัน โดยเลือกศึกษาผงคาร์บอนชนิด BDH และผงแปร่งถ่าน (CB) ซึ่งใช้สารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซิน โดยปริมาณผงคาร์บอนที่ทำการศึกษาคือร้อยละ 9, 10, 12, 15 และ 18 โดยน้ำหนัก ซึ่งลดปริมาณตัวทำละลายลง ที่ความหนาในการเคลือบเฉลี่ยเท่ากับ 0.228 มิลลิเมตร เป็นความหนาในการเคลือบผิวที่มากที่สุดของการศึกษาผลของความหนาในการเคลือบผิวของผงแปร่งถ่านดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทำการศึกษาค่าความต้านทานสัมผัสเมื่อทำการเคลือบผิวที่ปริมาณผงคาร์บอนที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.7



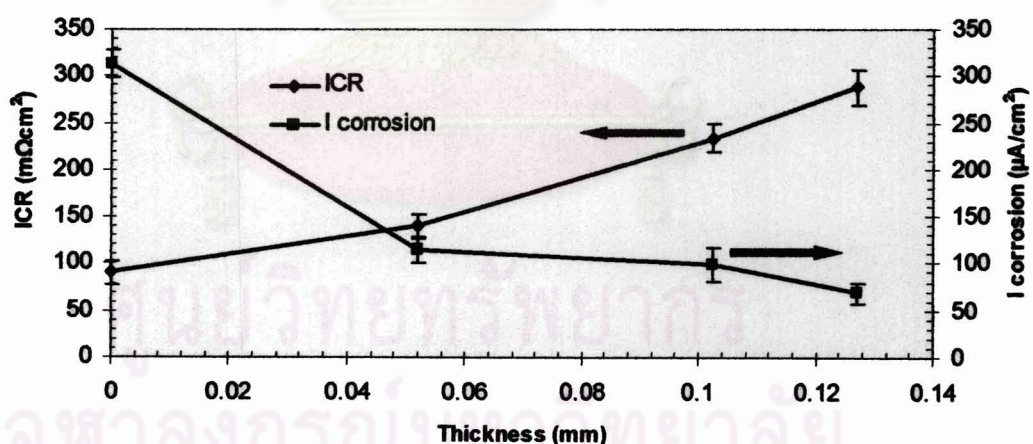
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ค่าความต้านทานสัมผัสกับปริมาณผงแกรไฟต์ของสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซินที่ความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 0.228 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.7 พบว่าที่ความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 0.228 มิลลิเมตร ปริมาณผงคาร์บอนมีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัส โดยเมื่อเพิ่มปริมาณผงคาร์บอนจะทำให้ค่าความต้านทานสัมผัส มีแนวโน้มลดลงเพราะสารเคลือบที่มีปริมาณผงคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะทำให้การนำไฟฟ้าดีจึงส่งผลทำให้ค่าความต้านทานสัมผัสมีแนวโน้มลดต่ำลง แต่ไม่สามารถเพิ่มอัตราส่วนการผสมของแกรไฟต์ในสารเคลือบผิวให้มากกว่าค่าที่ศึกษาเนื่องจากทำให้หัวฉีดสารเกิดการอุดตัน อย่างไรก็ตามสารเคลือบที่ประกอบด้วยอีพอกซีเรซินยังให้ค่าความต้านทานสัมผัสสูงมากเมื่อเทียบกับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ (39.6 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร) จึงยังไม่เหมาะสำหรับการ

เตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต ดังนั้นจึงได้ทำการเปลี่ยนสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะซิงค์เรซิน และทำการวัดค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกัดกร่อนของสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารช่วยยึดเกาะซิงค์เรซิน

4.6 ผลของค่าการความต้านสัมผัสและค่าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีซิงค์เรซินเป็นองค์ประกอบ

จากที่สารเคลือบที่ประกอบด้วยสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซินนั้นให้ค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกัดกร่อนมีค่าสูง เพราะแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ทำงานในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนจะต้องมีค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกัดกร่อนที่มีค่าต่ำ แสดงว่าสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซินนั้นมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ต่ำจากนั้นทำการเปลี่ยนสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะซิงค์เรซินทำการวัดค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกัดกร่อน

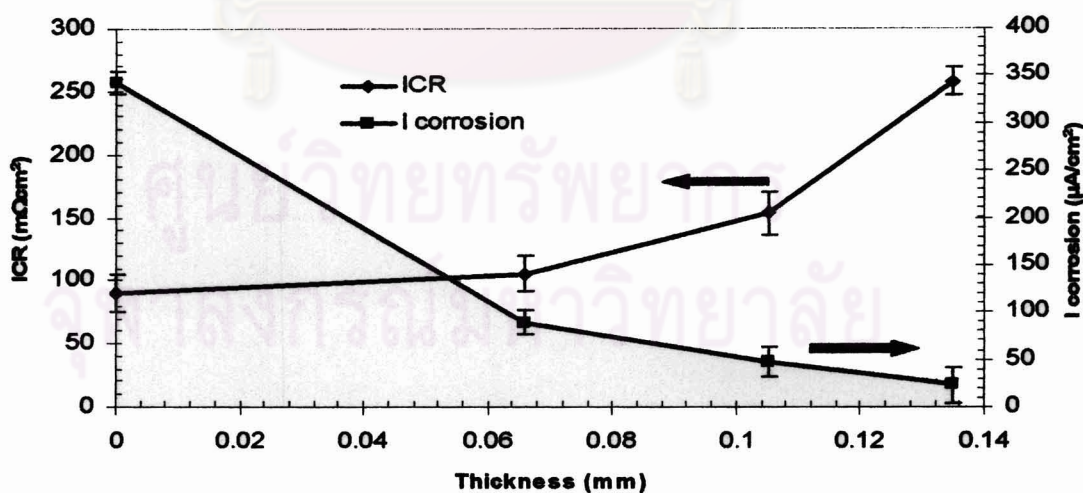


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสและค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้ซิงค์เรซินอย่างเดียวกันที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ

จากการเปลี่ยนสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะซิงค์เรซิน ทำการวัดค่าความต้านทานสัมผัส และค่ากระแสการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่เคลือบผิวด้วยซิงค์เรซินอย่างเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนสารช่วยยึดเกาะซิงค์เรซินที่มีความหนาในการเคลือบผิว 0.1 มิลลิเมตรมีค่าความ

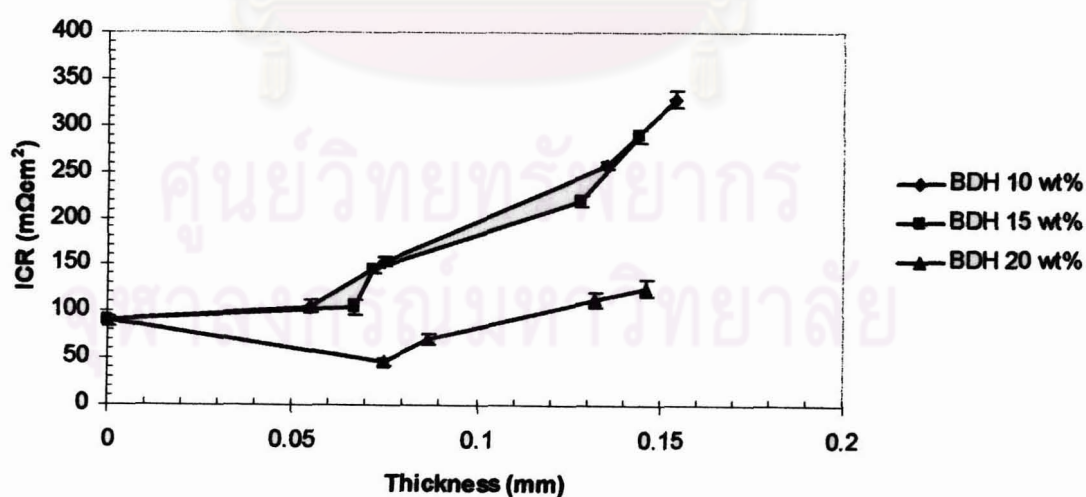
ด้านทานสัมผัสประมาณ 220 มิลลิโหนดตารางเซนติเมตรและค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนประมาณ 100 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับสารช่วยยึดเกาะอีพอกซีเรซินที่ความหนาเดียวกันมีค่าความต้านทานสัมผัสประมาณ 3,000 มิลลิโหนดตารางเซนติเมตรของสารเคลือบผิวที่มีผงแปร่งถ่าน (CB) เป็นองค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 4.6 และค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนประมาณ 25 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรของสารเคลือบผิวที่มีผงแปร่งถ่าน (CB) เป็นองค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานสัมผัสของสารเคลือบซิงค์เรซินมีค่าน้อยกว่าสารเคลือบอีพอกซีเรซิน แนวโน้มค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนเมื่อเทียบกับความหนาในการเคลือบผิวของสารเคลือบพบว่าค่าความต้านทานสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนลดต่ำลงเมื่อความหนาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับผลการทดลองเมื่อใช้อีพอกซีเรซินเป็นสารผสม

เมื่อพบว่าสารเคลือบซิงค์เรซินสามารถยึดติดบนเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) และให้ค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกัดกร่อนที่ต่ำ แต่ยังไม่เท่ากับค่ามาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ จึงทำการผสมผงคาร์บอนลงในสารเคลือบซิงค์เรซินในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการฉีกแผ่นสารเคลือบลงบนชิ้นงานปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนเปรียบเทียบกับความหนาต่างๆในการเคลือบผิว



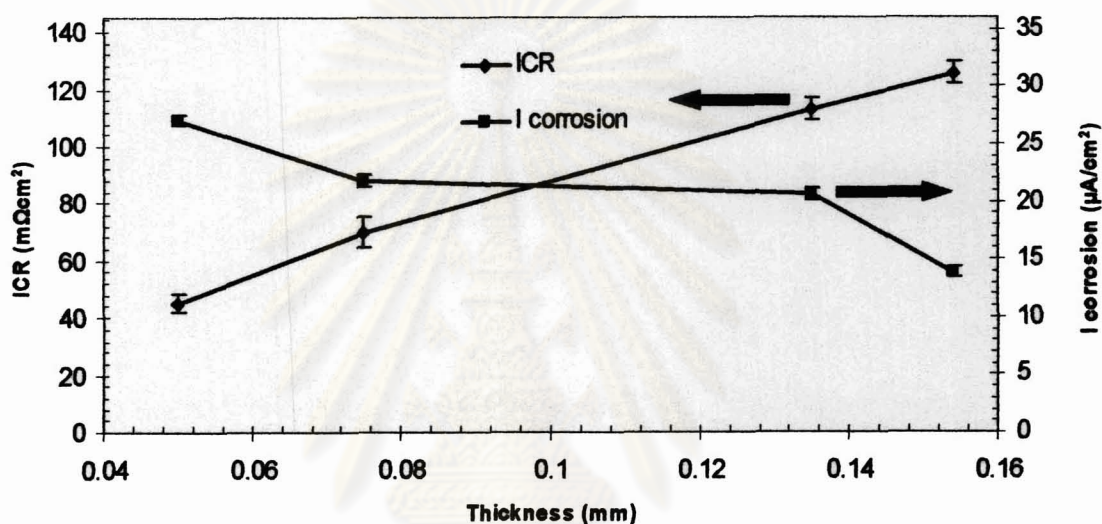
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสและค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้แกรไฟต์ชนิด BDH: ซิงค์เรซิน 10:90 โดยน้ำหนักที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ

เมื่อทำการเตรียมสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารช่วยยึดเกาะซิงค์เรซินผสมกับผงแกรไฟต์ชนิด BDH ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและทำการวัดค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกักกร่อนที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกักกร่อนที่ความหนา 0.1 มิลลิเมตร มีค่าต่ำกว่าสารเคลือบที่ใช้ด้วยซิงค์เรซินอย่างเดียวกันแสดงในรูปที่ 4.8 และแนวโน้มค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสไฟฟ้าของการกักกร่อนเมื่อเทียบกับความหนาต่างๆ ในการเคลือบผิวของสารเคลือบ พบว่าค่าความต้านทานสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและค่ากระแสไฟฟ้าของการกักกร่อนลดต่ำลงเมื่อเพิ่มความหนาในการเคลือบผิว ดังนั้นแสดงว่าการเพิ่มปริมาณคาร์บอนลงในสารเคลือบทำให้ค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสไฟฟ้าของการกักกร่อนมีค่าลดต่ำลงแต่ยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเชิงพาณิชย์ จึงได้ทำการเพิ่มปริมาณผงคาร์บอนในสารเคลือบเป็นร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ใช้โทลูอินในอัตราส่วนร้อยละ 75 และ 70 โดยน้ำหนัก ที่ซิงค์เรซินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูป 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นแนวโน้มของค่าความต้านทานสัมผัสมีค่าลดต่ำลงแต่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาในการเคลือบผิว ซึ่งผงคาร์บอนที่เติมลงในสารเคลือบจะทำให้เพิ่มค่าการนำไฟฟ้าและค่าการป้องกันการกักกร่อนได้ดีขึ้น การเพิ่มปริมาณผงคาร์บอนไม่สามารถเพิ่มได้มากกว่าร้อยละ 20 เพราะให้สารเคลือบมีความหนืดมาก ทำให้เกิดการอุดตันหัวฉีด



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่า ICR ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้แกรไฟต์ (BDH) ในอัตราส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักที่แตกต่างกันและที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ

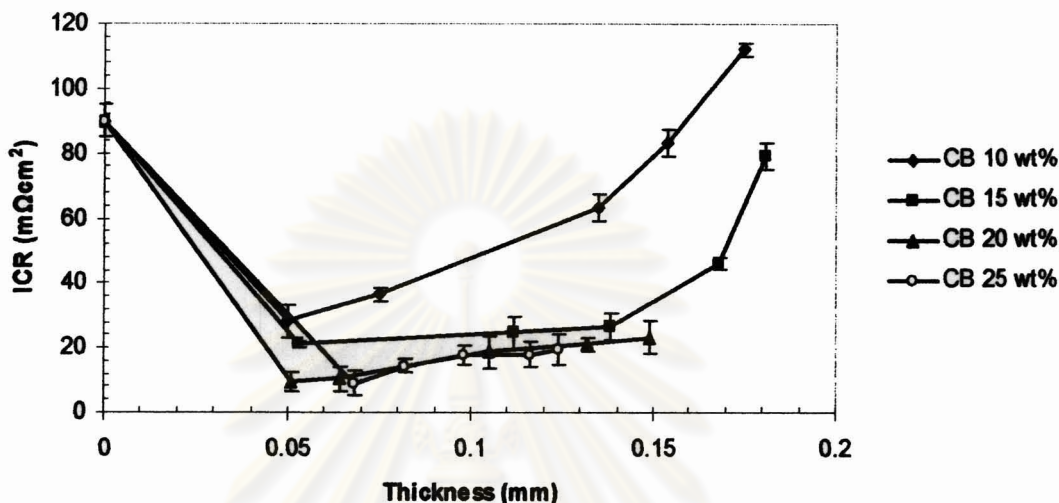
เมื่อเพิ่มปริมาณผงคาร์บอนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะให้ค่าความต้านทานสัมผัสที่มีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณผงคาร์บอนที่ร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก จึงได้ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่ปริมาณผงแกรไฟต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ เทียบกับค่าความต้านทานสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัส และค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้ แกรไฟต์ชนิด BDH: ซิงค์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอิน ร้อยละ 20:10:70 โดยน้ำหนักที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ

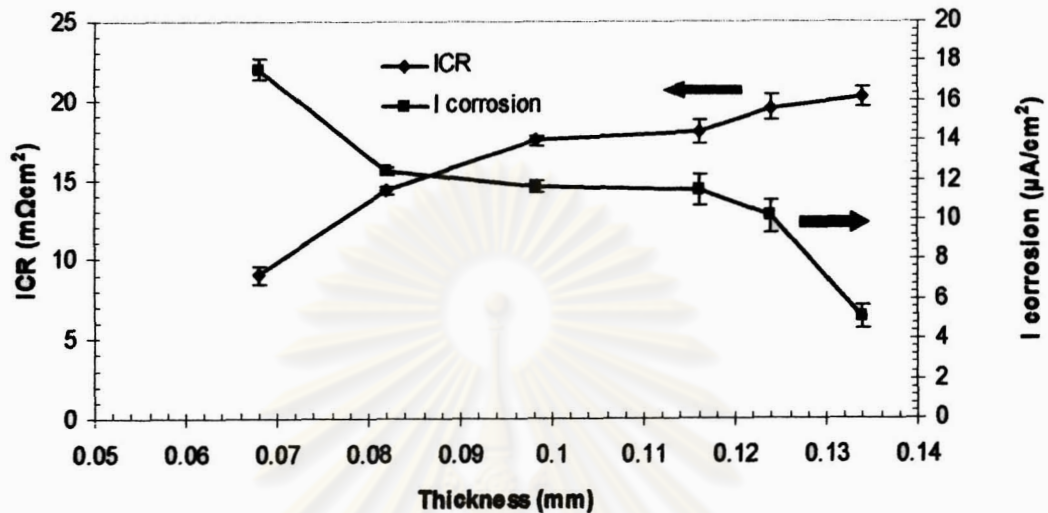
ค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนของสารช่วยยึดเกาะซิงค์เรซินที่มีปริมาณผงคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.11 ความหนาที่เหมาะสมในการเคลือบผิวอยู่ที่ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ให้ค่าความต้านทานสัมผัสเท่ากับ 85 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร และค่ากระแสการกัดกร่อนคือ 21 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานสัมผัส 20 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตรและค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน 16 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรของแผ่นกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมาตรฐาน พบว่ายังมีค่าสูงกว่า จึงยังควรต้องพัฒนาสารเคลือบต่อไป โดยได้ทำการเปลี่ยนแกรไฟต์ชนิด BDH เป็นผงแปรงถ่าน (CB) และศึกษาผลของปริมาณผงแปรงถ่าน (CB) ที่ร้อยละ 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่

สามารถเพิ่มปริมาณผงคาร์บอนให้มากกว่านี้ได้ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณผงคาร์บอนจะทำให้สารเคลือบมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นทำให้หัวฉีดเกิดการอุดตัน



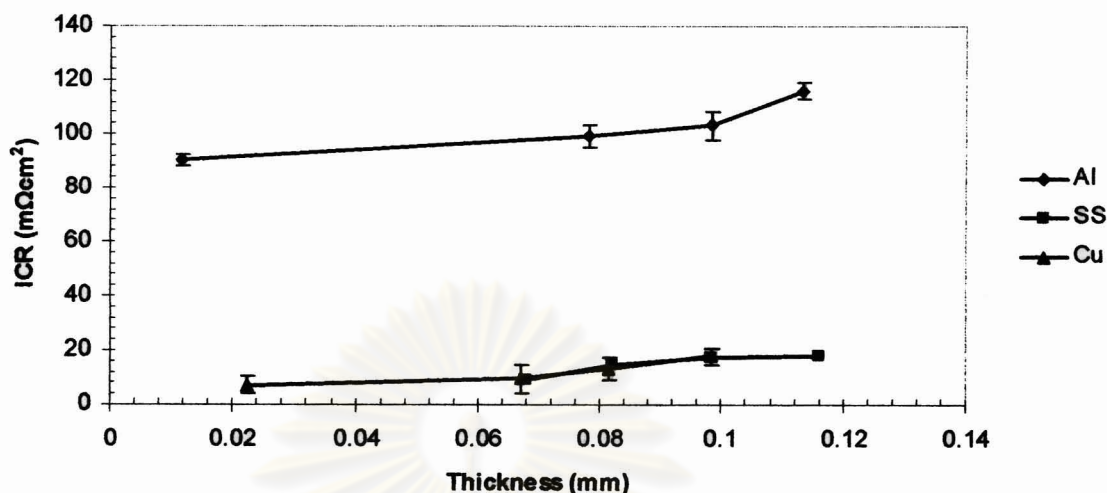
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยใช้ผงแปรงถ่าน (CB) ในอัตราส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักที่แตกต่างกันและที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ

รูปที่ 4.12 ผลของค่าความต้านทานสัมผัสเมื่อเพิ่มปริมาณผงแปรงถ่าน (CB) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงแปรงถ่าน (CB) ค่าความต้านทานสัมผัสมีแนวโน้มลดลง แต่มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาในการเคลือบผิว ที่ปริมาณผงแปรงถ่าน (CB) ร้อยละ 20 และ 25 โดยน้ำหนักจะให้ค่าความต้านทานสัมผัสต่ำสุด เมื่อทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่ปริมาณผงแปรงถ่านร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ เทียบกับค่าความต้านทานสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าความหนาที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบจะอยู่ในช่วง 0.08-0.1 มิลลิเมตร ให้ค่าความต้านทานสัมผัสเท่ากับ 15-18 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร และค่ากระแสการกัดกร่อนประมาณ 12 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของแผ่นกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ (39.59 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร และ 16 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) จึงสามารถนำไปพัฒนาเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัส และค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยสารเคลือบประกอบด้วยผงแปร่งถ่าน (CB): ชิงค์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน ในอัตราส่วน 25:10:65 โดยน้ำหนักที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ

เพื่อเป็นการเพิ่มการนำไฟฟ้าของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วชนิดโลหะจึงทำการศึกษาค่าความต้านทานผิวสัมผัสของโลหะ 3 ชนิดยังไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวคือ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) แผ่นอะลูมิเนียม และแผ่นทองแดง มีค่าความต้านทานผิวสัมผัสเท่ากับ 93.6 140.8 และ 45.5 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตรตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความต้านทานผิวสัมผัสของแผ่นทองแดงมีค่าต่ำสุด และเมื่อทำการศึกษาการเคลือบแผ่นอะลูมิเนียม และแผ่นทองแดง ด้วยสารเคลือบที่ประกอบด้วยผงแปร่งถ่าน (CB): ชิงค์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน ในอัตราส่วน 25:10:65 ร้อยละ โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการวัดค่าความต้านทานสัมผัสค่าความต้านทานผิวสัมผัสเพื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานสัมผัส ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่ความหนาในการเคลือบผิวที่แตกต่างกันได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.14

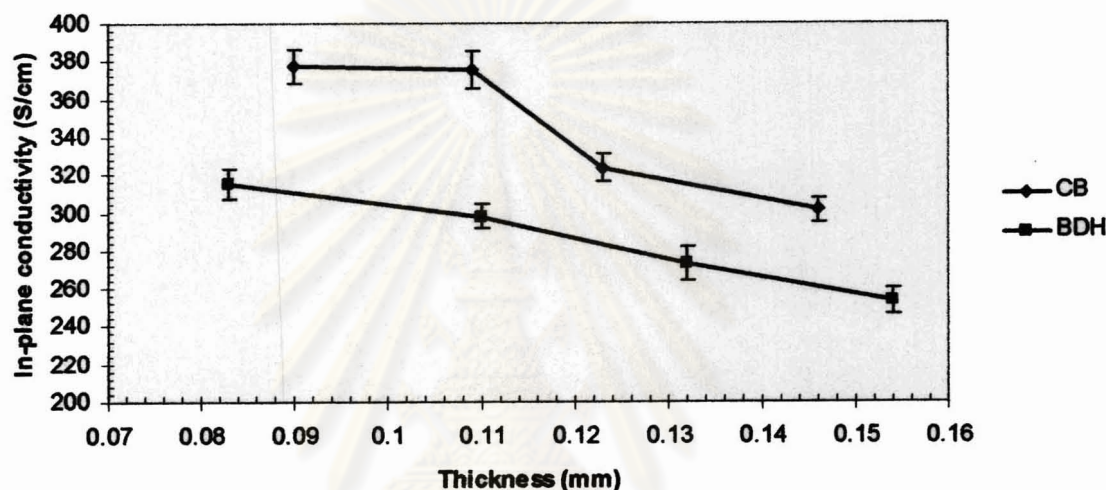


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าความต้านทานสัมผัสของโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่ความหนาในการเคลือบผิวที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 แสดงการเคลือบผิวเพื่อลดค่าความต้านทานสัมผัสของโลหะ 3 ชนิดคือแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) แผ่นอะลูมิเนียม และแผ่นทองแดงพบว่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นทองแดงและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบผิวให้ค่าใกล้เคียงกัน ส่วนอะลูมิเนียมมีค่าความต้านทานสัมผัสสูงสุดและแนวโน้มของค่าความต้านทานสัมผัสของโลหะที่ผ่านการเคลือบผิวทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มเหมือนกันคือ เมื่อเพิ่มความหนาในการเคลือบผิวของสารเคลือบให้มากขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานสัมผัสมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบราคาของแผ่นทองแดง แผ่นอะลูมิเนียม และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) มีราคาเท่ากับ 94.7, 16.3 และ 40.4 บาท/กิโลกรัมตามลำดับ [41] และแผ่นอะลูมิเนียมมีราคาถูกที่สุด แต่จากการวัดค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบผิวพบว่าให้ค่าสูง และเมื่อทำการเปรียบเทียบราคาแผ่นทองแดงและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าแผ่นทองแดงมีราคาที่สูงกว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความต้านทานสัมผัสของแผ่นทองแดงและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบผิว พบว่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) และแผ่นทองแดงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงได้เลือกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ในการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต

4.7 ผลของค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและค่าการกักความร้อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบซิงค์เรซิน

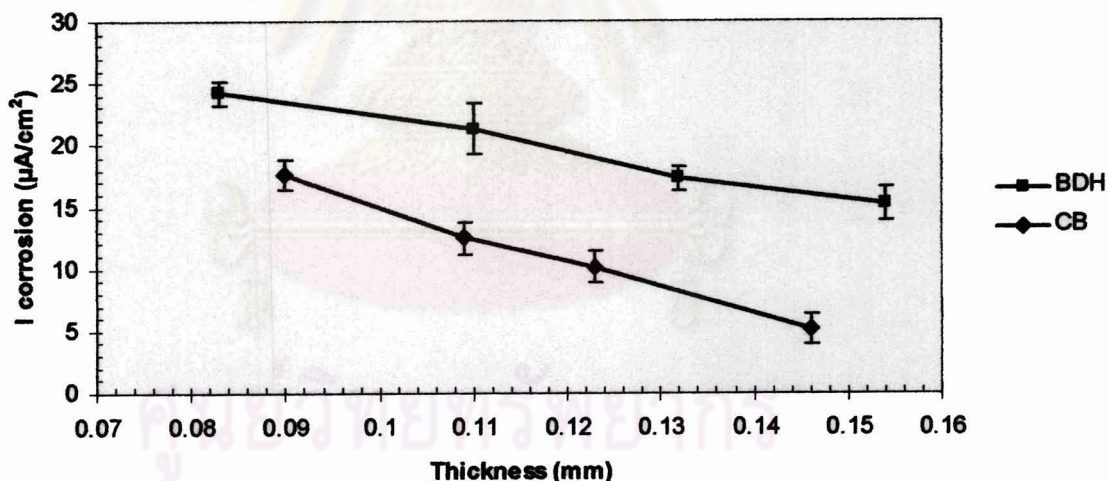
ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนที่ความหนาต่างๆในการเคลือบผิวเปรียบเทียบระหว่างผงคาร์บอนสองชนิดคือ แกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของผงคาร์บอน ซึ่งมีซิงค์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะเป็นองค์ประกอบของสารเคลือบ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ของผงแกรไฟต์ชนิดต่างๆ โดยใช้ผงแกรไฟต์: ซิงค์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน, 20:10:70 โดยน้ำหนักกับความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ เปรียบเทียบระหว่างผงคาร์บอน 2 ชนิดคือ แกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของผงคาร์บอน ซึ่งมีซิงค์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะเป็นองค์ประกอบของสารเคลือบ พบว่าเมื่อค่าความหนาในการเคลือบผิวของสารเคลือบมีความหนาเพิ่มมากขึ้นค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนมีแนวโน้มลดต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของแกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปร่งถ่าน (CB) พบว่าค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนของผงแปร่งถ่าน (CB) มีค่ามากกว่าของแกรไฟต์ชนิด BDH และจากรูปที่ 4.15 ทั้งผงแกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปร่งถ่าน (CB) มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าค่ามาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 100 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

จากนั้นทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่ความหนาต่างๆในการเคลือบผิวเปรียบเทียบระหว่างผงคาร์บอนสองชนิดคือ แกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปรงถ่าน (CB) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของผงคาร์บอน ซึ่งมีซิงค์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะเป็นองค์ประกอบของสารเคลือบแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อค่าความหนาในการเคลือบผิวของสารเคลือบมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ค่ากระแสการกัดกร่อนมีแนวโน้มลดต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสการกัดกร่อนของแกรไฟต์ชนิด BDH และ ผงแปรงถ่าน (CB) พบว่าค่ากระแสการกัดกร่อนของผงแปรงถ่าน (CB) มีค่าต่ำกว่าของแกรไฟต์ชนิด BDH และที่ความหนาของการเคลือบผิวประมาณ 0.1 มิลลิเมตรของผงแกรไฟต์ชนิด BDH มีค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนมากกว่าค่ามาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (16 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) แต่ผงแปรงถ่าน (CB) ยังคงมีค่าน้อยกว่า ดังนั้นจึงเลือกผงแปรงถ่าน (CB) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเคลือบผิวต่อไป

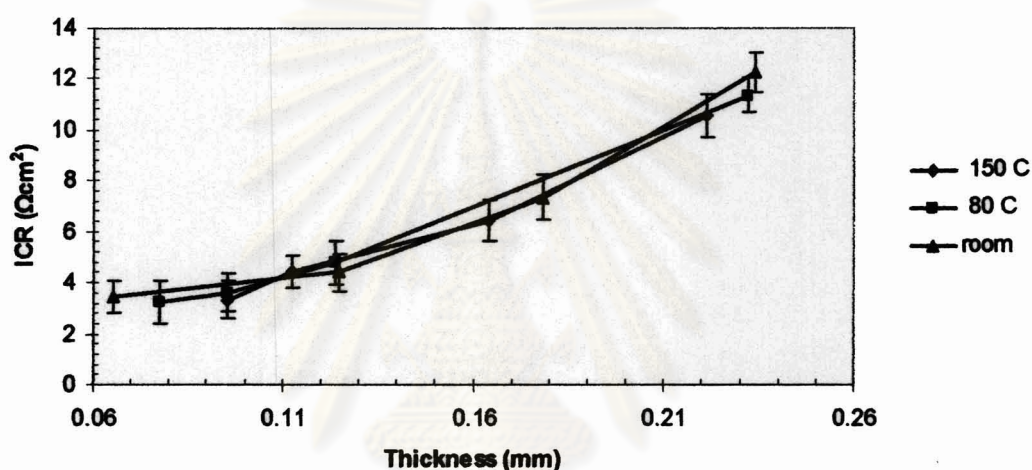


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสการกัดกร่อนเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ของผงแกรไฟต์ชนิดต่างๆ โดยใช้ผงแกรไฟต์: ซิงค์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน, 20:10:70 โดยน้ำหนักกับความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ

4.8 ผลของอุณหภูมิก่อนการเคลือบผิวและอุณหภูมิหลังการเคลือบผิวที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมพัทธ์

4.8.1 สารเคลือบอีพอกซีเรซิน

ศึกษาผลของอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมพัทธ์ของความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ โดยใช้สารเคลือบอีพอกซีเรซินผสมผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.17

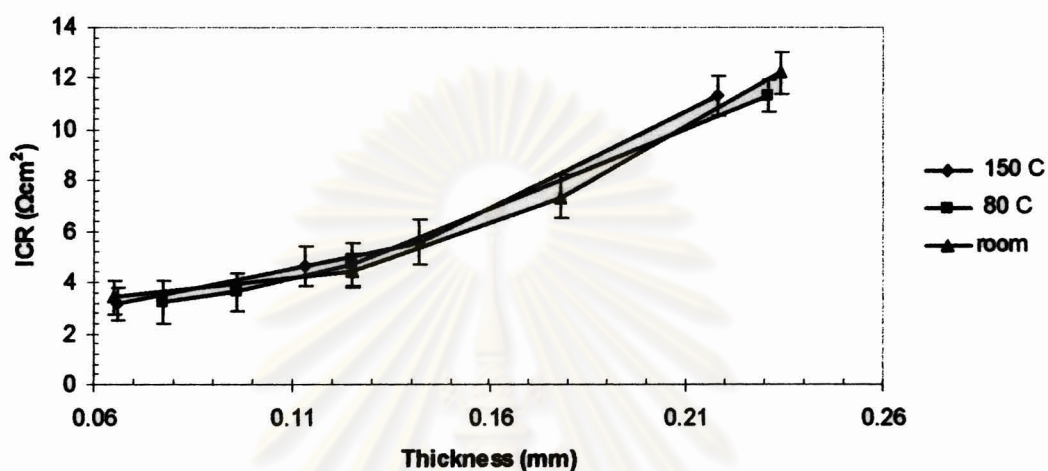


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมพัทธ์ที่ความหนาต่างๆ ในการเคลือบผิว โดยใช้สารเคลือบอีพอกซีเรซินผสมผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.17 เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิว โดยปล่อยให้สารเคลือบแห้งที่อุณหภูมิห้อง และอบชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิวชิ้นงานเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิว 80 และ 150 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวไม่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมพัทธ์ที่ทุกๆ ค่าความหนาของผิวเคลือบ เนื่องจากอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวไม่ทำให้สารเคลือบยึดติดโลหะ ได้แน่นขึ้น

ผลของอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิวที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมพัทธ์ที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ โดยใช้สารเคลือบอีพอกซีเรซินผสมผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิวจึงไม่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมพัทธ์ ที่

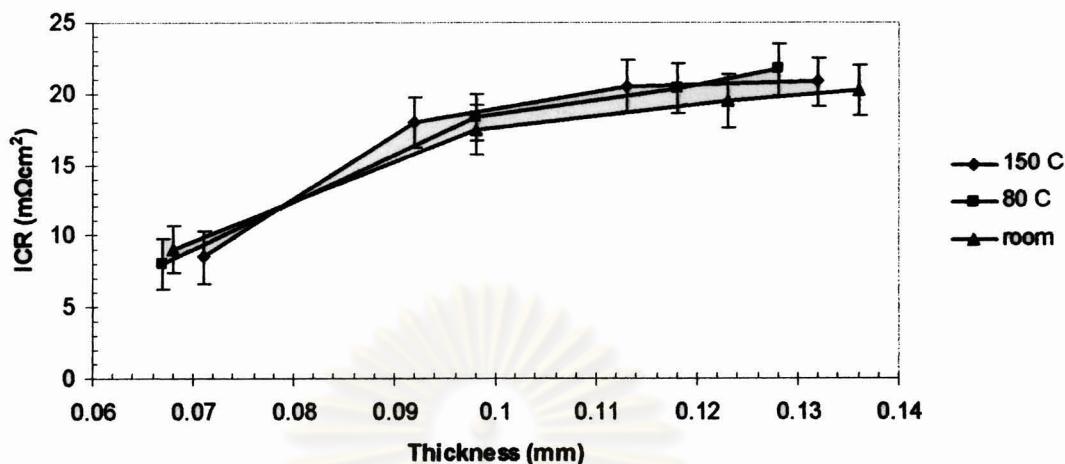
ทุกๆค่าความหนาของสารเคลือบผิว เนื่องจากอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิวไม่ทำให้สารเคลือบยึดติดโลหะได้แน่นขึ้น



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสที่ความหนาต่างๆในการเคลือบผิว โดยใช้สารเคลือบอีพอกซีเรซินผสมผงแบร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

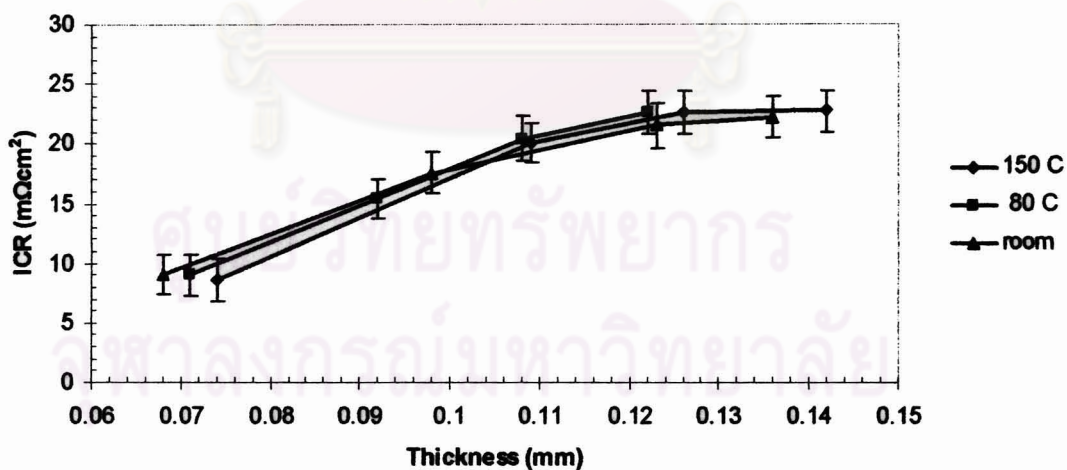
4.8.2 สารเคลือบซิงค์เรซิน

ศึกษาผลของอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิว ที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสเทียบกับอุณหภูมิห้องที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ โดยใช้สารเคลือบซิงค์เรซินผสมผงแบร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่า อุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวไม่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสที่ทุกๆ ค่าความหนาของสารเคลือบผิว เนื่องจากอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวไม่ทำให้สารเคลือบยึดติดโลหะได้แน่นขึ้น



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสที่ความหนาต่างๆ ในการเคลือบผิว โดยใช้สารเคลือบซิงค์เรซินผสมผงแบร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

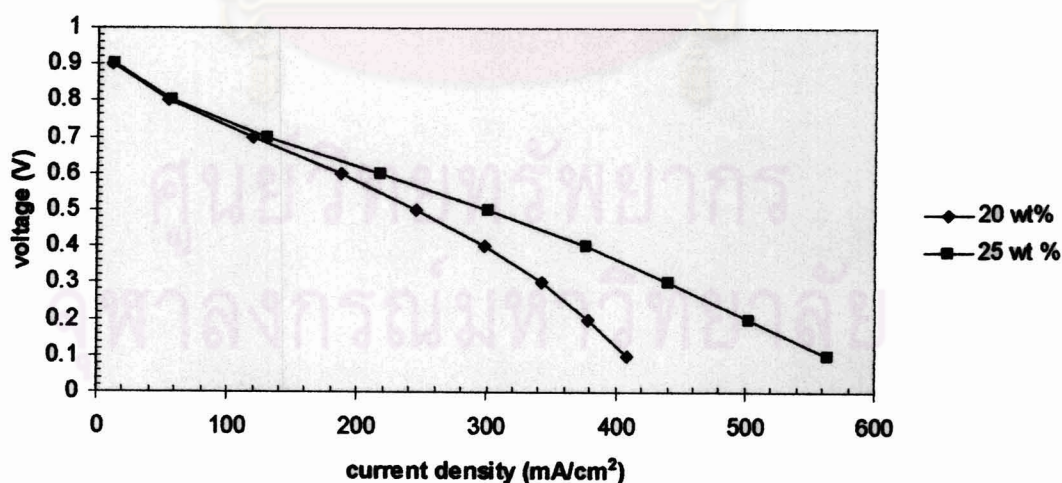
ผลของอุณหภูมิหลังการเคลือบผิว ที่มีต่อค่าความต้านทานสัมผัสให้ผลเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เนื่องจากอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิวไม่ทำให้สารเคลือบยึดติดโลหะได้แน่นขึ้น



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิวชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสที่ความหนาต่างๆ ในการเคลือบผิว โดยใช้สารเคลือบซิงค์เรซินผสมแบร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

4.9 การทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตจากงานวิจัย

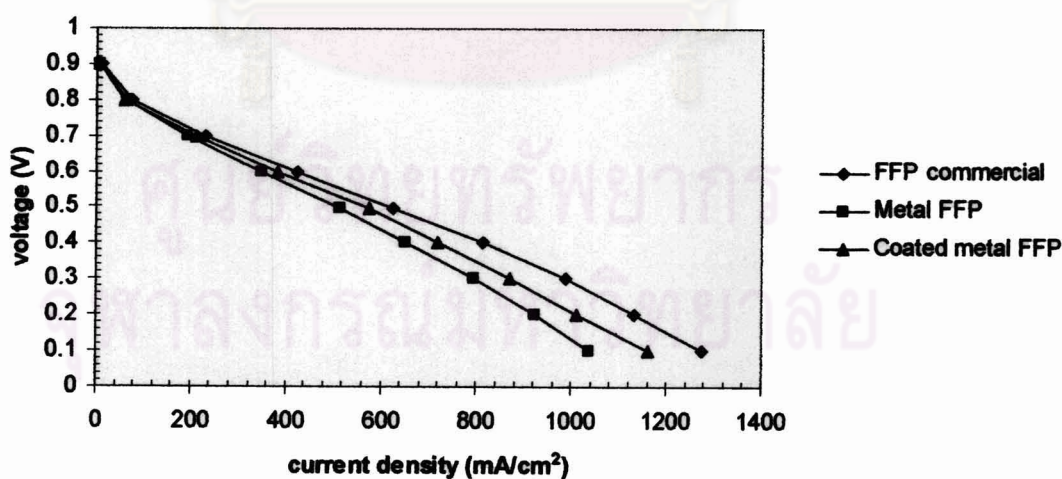
เนื่องจากปริมาณผงแปร่งถ่าน (CB) ที่ 20-25% ให้ค่าความต้านทานสัมผัสใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงทดสอบผลการใช้งานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วเคลือบด้วยผงแปร่งถ่าน (CB) ที่ปริมาณร้อยละ 20 และ 25 โดยน้ำหนักในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ในรูปของกราฟโพลาริเซชัน โดยใช้ แผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร แพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมมเบรนชนิด 115 พบว่า ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิด โลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตความหนาในการเคลือบผิวประมาณ 0.085 มิลลิเมตร ที่ปริมาณผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก (218 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าปริมาณผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (186.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ดังนั้นจึงเลือกปริมาณผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 25 ในการเตรียมแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิด โลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4.21 โพลาริเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิด โลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตความหนาในการเคลือบผิวประมาณ 0.085 มิลลิเมตรที่ปริมาณผงแปร่งถ่าน (CB) ร้อยละ 20 และ 25 โดยน้ำหนัก

การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นช่องการไหลของแก๊ส (Flow field plate) ชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊ส ชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ได้จากงานวิจัย 2 แผ่นและแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โพรทประกอบเมมเบรน (MEA) ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร แพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมมเบรนชนิด 115 เปรียบเทียบแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ และแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc โดยแสดงผลเป็นกราฟโพลาริเซชันและ Nyquist plot ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ รูปที่ 4.23

จากรูปที่ 4.22 พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต (Coated metal FFP) จากงานวิจัย จะให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (382.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) น้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc (FFP commercial) (422.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) แต่มีค่ามากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ (Metal FFP) (347.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานสัมผัสก่อนทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงของการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ความหนาในการเคลือบผิวประมาณ 0.085 มิลลิเมตร แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc และแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะมีค่าเท่ากับ 18.2, 40.1 และ 92.5 มิลลิโอมตารางเซนติเมตรตามลำดับ

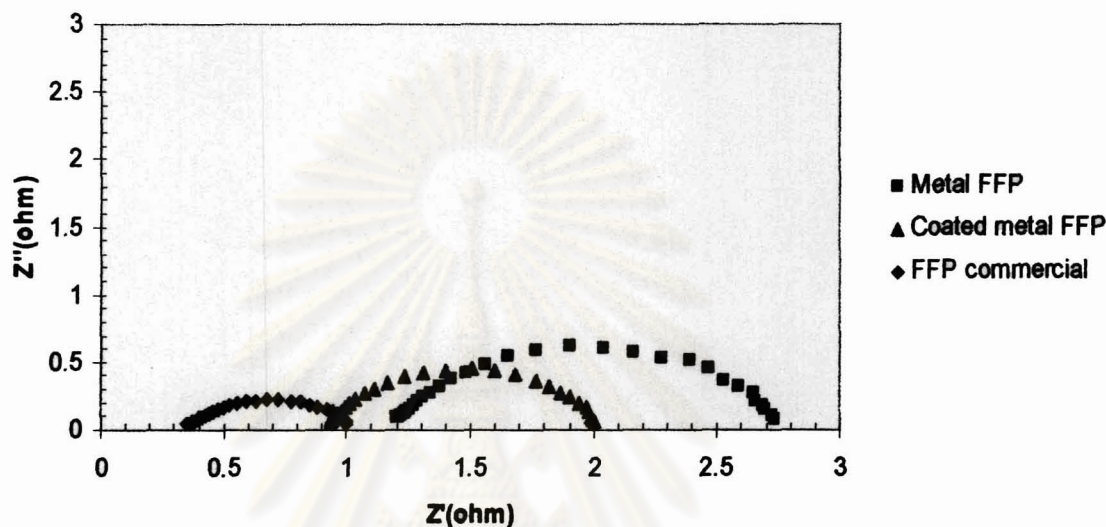


รูปที่ 4.22 โพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต (Coated metal FFP) แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ (Metal FFP) เปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc (FFP commercial)

จากค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นช่องการไหลของแก๊สทั้งหมดพบว่าแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต (Coated metal FFP) มีค่าน้อยกว่า แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ และแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ (Metal FFP) ตามลำดับ และค่าความต้านทานการสัมผัสหลังทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงของแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ความหนาในการเคลือบผิวประมาณ 0.085 มิลลิเมตร แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc และแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะมีค่าเท่ากับ 55.2, 40.7 และ 112.4 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตรตามลำดับ พบว่าค่าความต้านทานสัมผัสหลังทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะมากที่สุด รองมาแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต และแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc ตามลำดับ ค่าความต้านทานสัมผัสหลังทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงของแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะและแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นแต่แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc เท่าเดิม แสดงว่าแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะและแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพผิวหน้าหลังทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เนื่องจากสารเคลือบผิวเกิดการหลุด

ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จาก Niquist plot ของชุดเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตและแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ เทียบกับแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc ภายหลังจากทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.22 จะพิจารณาค่าความต้านทานโห์มมิก (Ohmic resistance) ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว จาก Niquist plot ความต้านทานโห์มมิกจะอยู่ในช่วงเริ่มต้นของแกน X (ค่า $x = 0$) จนถึงจุดเริ่มต้นของเส้นกราฟ ผลการทดสอบพบว่า ที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์ในรูปที่ 4.23 ชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc จะให้ค่าความต้านทานโห์มมิก (0.38 โห์ม) น้อยกว่า แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ให้ค่าความต้านทานโห์มมิก (0.92 โห์ม) และแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะที่ให้ค่าความต้านทานโห์มมิก (1.21 โห์ม) ซึ่งค่าความต้านทานโห์มมิกโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันนี้ เป็นผลเนื่องจาก ความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ดังนั้นแสดงว่าประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตและแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะจากงานวิจัยยังมีค่า

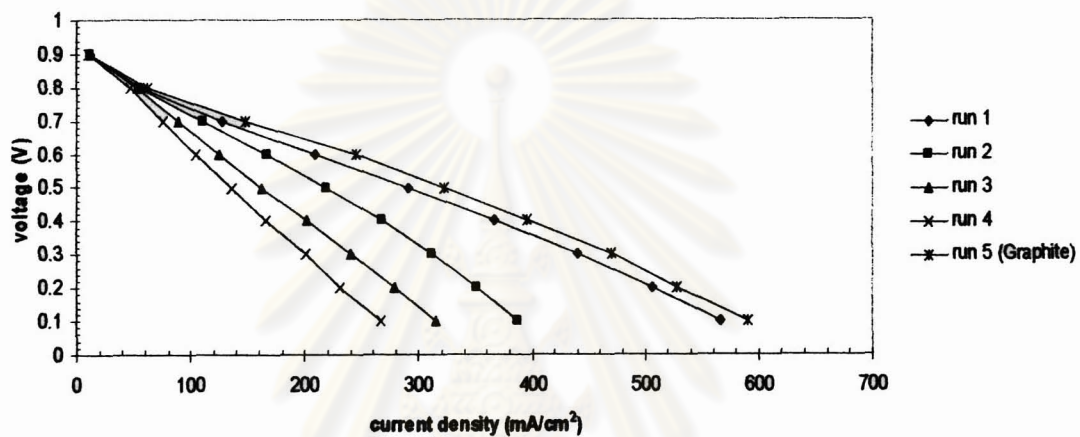
น้อยกว่าแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพหุมิชย์ของ Electrochem, Inc ทั้งนี้สอดคล้องกับค่าความต้านทานสัมผัสหลังการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM



รูปที่ 4.23 Nyquist plot ของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สที่ได้จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพหุมิชย์ของ Electrochem, Inc ที่ค่าความต่างศักย์ 0.7 โวลต์

เพื่อทดสอบเสถียรภาพของการใช้งานของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตจึงทำการศึกษากาฟโฟลาไรเซชันและค่าความต้านทานสัมผัส หลังการทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละครั้ง พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์จะลดลงตามครั้งที่ทำการทดสอบครั้งที่ 1 ถึง 4 จาก 209.4, 166.4, 124.6 และ 104.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรแสดงในรูปที่ 4.24 และค่าความต้านทานสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 54.2, 72.7, 115.3 และ 145.3 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร เซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ครั้งที่ 1 ถึง 4 แต่ในครั้งที่ 5 ได้ทำการทดสอบแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ที่ผ่านการใช้งานแล้วกับแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพหุมิชย์ของ Electrochem, Inc พบว่าได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 244.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.24 และค่าความต้านทานสัมผัส 41.4 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานสัมผัสก่อนทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงของแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ความหนาในการเคลือบผิวประมาณ

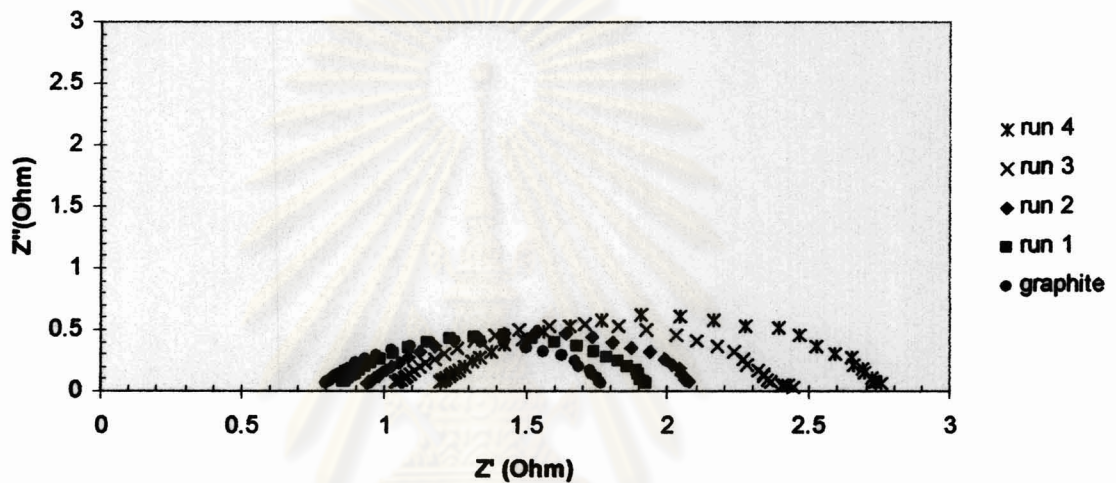
0.085 มิลลิเมตรประมาณ 18.7 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร แต่ภายหลังจากทดสอบเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลดลงและค่าความต้านทานสัมผัสเพิ่มขึ้น แสดงว่าแผ่นช่อง การไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพที่ผิวของ โลหะ เนื่องจากสารเคลือบผิวเกิดการหลุด



รูปที่ 4.24 โพลาริเซชันของขดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตความหนาในการเคลือบผิวประมาณ 0.085 มิลลิเมตรและแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc ในการใช้งานแต่ละครั้ง

ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จาก Niquist plot ของขดเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต ภายหลังจากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ครั้งที่ 1 ถึง 4 เทียบกับแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.25 ผลการทดสอบพบว่า ที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์ ขดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc (0.80 โอห์ม) น้อยกว่า แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตภายหลังจากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ครั้งที่ 1 ถึง 4 (0.87โอห์ม) (0.97โอห์ม), (1.06โอห์ม) และ(1.21โอห์ม) ตามลำดับซึ่งค่าความต้านทานโอห์มมิกโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันนี้ เป็นผลเนื่องจากความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ดังนั้นแสดงว่าประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตน้อยกว่าแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพผิวหน้ามีผล

ต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสารเคลือบกับแผ่นโลหะน้อยลง เกิดขึ้นเพราะมีความต้านทานโอห์มมิกเพิ่มมากขึ้นภายหลังจากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ครั้งที่ 1 ถึง 4 และสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.24 และค่าความต้านทานสัมผัสสูงขึ้น



รูปที่ 4.25 Nyquist plot ของเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สที่ได้จากงานวิจัยภายหลังจากการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ครั้งที่ 1 ถึง 4 และเปรียบเทียบกับแผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc ที่ค่าความต่างศักย์ 0.7 โวลต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสารนำไฟฟ้าที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพคือขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของผงคาร์บอน 5 ชนิด คือ ผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH ผงแกรไฟต์ชนิด High conductivity ผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) และผงแปร่งถ่าน (CB) ผงคาร์บอนที่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารช่วยยึดเกาะ ผงคาร์บอน และตัวทำละลายโทลูอิน คือ ผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และผงแปร่งถ่าน (CB) ส่วนผงแกรไฟต์ชนิด High conductivity และ ผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black) จะไม่รวมกันเป็นสารเคลือบเนื้อเดียวกันได้

เมื่อทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและค่ากระแสไฟฟ้าของการกักตัวของสารเคลือบที่ประกอบด้วย ผงคาร์บอน อีพอกซีเรซิน พอลิเอไมด์ ตัวทำละลายโทลูอิน ศึกษาผงคาร์บอน 3 ชนิดคือผงแกรไฟต์ชนิด RGN-C ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และผงแปร่งถ่าน (CB) พบว่าค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนและกระแสการกักตัวมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความหนาในการเคลือบผิว ผงคาร์บอนที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกนที่สูงคือคือ ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และผงแปร่งถ่าน (CB) แต่ผงแปร่งถ่าน (CB) มีค่ากระแสการกักตัวที่ต่ำสุด ในส่วนของค่าความต้านทานสัมผัสของสารเคลือบอีพอกซีเรซินของผงคาร์บอน 2 ชนิดคือผงแกรไฟต์ชนิด BDH และผงแปร่งถ่าน (CB) พบว่าค่าความต้านทานสัมผัสนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความหนาในการเคลือบผิวของสารเคลือบ และค่าความต้านทานสัมผัสของสารเคลือบอีพอกซีเรซินผสมผงแกรไฟต์ชนิด BDH มากกว่าสารเคลือบอีพอกซีเรซินผสมผงแปร่งถ่าน (CB) การเพิ่มของปริมาณผงคาร์บอนที่ความหนาในการเคลือบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 0.228 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงแกรไฟต์มากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานสัมผัสลดลง

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกักตัวของสารเคลือบที่มีซิงค์เรซินเป็นองค์ประกอบมีค่าต่ำกว่าสารเคลือบที่มีอีพอกซีเรซินเป็นองค์ประกอบและสารเคลือบซิงค์เรซินที่มีผงแปร่งถ่าน (CB) เป็นองค์ประกอบมีค่าความต้านทานสัมผัสต่ำที่สุด โดยอัตราส่วนสารเคลือบที่เหมาะสมคือผงแปร่งถ่าน (CB) : ซิงค์เรซิน : ตัวทำละลายโทลูอิน ในอัตราส่วนร้อยละ 25:10:65 โดยน้ำหนัก โดยที่ความหนา 0.085 มิลลิเมตรในการเคลือบผิว จะให้ค่าความต้านทานสัมผัสและ

ค่ากระแสการกักต่อน้อยกว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ ค่าความต้านทานสัมผัสของ ทองแดง อะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ภายหลังจากการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบในอัตราส่วนที่เหมาะสม พบว่าค่าความต้านทานสัมผัสมีค่าลดลงกว่าโลหะที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิว และค่าความต้านทานสัมผัสของเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) และทองแดงที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลของอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวและอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิวของสารเคลือบผิวเชิงรีซินหรืออีพอกซีเรซิน พบว่าอุณหภูมิการอบก่อนการเคลือบผิวของสารเคลือบผิวและอุณหภูมิการอบหลังการเคลือบผิว ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานสัมผัสที่ทุกค่าความหนาในการเคลือบผิว

จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM พบว่าแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิด โลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (382.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) น้อยกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc (422.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีค่ามากกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ (347.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์และค่าความต้านทานโอห์มมิกที่ความต่างศักย์ 0.7 โวลต์ แผ่นช่องการไหลของแก๊สเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc (0.38 โอห์ม) น้อยกว่า แผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต (0.92 โอห์ม) และแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ (1.21 โอห์ม) และค่าความต้านทานการสัมผัสหลังทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงโลหะ 55.2, 40.7 และ 112.4 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความเสถียรของการใช้งานของแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จะลดลงจาก 209.4 ถึง 104.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและค่าความต้านทานสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 54.2 ถึง 145.3 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตรและค่าความต้านทาน โอห์มมิกมีค่ามากขึ้นจาก 0.87 ถึง 1.21 โอห์ม เมื่อจำนวนครั้งการใช้งานเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. กรณีของการใช้สารยึดเกาะที่เป็นของเหลว ในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องกวนผสมควรใช้ ความเร็วของใบกวนในระดับต่ำที่ 100 รอบต่อนาที เพื่อให้สารช่วยยึดเกาะและผงคาร์บอนผสมเข้ากันอย่างทั่วถึง
2. การวัดค่าความนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านโดยวัดแบบ Interfacial contact resistance (ICR) โดยเพิ่มแรงอัดจนค่าความต่างศักย์ที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงแล้วจึงบันทึกค่าความต่างศักย์ที่ได้
3. ในการแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบโลหะเคลือบด้วยคาร์บอน กระบวนการ CVD หรือ PVD จะให้ค่า ICR ที่ต่ำกว่าเพราะว่าสารเคลือบยึดติดดีกว่า
4. เมื่อเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่ประกอบด้วยซิงค์เรซินในสภาวะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อจำนวนครั้งในการใช้งานเพิ่มมากขึ้นอาจจะทำให้สารเคลือบที่ประกอบด้วยซิงค์เรซินหลุดออกทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลง จึงควรเปลี่ยนสารช่วยยึดติดที่เกาะติดได้ดีกว่า และนำไฟฟ้าได้มากกว่าซิงค์เรซิน

รายการอ้างอิง

- [1] L.D. Palacio. General for the research. Hydrogen Energy and Fuel cell, A vision of our future. Brussels : European Commission, 2003.
- [2] F. Barbir. PEM Fuel Cell: Theory and Practice. British : Elsevier Academic Press, 2005.
- [3] J. Larminie and A. Dicks. Fuel cell systems Explained. Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2nd edition, 2003.
- [4] J.C. Grunlan, W.W. Gerberich and L.F. Francis. Lowering the percolation threshold of conductive composites using particulate polymer microstructure. Journal of Applied Polymer Science. 80 (2001) 692–705.
- [5] Y.J. Ren and C.L. Zeng. Corrosion protection of 304 stainless steel bipolar plates using TiC films produced by high-energy micro-arc alloying process. Journal of Power Sources. 171 (2007) 778–782.
- [6] พลังงานไฮโดรเจน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://astrosun2.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/hydrogen_burn.htm
- [7] Energy Information Administration. System for the Analysis of global Energy Markets. Washington D.C. : DOA/EIA, 2003.
- [8] U. Bossel. The birth of the Fuel cell. Switzerland : European Fuel Cell Forum. (2000), 1835-1845
- [9] ระบบการทำงานเซลล์เชื้อเพลิง [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://www.knowledgepublication.com/doe_fuel_cell_handbook_hydrogen_power_generation.html

- [10] E. Chen, History and G. Hoogers. Fuel Cell technology Handbook. Boca : CRC Press, 2003
- [11] เซลล์เชื้อเพลิงหน่วยขั้น [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.allabouthybridcars.com/ebook/hybrid-electric-cars2.htm>
- [12] W. Vielstich, A. Lamm and H. Gasteiger. Handbook of Fuel Cell Technology Fundamentals, Technology and Applications. New York : John Wiley, Vol. 4, 2003.
- [13] F. Barbir, M. Nadal and M. Fuchs. Fuel Powered Utility Vehicles, Portable Fuel cell Conference. Switzerland : Lucerne, (1999) 113-126.
- [14] การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิง [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://enghome.eng.psu.ac.th/mne/knowledge/student/Fuel%20cell49/Application.html>
- [15] C. Stone and A. E. Morrison. Form Curiosity "Power to Change the World", Solid state Ionics, Vol. 152-153, (2002) 1-13
- [16] การพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงในอนาคต [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.green-trust.org/2000/carbonhydrogen.htm>
- [17] เซลล์เชื้อเพลิงแบบเดี่ยว (Single cell) [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://hyperphysics.phyastr%20.gsu.edu/thermo/electro.html>
- [18] โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM เมื่อนำมาต่อกันแบบขั้น (Fuel cell stack) [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.iitk.ac.in/infocell/iitk/newhtml/storyoftheweek42.htm>
- [19] การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.elanese.de/gb2002/en/magazine/growth/02/>

- [20] F. Barbir and J. Braun. Development of Low Cost Bi-Polar plates for PEM Fuel Cells. Philadelphia : Fuel Cell Research, 2000.
- [21] H. Tawfik, Y. Hung and D. Mahajan. Metal Bipolar Plates for PEM fuel cell-A review. Journal of Power Sources, 163 (2007) 755-767.
- [22] K. Shigehiro, U. Hiroyuki, and W. Masahiro. Metal separator coated with carbon/resin composite layers for PEFCs. Electrochimica Acta, 53 (2007) 2025-2033.
- [23] H. Wang, M.A. Sweikart and J.A. Turner. Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. J. Power Sources, 115 (2003) 243–251.
- [24] J. Jayaraj, Y.C. Kim, K.B. Kim, H.K. Seok and E. Fleury. Development of metallic glasses for bipolar plate application. Sci. Technol. Adv. Mater. 6 (2005) 282–289.
- [25] A. Kumar and R.G. Reddy. Metal foams as flow field and gas diffusion layer in direct methanol fuel cells J. Power Sources, 129 (2004) 62–67.
- [26] R.L. Borup and N.E. Vanderburgh. Mater. Polypropylene Composites for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Bipolar Plates. Res. Soc. Symp. Proc. 393 (1995) 151–155.
- [27] A.S. Woodman, E.B. Anderson, K.D. Jayne and M.C. Kimble. American Electroplaters and Surface Finishers Society 1999, AESF SUR/FIN'99 Proceedings, June 21–24, 1999.
- [28] V. Mehta and J.S. Cooper. Testing and evaluation of aluminum coated bipolar plates of pem fuel cells operating at 70 °C. J. Power Sources, 144 (2003) 32–53.

- [29] M.S. Shine, C. Zawodzinski, S. Moller-Holst, D.N. Busick, F.A. Uribe and T.A. Zawodzinski. Proceedings of the 1999 U.S. DOE Hydrogen Program Review, 1999.
- [30] A. Hermann, T. Chaudhuri and P. Spagnol. Production of metallic glassy bipolar plates for PEM fuel cells by hot pressing in the supercooled liquid state. *J. Hydrogen Energy*, 30 (2005) 1297–1302.
- [31] M. Li, S. Luo, C. Zeng, J. Shen, H. Lin and C. Cao. Corrosion and contact resistance measurements of different bipolar plate material for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Sci.*, 46 (2004) 1369–1380.
- [32] Y. Hung, K. El-Khatib, H. Tawfik, ASME—The 2nd International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, RIT, Rochester, New York, June 14–16, 2004.
- [33] M.P. Brady, P.F. Tortorelli, K.L. More, H.M. Meyer III, L.R. Walker, H. Wang, J.A. Turner, B. Yang and R.A. Buchanan. Cost-effective surface modification for metallic bipolar plates, DOE FY 2004 Progress Report.
- [33] M.H. Fronk, R.L. Borup, B.K. Brady and S.J. Hulett. “Corrosion Resistant Contact Element for a PEM Fuel Cell. United States Patent Application. (1999) 456-478.
- [34] S.J. Lee, C.H. Huang, Y.P. Chen and J. Mater. An investigation of the electrochemical properties of PVD TiN-coated SS410 in simulated PEM fuel cell environments. *Technol.* 140 (2003) 688–693.
- [35] J. Beddoes, K. Bucci, The influence of surface condition on the localized corrosion of 316L stainless steel orthopedic implants, *J. Mater. Sci.: Mater. Med.* 10 (1999) 389–394.

- [36] A. Pozio , F. Zaza, A. Masci and R.F. Silva. Bipolar plate materials for PEMFCs : A conductivity and stability study. Journal of Power Sources, 179 (2008) 631–639
- [37] F. Tomokazu, Y. Takayuki, M. Shin-Ichi, M. Yoshiaki, S. Yosohiro, and O. Zempachi. Carbon-Coated stainless steel as PEFC bipolar plate material. Journal of Power Sources, 174 (2007) 199-205.
- [38] S. R. Dhakate, R. B. Mathur, B. K. Kakati, and T. L. Dhami. Properties of graphite-composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM. Journal of Power Sources, 171 (2007) 424-432.
- [39] เอื้องดาว จันทร์คร, การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วจากพอลิพรอพิลีนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [40] เสาวลักษณ์ ผลาพิบูลย์, การเตรียมแผ่นนำกระแสสองขั้วจากแกรไฟต์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [41] ราคาวัสดุของโลหะชนิดต่างๆ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.metalprices.com/>



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

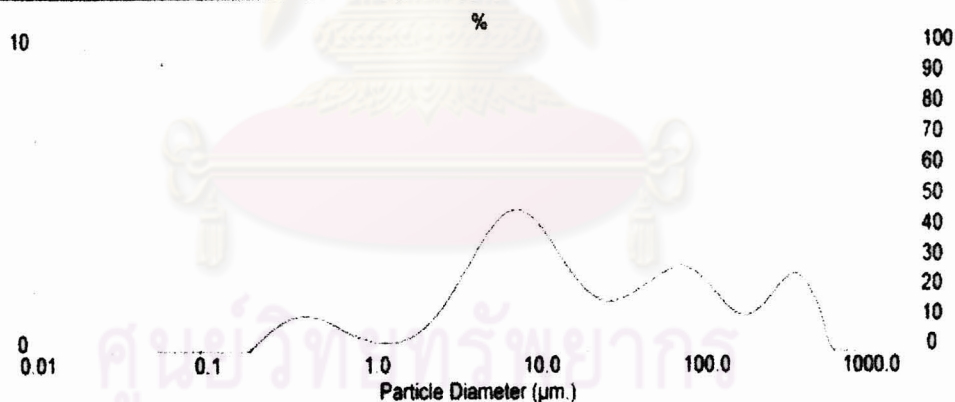
สมบัติของสารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ก-1 มงแกรไฟต์ เกรด RGN-C

ขนาดอนุภาคการกระจายที่ 0.5 ของกราฟการกระจายตัวอย่างปกติของการวัด 3 ครั้ง พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 6.54 ไมโครเมตร ของเครื่อง Laser particle size

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 14.1 %
Presentation: 3_CBW	[Particle R.I. = (1.8000, 3.0000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 1.288 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0046 %Vol	Density = 1.000 g / cub cm	Specific S.A. = 2.0182 sq. m / g
Mean Diameters	D (v, 0.1) = 1.23 um	D (v, 0.5) = <u>6.54 um</u>	D (v, 0.9) = 26.42 um
D [4, 3] = 10.69 um	D [3, 2] = 2.97 um	Span = 3.852E+00	Uniformity = 1.164E+00



Malvern Instruments Ltd.
Malvern UK
Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
Serial Number: +[44] (0)1684-892789

p. 20
01 Sep 08 18:29

องค์ประกอบของมงแกรไฟต์ (ร้อยละ)

คาร์บอนคงที่	82.84
เถ้า	15.12
องค์ประกอบที่ระเหยได้	2.04
ความชื้น	0.30
องค์ประกอบของมงแกรไฟต์เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (ร้อยละ)	

คาร์บอน (C)	52.20
ซิลิกอน (Si)	4.19
อะลูมิเนียม (Al)	2.66
เหล็ก (Fe)	1.33
แคลเซียม (Ca)	1.14
อื่นๆ (Ti, Na, P, Mg, K, S, Mn, Rb, Sr, Zr)	38.48

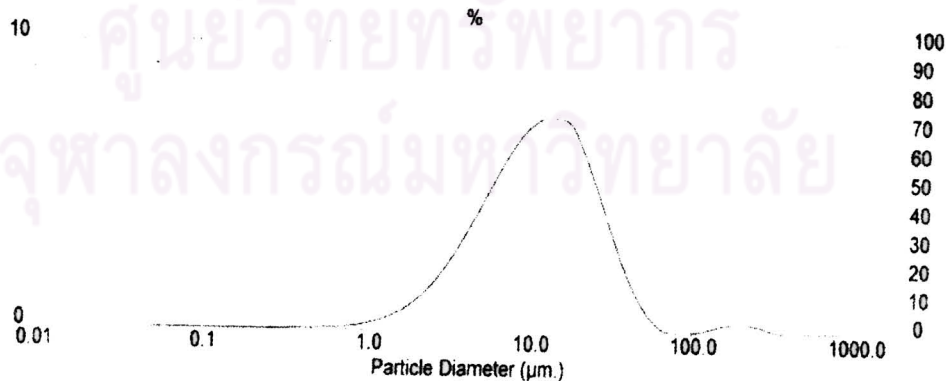
แหล่งข้อมูล : บริษัทสุริยไนด์คาร์บอน จำกัด

ก-2 องค์ประกอบของแกรไฟต์ (BDH)

ขนาดอนุภาคการกระจายที่ 0.5 ของกราฟการกระจายตัวอย่างปกติของการวัด 3 ครั้ง
พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 11.73 ไมโครเมตร ของเครื่อง Laser particle size

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 16.2 %
Presentation: 3_CBW	[Particle R.I. = (1.8000, 3.0000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.789 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0152 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.8173 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 3.71 μ m	D (v, 0.5) = 11.67 μ m	D (v, 0.9) = 30.00 μ m
D [4. 3] = 17.12 μ m	D [3. 2] = 7.34 μ m	Span = 2.252E+00	Uniformity = 9.089E-01



ข้อจำกัดสูงสุดของสารเจือปน

ปริมาณสารที่ละลายได้ในเอทานอล (ร้อยละ)	0.2
ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ที่ 800 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)	1
การสูญเสียจากการทำให้แห้งที่ 120 องศาเซลเซียส (ร้อยละ)	0.5

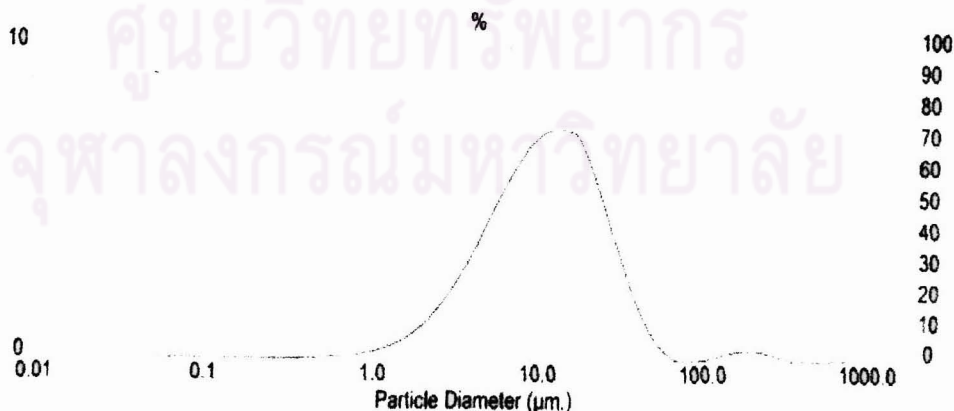
แหล่งข้อมูล : U. S. Laboratory

ก-3 องค์ประกอบของผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black)

ขนาดอนุภาคการกระจายที่ 0.5 ของกราฟการกระจายตัวอย่างปกติของการวัด 3 ครั้ง พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 13.27 ไมโครเมตร ของเครื่อง Laser particle size

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 15.5 %
Presentation: 3_CBW	[Particle R.I. = (1.8000, 3.0000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 4.392 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0054 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 1.7670 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 1.98 um	D (v, 0.5) = 13.27 um	D (v, 0.9) = 257.70 um
D [4, 3] = 68.84 um	D [3, 2] = 3.40 um	Span = 1.927E+01	Uniformity = 4.764E+00



ข้อกำหนด	
สีที่ปรากฏ	ผงสีดำ
การกค้อด (ร้อยละ)	50
สมบัติทางกายภาพ	
ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)	0.03
ความหนาแน่นจุดไหลเท	0.087
สภาพความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม.เซนติเมตร)	0.17
ตัวเลขการดูดซับไฮโดรคลอริก (มิลลิเมตร/5กรัม)	21.8
อนุภาคหยาบ (ร้อยละ)	< 0.01
ตัวเลขการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัม/กรัม)	157.7
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.08

แหล่งข้อมูล : ข้อมูลจากบริษัทอุตสาหกรรมปิโตรเคมีคอด จำกัดมหาชน (TPI)

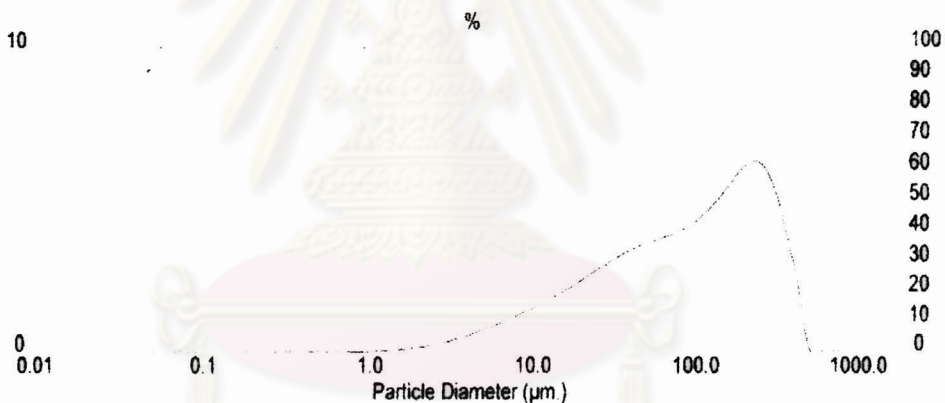
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก-4 องค์ประกอบของแกรไฟต์ (High conductivity)

ขนาดอนุภาคการกระจายที่ 0.5 ของกราฟการกระจายตัวอย่างปกติของการวัด 3 ครั้ง พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 98.46 ไมโครเมตร ของเครื่อง Laser particle size

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 9.0 %
Presentation: 3_CBW	[Particle R.I. = (1.8000, 3.0000); Dispersant R.I. = 1.3300]		Residual: 1.025 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0385 %Vol	Density = 1.000 g / cub cm	Specific SA = 0.1856 sq m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 13.54 um	D (v, 0.5) = <u>98.46 um</u>	D (v, 0.9) = 301.89 um
D [4, 3] = 131.28 um	D [3, 2] = 32.33 um	Span = 2.929E+00	Uniformity = 9.273E-01



Malvern Instruments Ltd
Malvern, UK
Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

Mastersizer S long bed Ver. 2.19
Serial Number: i i i : Èr%H>m%H

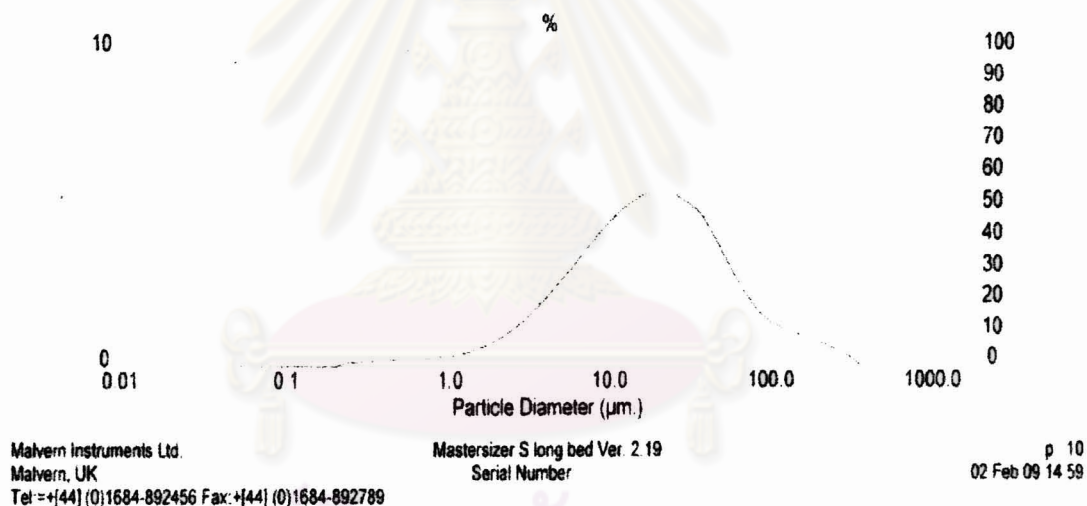
p. 16
01 Sep 08 18:10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก-5 องค์ประกอบของผงแปรงถ่าน (Carbon Brush)

ขนาดอนุภาคการกระจายที่ 0.5 ของกราฟการกระจายตัวอย่างปกติของการวัด 3 ครั้ง พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 18.64 ไมโครเมตร ของเครื่อง Laser particle size

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 19.8 %
Presentation: 3_CBW	(Particle R.I. = (1.8000, 3.0000))	Dispersant R.I. = 1.3300	Residual: 1.309 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			
Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0185 %Vol	Density = 1.000 g / cub cm	Specific SA = 0.7828 sq m / g
Mean Diameters	D (v. 0.1) = 4.06 um	D (v. 0.5) = <u>18.93 um</u>	D (v. 0.9) = 75.12 um
D [4.3] = 33.50 um	D [3.2] = 7.66 um	Span = 3.755E+00	Uniformity = 1.292E+00



ก-6 ซิงค์เรซิน

คุณสมบัติ

ประกอบด้วยสังกะสีบริสุทธิ์ ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

เป็นตัวรองพื้นที่ดีสำหรับโลหะ

เพื่อป้องกันสนิมและการกัดกร่อน

แห้งเร็วมาก ภายใน 5-10 นาที

แหล่งข้อมูล : บริษัท รีเสิร์จโปรดัก อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล จำกัด

ก-7 อีพอกซีเรซิน No. 100 และสารช่วยในการแข็งตัว No. 100

อีพอกซีเรซิน No. 100

สมบัติทางเคมี และ กายภาพ

จุดเดือด	>150 °C
ความถ่วงจำเพาะ	1.05
จุดที่จะเกิดประกายไฟ	>100 °C
ความดันไอ	>0.01 KPa
การละลายน้ำ	<100 g/L

แหล่งข้อมูล : บริษัท รุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาส จำกัด

สารช่วยในการแข็งตัว (Hardener) No.100

ชื่อทางเคมี Aliphatic polyamine

สมบัติทางเคมี และ กายภาพ

จุดเดือด	>90 °C
ความถ่วงจำเพาะ	1.1
ความดันไอ	>0.01 KPa
การละลายน้ำ	<100 g/L
จุดที่จะเกิดประกายไฟ	>100 °C

แหล่งข้อมูล : บริษัท รุ่งโรจน์ไฟเบอร์กลาส จำกัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวฉีดพ่น หมายเลข 41- 005 ขนาดใหญ่ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร
ความดันปั๊มลมที่ใช้ในการทดลอง 10 lb/in²

แหล่งข้อมูล : บริษัท True International co., Ltd.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ข-1 การคำนวณค่าการนำไฟฟ้าในแนวแกน

ข้อมูลการทดลอง ชิ้นงาน เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ประกอบด้วยผงแบเรียม (CB): โทลูอิน: ซิงค์เรซิน ในอัตราส่วนร้อยละ 25:65:10 โดยน้ำหนัก ที่ความหนาในการเคลือบผิว 0.085 มิลลิเมตร

ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของเครื่องมือวัด $D = 0.3 \text{ cm}$

กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าชิ้นงาน $I = 0.1 \text{ A}$

พื้นที่ชิ้นงานที่สัมผัสกับขั้วไฟฟ้า $A = 0.78 \text{ cm}^2$

ค่าความต่างศักย์ที่วัดค่าได้ 10 ค่าดังนี้

$V \text{ (mV)} = 0.096, 0.095, 0.097, 0.095, 0.096, 0.096, 0.096, 0.096, 0.096$ และ 0.0960

$V_{av} = (0.096+0.095+0.097+ 0.095+0.096+0.096+ 0.096+ 0.096+ 0.096+ 0.0960)/10$

$V_{av} = 0.096 \text{ mV}$

คำนวณค่าความต้านทานของชิ้นงานจากสมการที่ 3.2

$$R = V/I$$

$$R = 0.0000961/0.1$$

$$R = 0.000961 \text{ โอห์ม}$$

คำนวณค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจากสมการที่ 3.3

$$\sigma = D / (RA)$$

$$\sigma = (0.3) / (0.000961 \times (0.78))$$

$$\sigma = 400.2 \text{ S/cm}$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-2 การคำนวณค่าการนำไฟฟ้าในแนวทะลุผ่าน

ข้อมูลการทดลอง ชิ้นงาน เหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ประกอบด้วยสารผงแปร่งถ่าน (CB): โทลูอิน: ซิงค์เรซิน ในอัตราส่วนร้อยละ 25:65:10 โดยน้ำหนัก ที่ความหนาในการเคลือบผิว 0.085 มิลลิเมตร

$$\text{สมการหาค่าความต้านทานสัมผัส (ICR)} = (R_2 - R_1)/2$$

$$R_1 = \text{วัดค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด (mohmcm}^2\text{)}$$

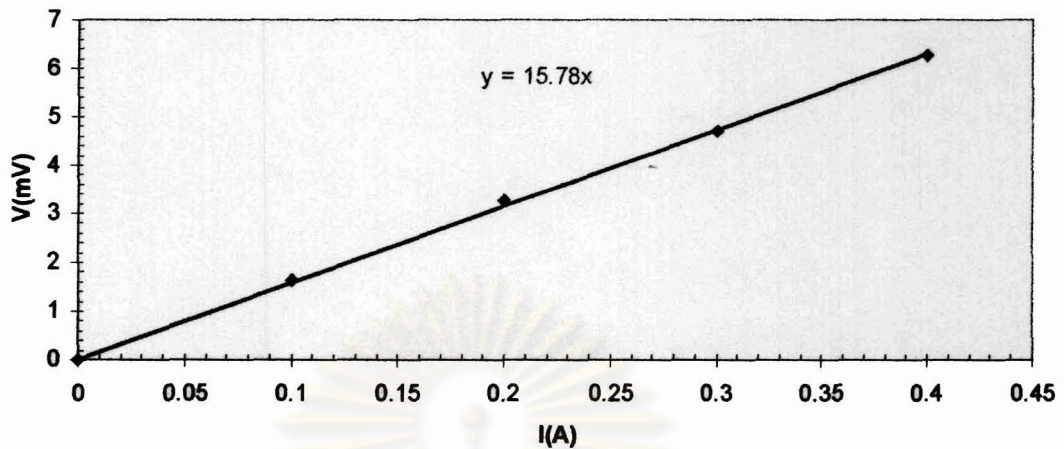
$$R_2 = \text{วัดค่าความต้านทานผิวสัมผัสคอนมิตซ์งาน (mohmcm}^2\text{)}$$

วัดค่าความต้านทานสัมผัสเครื่องมือวัด R_1

A คือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า, $A = 4.94 \text{ cm}^2$

I(A)	V(mV)
0	0
0.1	1.64
0.2	3.27
0.3	4.72
0.4	6.25

นำไปพล็อตกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดยสมการกฎของโอห์ม $V = IR$



ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของเครื่องมือ

ค่าความต้านทาน $R = 15.8 \text{ mohm}$

ค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด $R_1 = R \times A$

$$R_1 = 15.78 \times 4.94$$

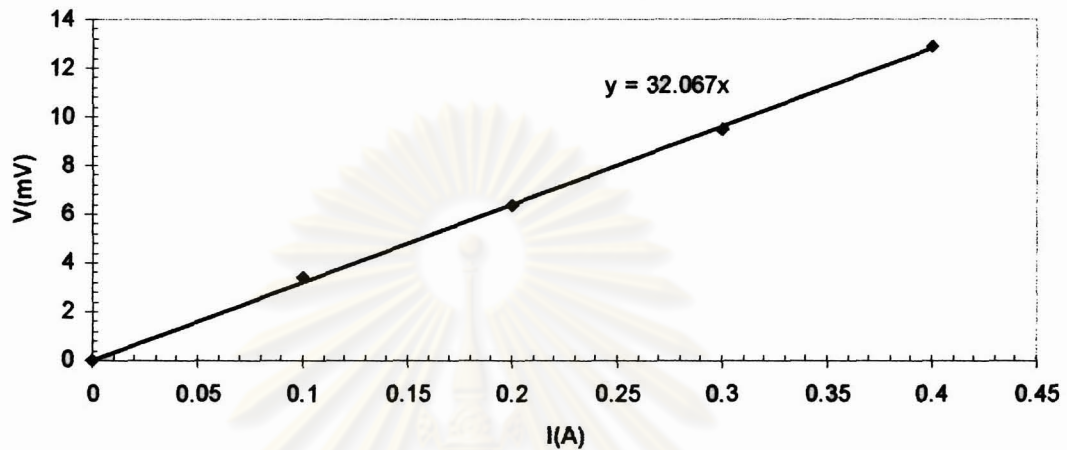
$$R_1 = 76.74 \text{ mohmcm}^2$$

วัดค่าความต้านทานสัมผัสชิ้นงาน R_2

A คือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า, $A = 3.38 \text{ cm}^2$

I(A)	V(mV)
0	0
0.1	3.4
0.2	6.36
0.3	9.48
0.4	12.91

นำไปพล็อตกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดยสมการกฎของโอห์ม $V = IR$



ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของชิ้นงาน

$$\text{ค่าความต้านทาน } R = 32.07 \text{ mohm}$$

$$\text{ค่าความต้านทานสัมผัสของชิ้นงาน } R_2 = R \times A$$

$$R_2 = 32.07 \times 3.38$$

$$R_2 = 108.09 \text{ mohmcm}^2$$

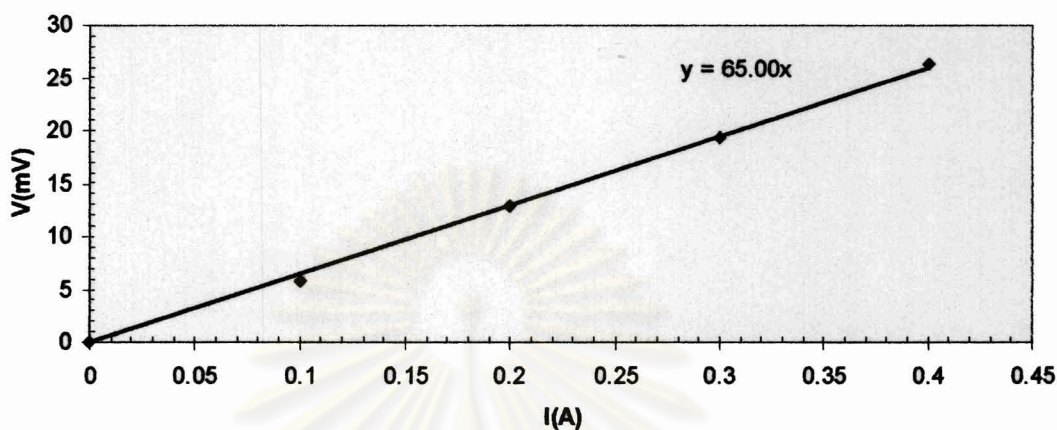
หาค่าความต้านทานสัมผัสรวมตามสมการที่ 3.4

$$(ICR) = (R_2 - R_1)/2$$

$$(ICR) = (108.09 - 76.74)/2$$

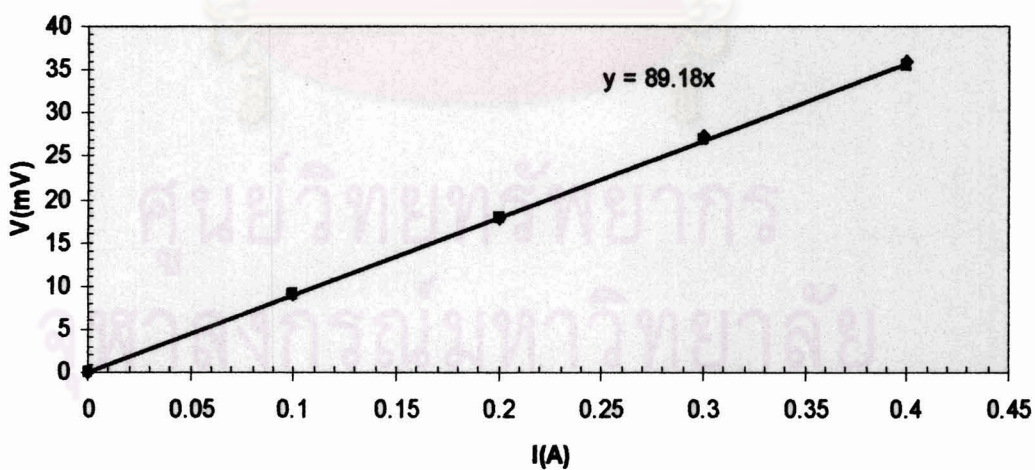
$$(ICR) = 14.34 \text{ mohmcm}^2$$

ค่าความต้านทานสัมผัสของ โลหะชนิดต่างๆ



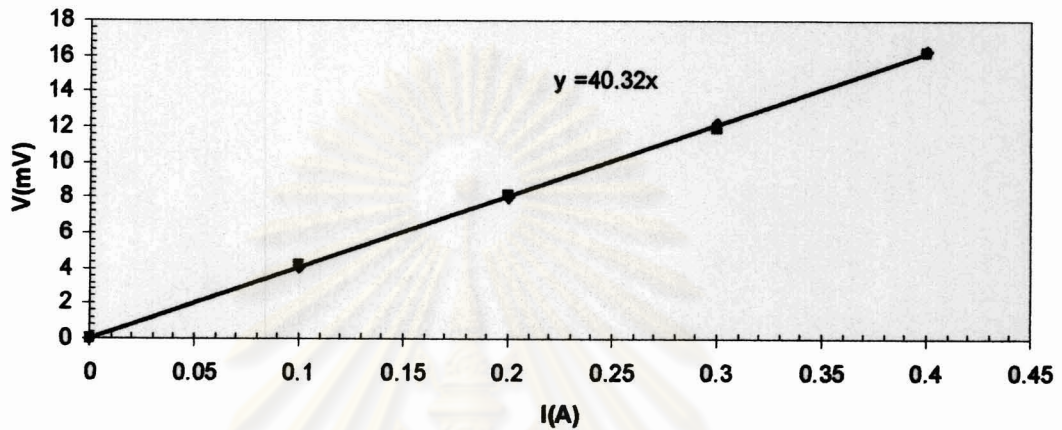
ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว

คำนวณหาค่า ICR ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวตามสมการ 3.4 ได้เท่ากับ 93.60 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร



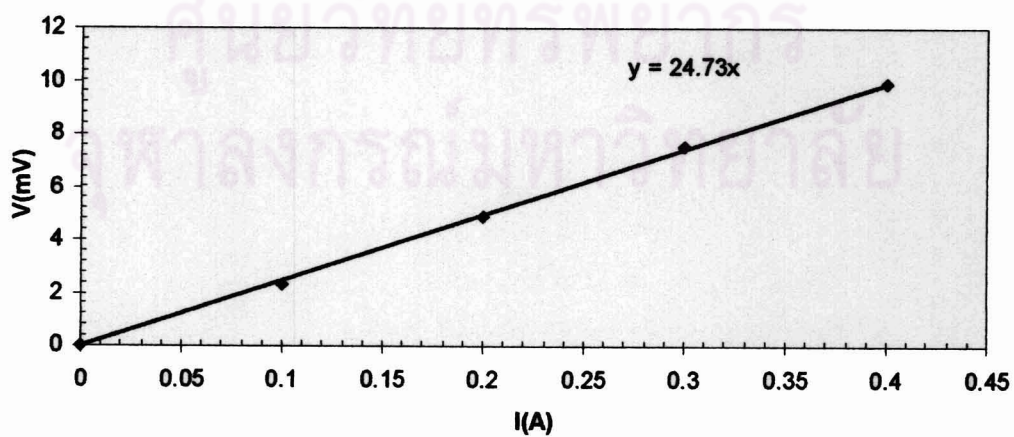
ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว

คำนวณหาค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวได้เท่ากับ 140.75 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร



ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว

คำนวณหาค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวได้เท่ากับ 45.47 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร



ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของแกรไฟต์เชิงพาณิชย์

คำนวณหาค่าความต้านสัมผัสของนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วของแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ได้
เท่ากับ 39.59 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย พรชัย ชินสา เกิดวันที่ 8 มิถุนายน พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดอำนาจเจริญ สำเร็จการศึกษา
ชั้นมัธยมศึกษา จากโรงเรียนอำนาจเจริญ จังหวัดอำนาจเจริญ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาใน
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย