ผลขององค์ประกอบของคาร์บอน/เรซินคอมพอสิตต่อสมบัติของแผ่นโลหะเคลือบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

นาย จักรพงศ์ ศิริประสมทรัพย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF COMPOSITION OF CARBON/RESIN COMPOSITE ON COATED METAL PLATE PROPERTIES FOR PEM FUEL CELL

Mr. Jakrapong Siriprasomsub

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลขององค์ประกอบของคาร์บอน/เรซินคอมพอสิตต่อสมบัติของแผ่นโลหะเคลือบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
โดย	นาย จักรพงศ์ ศิริประสมทรัพย์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.คุณากร ภู่จินดา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จักรพงศ์ ศิริประสมทรัพย์: ผลขององค์ประกอบของคาร์บอน/เรซินคอมพอสิตต่อสมบัติของแผ่นโลหะเคลือบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม. (EFFECTS OF COMPOSITION OF CARBON/RESIN COMPOSITE ON COATED METAL PLATE PROPERTIES FOR PEM FUEL CELL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เก็จวลี พฤกษาทร, 84 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลขององค์ประกอบของสารเคลือบที่มีต่อสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนและการนำกระแสไฟฟ้าของแผ่นโลหะเคลือบคาร์บอน/เรซินคอมพอสิต โดยใช้ผงแปรงถ่านเป็นองค์ประกอบหลักและใช้สารตัวเติมเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่างกัน ร่วมกับตัวประสานคือซิงก์เรซิน (Zinc resin) และอะคริดิกเรซิน (Acrydic resin) องค์ประกอบรวมของการเคลือบคือ ผงแปรงถ่าน เรซิน และตัวทำละลาย ร้อยละ 20 30 และ 50 ตามลำดับ โดยใช้วิธีสเปรย์ในการเคลือบผิวโลหะที่ความหนาของฟิล์มระหว่าง 0.09 ถึง 0.11 มิลลิเมตร และศึกษาท่อนาโนคาร์บอนในช่วงร้อยละ 1- 5 โดยน้ำหนักในการแทนที่ตัวทำละลาย จากผลการทดลองพบว่า การใช้ซิงก์เรซิน (Zinc resin) จะมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสต่ำกว่าอะคริดิกเรซิน (Acrydic resin) แต่ค่าการกัดกร่อนสูงกว่า ส่วนค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าลดลงเมื่อการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 0- 2 โดยน้ำหนัก การเติมท่อนาโนคาร์บอนที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง (100 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) ส่งผลให้สมบัติของฟิล์มที่เคลือบดีที่สุด เมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นทำให้สภาพนำไฟฟ้า การต้านทานการกัดกร่อนและการยึดติดของฟิล์มที่เคลือบมีแนวโน้มต่ำลงทั้งเรซิน 2 ชนิด การเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิด 100 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักในการเคลือบด้วยซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน ให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส 4 และ 35 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร และค่ากระแสกัดกร่อน 6 และ 0.5 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าให้ค่ากระแสกัดกร่อนต่ำกว่าแผ่นโลหะที่ไม่ได้เคลือบ เมื่อนำแผ่นโลหะเคลือบด้วยซิงก์เรซินไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 325.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และแผ่นโลหะเคลือบด้วยอะคริดิกเรซินให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 259 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ (395.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์

ภาควิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต จักรพงศ์ ศิริประสมทรัพย์
สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2553	

5172236123 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: BIPOLAR PLATE / CARBON COMPOSITE / STAINLESS STEEL.

JAKRAPONG SIRIPRASOMSUB: EFFECTS OF COMPOSITION OF CARBON/RESIN COMPOSITE ON COATED METAL PLATE PROPERTIES FOR PEM FUEL CELL. ADVISOR: ASSOC. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D., 84 pp.

This research was to study the effect of composition in coating layer on corrosion protection and electronically conductive of SUS 304 stainless steel coated by carbon/resin composite. The carbon base is carbon brush powder. The additive is carbon nanotubes. Zinc resin and acrydic are used as a binder. The studied parameter was amount of carbon nanotubes (CNTs) 1-5 wt% in carbon/resin composite layers. The composition of coating was 20 wt% of carbon, 30 wt% of resin and 50 wt% of solvent. The spray technique is used to coat carbon composite on the stainless steel. The results were shown that zinc resin binder gave lower interfacial contact resistance (ICR) than acrydic resin, but corrosion rate is higher. The ICR decreased when CNTs were added until 2 wt%. The addition of 3 types of CNTs, high conductivity CNTs (100 S/cm) revealed the best condition for metal coated carbon/resin composite. The corrosion resistance and adhesion of coating film had lower trend in both of resins when CNTs were added over 2 wt%. Addition of CNTs 2 wt%, the ICR at 200 lb$_f$.in tightening force was 35 and 4 mΩcm^2 when acrydic resin and zinc resin were used, respectively. Corrosion rate of zinc and acrydic resin were 6 and 0.5 μA/cm^2, respectively. When coated metal plate with zinc resin and acrydic resin were used in fuel cell, current density were 325.2 mA/cm^2 and 259 mA/cm^2, respectively. This was less than commercial graphite plate of 395.4 mA/cm^2.

Department :.....Chemical Technology..... Student's Signature..Jakrapong Siriprasomsub.

Field of Study :.....Fuel Technology..... Advisor's Signature..K. Pruksathorn

Academic Year :.....2010.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวลี พฤกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.คุณากร ภู่จินดา และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียมปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ที่ได้มอบทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ และให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้..... 2

1.4 ขั้นตอนการวิจัย..... 2

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 เทคโนโลยีไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน..... 4

2.2 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว..... 7

2.2.1 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแผ่นแกรไฟต์ที่ไม่มีรุพรุน..... 8

2.2.2 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบคอมพอสิต..... 9

2.2.3 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบโลหะ..... 11

2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม..... 16

2.3.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม..... 17

2.3.2 ธาตุและการให้คุณสมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม..... 19

2.4 คาร์บอน..... 20

2.5 ท่อนาโนคาร์บอน..... 23

2.5.1 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน..... 23

2.5.2 รูปแบบและโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน..... 25

2.5.3 สมบัติต่างๆของท่อนาโนคาร์บอน..... 28

2.6 การสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันลงบนท่อนาโนคาร์บอน..... 31

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 34

บทที่		หน้า
3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	36
	3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	36
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	36
	3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	37
	3.3.1 การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว.....	37
	3.3.2 การเคลือบผิวโดยการใช้สารยึดเกาะซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน.....	37
	3.3.3 วัดค่าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยคาร์บอนคอมพอสิต.....	38
	3.3.4 วัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน.....	40
	3.3.5 การทดสอบสมบัติเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบผิวเตรียมเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม.....	42
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	44
	4.1 การศึกษาผลของปริมาณผงแปรงถ่านในสารเคลือบต่อสมบัติของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน.....	45
	4.2 ผลของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดการนำไฟฟ้าต่ำเป็นสารตัวเติม.....	47
	4.3 ผลของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสาน.....	52
	4.4 ผลของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้ท่อนาโนคาร์ชนิดที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงเมื่อใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสาน.....	54
	4.5 ผลของการเพิ่มปริมาณผงแปรงถ่านต่อค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต.....	57
	4.6 ผลของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้ท่อนาโนคาร์ชนิดที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงเมื่อใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน.....	58

บทที่ หน้า

4.7 ผลของสมบัติการยึดติดของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้ท่อนาโนคาร์ชนิดที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงเมื่อใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน..... 62
4.8 ผลของค่าการความต้านสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้ตัวประสานที่มีการผสมกันระหว่างซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน..... 64
4.9 ผลของความหนาของการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานต่อค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อน..... 66
4.10 การทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตจากงานวิจัย..... 67
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 70
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 70
5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย..... 71
รายการอ้างอิง..... 72
ภาคผนวก..... 75
ภาคผนวก ก สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย..... 76
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ..... 80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 84

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	วัสดุคาร์บอนคอมพอสิตสำหรับใช้ผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	10
2.2	วัสดุเคลือบสำหรับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วบนแผ่นโลหะชนิดต่างๆ.....	13
2.3	กระบวนการเคลือบโลหะ.....	14
2.4	การเปรียบเทียบวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็น bipolar plate.....	15
2.5	การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆ.....	29
4.1	สมบัติของท่อนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆที่ใช้เป็นสารตัวเติม.....	54
4.2	ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ เมื่อจุ่มแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารตัวเติมที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ.....	61
4.3	ความสัมพันธ์ของค่าการความต้านสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตมีการใช้ตัวประสานที่มีการผสมกันระหว่างซิงค์เรซินและอะคริดิกเรซิน.....	64
4.4	ความสัมพันธ์ของค่าการความต้านสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตมีการใช้ตัวประสานที่มีการผสมกันระหว่างซิงค์เรซินและอะคริดิกเรซิน เมื่อมีการเติมอะคริดิกเรซินในปริมาณต่ำ....	65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ……..	5
2.2	หอเซลล์เชื้อเพลิง …….	7
2.3	แบบจำลองแสดงโครงสร้างของแกรไฟต์ ……..	21
2.4	แบบจำลองแสดงโครงสร้างของบัคกี้บอล…….....	22
2.5	ตัวอย่างแสดงโครงสร้าง resonance…….....	22
2.6	การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีตกสะสมไอเคมี.....	24
2.7	การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ…….....	24
2.8	การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีระเหยด้วยเลเซอร์.....	25
2.9	โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน.....	26
2.10	ทิศทางผลึกในโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน.....	27
2.11	Electron micrograph แสดงให้เห็นถึงท่อนาโนผนังหลายชั้น.....	28
2.12	รูปแบบต่างๆของการสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันลงบนนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว a) แบบไม่ใช้แรงจากพันธะโควาเลนต์ b) แบบสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันลงบนจุดบกพร่องบนท่อ c) แบบแต่ละจุดต่อเนื่องบนผนังท่อ d) แบบสม่ำเสมอบนผนังท่อและ e) แบบที่มีหมู่ฟังก์ชันภายในท่อ.....	32
2.13	รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่มี (A) หมู่คาร์บอกซีลิกและ (B) หมู่ 1,3-dipolar azomethine ……..…….....	33
2.14	ผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่มีการสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆต่อค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิต ……	33
3.1	การวัดค่าการกัดกร่อนของชิ้นงาน.....	40
3.2	ค่าความต้านทานเป็นความชันของกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า.....	40
3.3	การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR)……	42
3.4	การการวัดความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR)……..……..	42
4.1	ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัส และค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยสารเคลือบประกอบด้วยผงแปรงถ่าน (CB): ซิงก์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน ในอัตราส่วน 25:10:65 โดยน้ำหนักที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ…….....	45

ภาพประกอบ หน้า

4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต โดยใช้ผงแปรงถ่าน (CB) เคลือบในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน ที่โมเมนต์ทอร์กในการอัดชิ้นงานต่างๆ..... 46

4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต กับโมเมนต์ทอร์กในการอัดชิ้นงานค่าต่างๆ โดยสารเคลือบมีซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนัก..... 47

4.4 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต โดยสารเคลือบมีซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ กับโมเมนต์ทอร์กในการอัดชิ้นงาน..... 48

4.5 ความสัมพันธ์ค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต โดยสารเคลือบมีซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ..... 50

4.6 ภาพถ่ายของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์ (A) ไม่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน, (B) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักและ (C) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก..... 51

4.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตกับร้อยละของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติม โดยใช้ตัวประสานที่ต่างกันคือ ซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน..... 52

4.8 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ตัวประสานต่างชนิดกันคืออะคริดิกเรซินและซิงก์เรซิน กับร้อยละการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่โดยน้ำหนัก..... 53

4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตกับชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมในร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ..... 55

4.10 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์

ภาพประกอบ หน้า

ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตกับชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมในร้อยละการเติมโดยน้ำหนักต่างๆ..... 56

4.11 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัส ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตกับปริมาณของผงแปรงถ่านเมื่อมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนในร้อยละการเติมโดยน้ำหนักต่างๆ..... 57

4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานสัมผัสที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานกับชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมในร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ..... 59

4.13 ความสัมพันธ์ของค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยสารเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานกับชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมในร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ..... 60

4.14 ภาพถ่ายของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์ (A) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก, (B) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและ (C) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังจากการทดสอบค่าความต้านทานสัมผัสที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว..... 62

4.15 ความสัมพันธ์ของค่าแรงที่ใช้ดึงฟิลม์ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยสารเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ตัวประสานชนิดต่างๆกับการเติมท่อนาโนคาร์บอนในร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ..... 63

4.16 ความสัมพันธ์ของความหนาของการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานต่อค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อน..... 66

4.17 โพลาไรเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะ เปรียบเทียบกับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ของ Electrochem .. 67

ภาพประกอบ หน้า

4.18 โพลาไรเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานที่ความหนาในการเคลือบแผ่นโลหะและแรงอัดเซลล์ต่างกัน..... 68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมาแหล่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่ได้จากน้ำมันเชื้อเพลิง แต่ความต้องการที่เพิ่มขึ้นและแหล่งผลิตที่มีอยู่จำกัดทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำมัน จากเหตุดังกล่าวจึงได้มีการค้นคว้าและพัฒนาแหล่งพลังงานเพื่อทดแทนพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งทางเลือกหนึ่งก็คือพลังงานไฮโดรเจนซึ่งเป็นพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเซลล์เชื้อเพลิงเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการแปลงพลังงานจากไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ากับออกซิเจน สมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงมีลักษณะคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่มีการออกแบบมาให้มีการเติมสารตั้งต้นเข้าสู่ระบบตลอดเวลาทำให้ ช่วยขจัดปัญหาความจุที่จำกัดของแบตเตอรี่ออกไป

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม (Proton Exchange Membrane fuel cell) เมื่อแก๊สไฮโดรเจนผ่านเข้าทางช่องทางเข้า แก๊สไฮโดรเจนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดได้เป็นอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนผ่านตัวนำไฟฟ้าและโปรตอนเคลื่อนตัวผ่านแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนที่เป็นแผ่นพอลิเมอร์ไปเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ขั้วแคโทดโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการรวมตัว เกิดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำ ไฟฟ้าและความร้อน จึงถือเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงประมาณร้อยละ 40-50 มากกว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ชนิดเผาไหม้ภายในและสามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ [1, 2]

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาทางด้านวิศวกรรมและวัสดุทำให้เซลล์เชื้อเพลิงสามารถเพิ่มความหนาแน่นกำลัง (power density) ให้ถึงระดับหน่วยชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel-Cell Stack) มีขนาดเล็กแต่ยังสามารถให้กำลังได้สูง การเพิ่มกำลังของเซลล์เชื้อเพลิงทำโดยนำแต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมกันเชื่อมด้วยแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์หนึ่งไปสู่อีกเซลล์หนึ่ง นอกจากนี้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าเป็นส่วนที่กำหนดปริมาตร น้ำหนัก (แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนี้คิดเป็นร้อยละ 80 โดยน้ำหนักจากน้ำหนักทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิง) และราคาของเซลล์เชื้อเพลิง วัสดุที่นิยมใช้ทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วคือแกรไฟต์ เนื่องจากมีความเสถียรทางเคมีและมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง ซึ่งการนำไฟฟ้าที่ดีนี้จะทำให้ลดความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงและเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ได้รับ แต่แกรไฟต์มีข้อเสียทางด้านความเปราะ เมื่อได้รับแรงอัดขณะประกอบเป็นเซลล์จะแตกหักง่าย และยังมีกระบวนการขึ้นรูปที่ยุ่งยากทำให้มีราคาสูง [3] ดังนั้นจึงมีการหันมาใช้

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะมากขึ้น เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่าย ราคาถูกกว่าแบบแกรไฟต์ รวมถึงมีสมบัติเชิงกลและการนำกระแสไฟฟ้าที่ดี แต่จะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายเนื่องจากภายในเซลล์มีสภาพเป็นกรด จึงมีการศึกษาทางด้านการเคลือบผิวแผ่นโลหะด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเพื่อลดปัญหาการกัดกร่อน อย่างไรก็ตาม การเคลือบที่ภาวะไม่เหมาะสมยังเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนและสภาพนำกระแสไฟฟ้ายังต่ำกว่าแกรไฟต์ [4] จึงควรมีการศึกษาพัฒนาองค์ประกอบของคาร์บอนคอมพอสิตให้มีความเหมาะสมมากขึ้น เช่น การเติมท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes, CNTs) ผสมกับผงคาร์บอน ทำให้เกิดการทำงานร่วมกัน (synergistic) ทางด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนและการนำไฟฟ้าที่ดีของแผ่นคาร์บอนคอมพอสิต [5]

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลขององค์ประกอบของสารเคลือบที่มีต่อสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนและความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นโลหะเคลือบคาร์บอน/เรซินคอมพอสิต

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมแผ่นโลหะเคลือบด้วยคาร์บอน/เรซินคอมพอสิตสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
2. ศึกษาผลขององค์ประกอบของคาร์บอน/เรซินคอมพอสิตที่มีต่อสมบัติการนำไฟฟ้าและความต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

1. สามารถพัฒนาแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม
2. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ศึกษาวิธีการและวางแผนการทดลอง เพื่อเป็นแนวทางในการทำการทดลองที่มีขั้นตอนเหมาะสมและไม่เกิดอันตราย
2. เตรียมสารเคมี
3. เตรียมอุปกรณ์สำหรับวัดความต้านทานไฟฟ้าและการกัดกร่อนของแผ่นโลหะเคลือบ
4. ศึกษาการเตรียมแผ่นโลหะ โดยการเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต โดยวิธีฉีดพ่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ศึกษาปัจจัยในองค์ประกอบของสารเคลือบที่มีผลต่อการเตรียมแผ่นโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต โดยศึกษาตัวแปรดังนี้
    - ปริมาณและชนิดของท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) ที่ใช้เป็นสารตัวเติม
    - อัตราส่วนที่เหมาะสมของคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนและเรซิน
    - ชนิดตัวประสาน (Binder)
6. นำชิ้นงานที่เตรียมได้ ไปวิเคราะห์สภาพนำกระแสไฟฟ้าและการกัดกร่อน
7. ทดสอบสมรรถนะการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง
8. วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง
9. เขียนวิทยานิพนธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

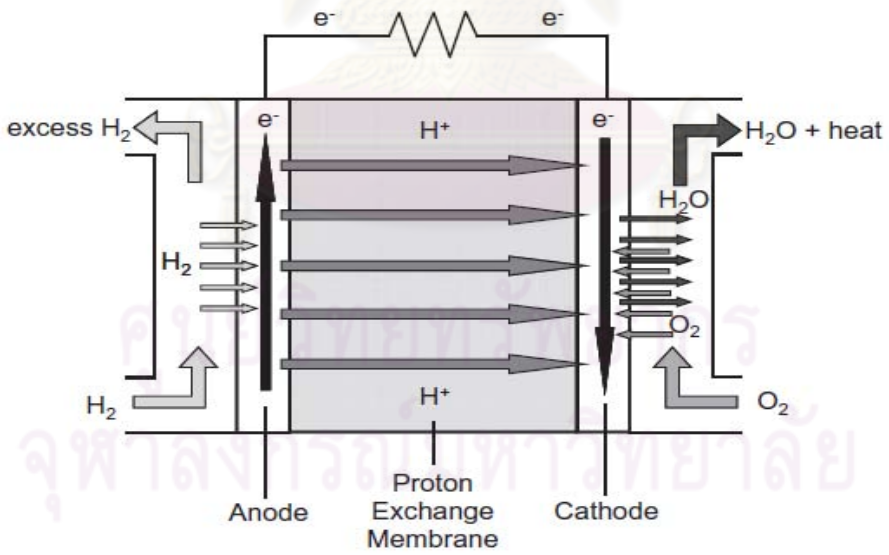
2.1 เทคโนโลยีไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (พีอีเอ็ม)

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุดและพบได้มากที่สุด เมื่อนำมาใช้ในรูปแบบของพลังงานซึ่งไม่มีอะตอมคาร์บอนเลยจึงไม่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา แต่ไฮโดรเจนนั้นไม่ปรากฏตามธรรมชาติในรูปที่แยกตัวเป็นอิสระจึงจำเป็นต้องนำมาแยกด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบของน้ำซึ่งเป็นสารประกอบที่อยู่ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิดและมีคุณสมบัติสามารถทำปฏิกิริยากับธาตุอื่นๆ ได้ โดยปกติแล้วในอุตสาหกรรมมีการผลิตไฮโดรเจนเป็นปริมาณมากในโลกเพื่อใช้ในการผลิตแอมโมเนียเพื่อทำเป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตรหรือใช้ในอุตสาหกรรม ส่วนทางปิโตรเคมีเพื่อผลิตพอลิพรอพิลีน (Polypropylene) แต่น้อยมากที่ไฮโดรเจนได้ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทั้งที่จริงแล้วเป็นเชื้อเพลิงประสิทธิภาพสูง โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานของไฮโดรเจนกับน้ำมันพบว่ามีค่าพลังงานมากกว่าประมาณ 3 เท่าตัวและมากกว่าถ่านหินถึง 4 เท่า [6] ซึ่งในปัจจุบันรถยนต์ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งประสิทธิภาพในการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำมากเพราะพลังงานความร้อนของเครื่องยนต์จะสูญเสียไปกับไอเสีย ระบบระบายความร้อนและจะต้องสูญเสียไปกับปั๊มน้ำ พัดลม ประสิทธิภาพรวมได้ประมาณ 20 % เท่านั้น นอกจากนั้นยังก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเพราะทำให้เกิดแก๊สพิษ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นต้น ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้งานอย่างจริงจังโดยใช้เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง ขณะนี้หน่วยงานทั่วโลกทั้งภาครัฐและภาคเอกชนได้ให้ความสนใจและร่วมลงทุนในการเตรียมพร้อมสำหรับการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงเข้าสู่ตลาดพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดและไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงนับได้ว่าเทคโนโลยีนี้อาจเข้ามามีบทบาทอย่างมากในอนาคตต่อการพัฒนาพลังงานรูปแบบใหม่ขึ้นใช้เองในประเทศเพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้ [7]

- ลดปริมาณการนำเข้าและใช้เชื้อเพลิงจำพวกน้ำมันและถ่านหิน
- ส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน
- ลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาพลังงานที่ต้องนำเข้า
- ลดปัญหามลพิษทางอากาศ น้ำ รวมถึง ปรากฏการณ์เรือนกระจก (green house effect) เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจนซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยไม่ต้องผ่านการเผาไหม้ คุณสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีลักษณะคล้ายกับแบตเตอรี่แต่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้โดยตรง โดยไม่ต้องนำมาอัดประจุใหม่และใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยเชื้อเพลิง ออกซิเจน อิเล็กโทรไลต์ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ในการทำงานของเซลล์มีขั้นตอนคือไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนดและออกซิเจนจากอากาศ จะจับไฮโดรเจนไอออนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์มายังแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันดังแสดงในรูปที่ 2.1 อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะไหลเวียนทำให้เกิดพลังงานซึ่งพลังงานจะถูกส่งไปยังเครื่องยนต์โดยผ่านทางขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว และผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงนี้คือความร้อนและน้ำเท่านั้น จึงถือเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane fuel cells) ถูกคาดหมายว่าเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ดีที่สุดที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับยานพาหนะต่างๆ แทนที่เครื่องยนต์แบบแก๊สโซลีนหรือดีเซลที่เป็นระบบการเผาไหม้ภายใน เนื่องจากให้ความหนาแน่นของพลังงานสูง มีการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันถูกพัฒนาและจำลองระบบการใช้งานที่ให้พลังงานได้ในช่วง 1-2,000 วัตต์



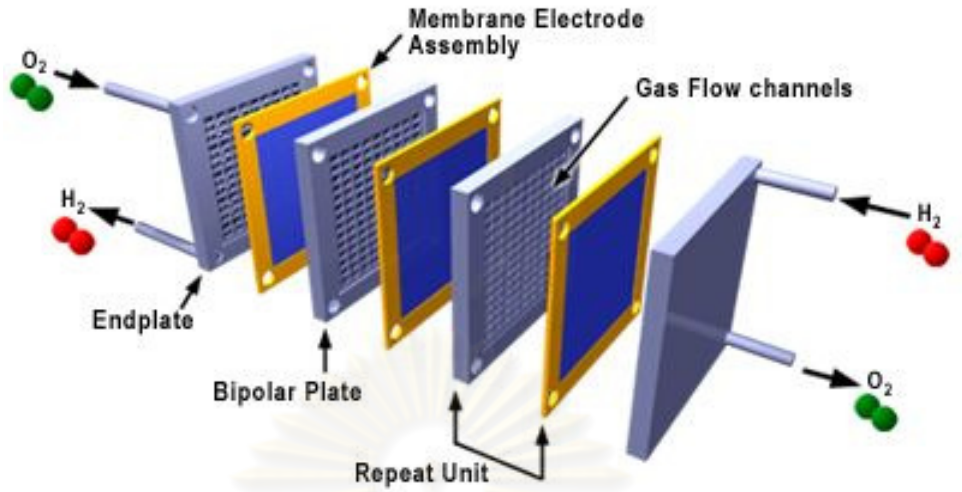
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM [8]

ส่วนประกอบสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม แบ่งได้ดังนี้

- แอโนด (anode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุลบกับเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าสำคัญคือ ส่งผ่านประจุอิเล็กตรอนหรือประจุไฟฟ้าลบออกไปทางขั้วไฟฟ้าเมื่อต่อสายไฟกับขั้วไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าจะไหลออกไปทางนี้ ส่วนไฮโดรเจนที่ถูกดึงอิเล็กตรอนออกไปจะแสดงประจุบวก เรียกว่า โปรตอน และถูกแรงดันของก๊าซอัดผ่านเซลล์ PEM ไปยังตัวคะตะลิสต์ (ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี)
- แคโทด (cathode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่รับประจุลบมาจากขั้วแอโนด มีหน้าที่สำคัญคือ ต่อเข้ากับสายไฟภายนอก รับอิเล็กตรอนเข้ามา รวมเข้ากับอะตอมของออกซิเจนกับไฮโดรเจน ทำปฏิกิริยาภายในคะตะลิสต์กลายเป็นโมเลกุลของน้ำ
- Polymer Electrolyte Membrane (PEM) คือ ตัวอิเล็กโทรไลต์ทำจากวัสดุคล้ายกับแผ่นพลาสติก โดยมีหน้าที่สำคัญคือยอมให้ประจุบวกหรือโปรตอนเคลื่อนที่ผ่านเท่านั้นและไม่ยอมให้ประจุลบหรืออิเล็กตรอนและแก๊สผ่านไปได้
- ตัวเร่งปฏิกิริยา มีหน้าที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ผงแพลทินัม (Platinum) ทำเป็นฟิลม์บางเคลือบอยู่บนกระดาษคาร์บอนหรือแผ่นผ้า คะตะลิสต์จึงมีลักษณะเป็นรูพรุนๆ ด้วยคุณลักษณะพิเศษนี้ ก็เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวที่ทำปฏิกิริยาให้มากที่สุด ตัวเร่งปฏิกิริยามีอยู่ทั้งสองด้านของ PEM

เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนจะสามารถผลิตพลังงานได้มากกว่าโดยเทียบจากปริมาตรหรือน้ำหนักของตัวเซลล์ ซึ่งข้อดีทางด้านการให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงนี้ทำให้เวลานำไปใช้งานสามารถทำให้ระบบเบาและมีขนาดเล็กกว่าระบบอื่น นอกจากนั้นการดำเนินการของระบบที่อุณหภูมิต่ำยังทำให้เวลาที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ส่วนข้อดีอีกอย่างหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือการใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งเพราะสามารถป้องกันการไหลรวมกันของแก๊สทั้งฝั่งแอโนดและแคโทดได้ง่ายกว่ากรณีที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลว และยังไม่มีปัญหาที่เกิดจากการกัดกร่อนจึงทำให้การใช้งานเซลล์ยาวนานกว่าการใช้อิเล็กโทรไลต์ในรูปแบบอื่นๆ

ในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สามารถทำได้โดยนำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน (Fuel cell stack) โดยใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมาเชื่อมต่อระหว่างเซลล์เดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หอเซลล์เชื้อเพลิง (stack component of fuel cell) [9]

โดยแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วมีหน้าที่หลักคือ กระจายเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ภายในเซลล์ จัดการน้ำภายในเซลล์ นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์ต่อเซลล์ กำจัดความร้อนออกจากพื้นที่ทำปฏิกิริยาและป้องกันการรั่วไหลของแก๊สและสารหล่อเย็น ดังนั้นการนำวัสดุมาใช้ผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วต้องมีสมบัติดังนี้คือนำกระแสไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี แก๊สไม่สามารถซึมผ่านได้ มีความแข็งแรงต่อการบีบอัด ทนต่อปฏิกิริยาเคมีและไม่มีสารเป็นพิษต่อเยื่อแผ่นพอลิเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยา ราคาถูกใช้วัสดุที่หาง่ายและสามารถขึ้นรูป (Machine) ได้ง่าย [10]

2.2 **แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว** (Bipolar plate)

แผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว มีบทบาทมากมายในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม โดยจะเป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบภายในแผ่นเดียว หน้าที่หลักของแผ่นนำกระแสแบบสองขั้ว ได้แก่

- กระจายแก๊สเชื้อเพลิงและสารออกซิไดซ์ภายในเซลล์
- จัดการระบบน้ำเข้า-ออก ภายในเซลล์
- แยกเซลล์แต่ละเซลล์ภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง
- นำกระแสไฟฟ้าออกจากเซลล์
- จัดการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์

การเตรียมวัสดุเพื่อใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของความทนทานต่อสารเคมี ความทนทานต่อการกัดกร่อน ค่าการนำกระแสไฟฟ้าสูง การแพร่ผ่านของแก๊สหรือความสามารถในการให้แก๊สซึมผ่านมีค่าต่ำ ขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อนซึ่งจะเชื่อมโยงกับราคาและค่าการนำความร้อนที่ดี จึงมีค่ามาตรฐานของวัสดุที่จะใช้ทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วดังนี้ [9]

Electrical conductivity : plate resistance	$<10\ m\Omega cm^2$
In-plane electrical conductivity	>100 S/cm
Thermal conductivity	$>10\ W(mK)^{-1}$
Gas permeability	$<10^{-4}\ cm^3cm^{-2}s^{-1}$
Flexural Strength	> 59 MPa
Tensile Strength	> 41 MPa
Corrosion resistance (pH<4)	$< 16\ \mu Acm^{-2}$

โดยสมบัติต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่จะนำมาสร้าง และกระบวนการหรือวิธีการในการสร้าง ชนิดของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบ่งได้ตามวัสดุที่ใช้ดังนี้

2.2.1 **แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแผ่นแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน** (Non-porous graphite plate) [12]

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วชนิดนี้ทำมาจากของผสมแกรไฟต์ที่ประกอบด้วยแกรไฟต์ที่เป็นผลึก (Crystalline graphite) ที่มีสารเติมแต่ง (Additive) และตัวประสาน (Binder) มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) แล้วนำไปให้ความร้อน (Heat treatment) ในภาวะที่ปราศจากแก๊สออกซิเจน สารเติมแต่งที่เหมาะสมในการทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วของแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน (Non-porous graphite bipolar plate) ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) เซอร์คอนไดออกไซด์ (Zircon dioxide) ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) และ ผงถ่านหิน (Powdered coke)

ตัวประสานที่ใช้ในการทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วของแกรไฟต์ที่ไม่มีรูพรุน ได้แก่ ถ่านหินที่ได้จากอุณหภูมิ 300-800 องศาเซลเซียส คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) เช่น ฟรักโตส

(Fructose) กลูโคส (Glucose) กาแลกโตส (Galactose) และแมนโนส (Mannose) โอลิโกแซคาไรด์ (Oligosacchacaride) เช่น ซูโครส (Sucrose) มอลโตส (Maltose) และแลกโตส (Lactose)

การเลือกแกรไฟต์มาใช้เนื่องจากนำกระแสไฟฟ้าได้ดีและมีความหนาแน่นต่ำ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของแกรไฟต์คือ การขึ้นรูปยากและมีราคาแพง ดังนั้นจึงมีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวัสดุทดแทนแกรไฟต์ โดยอาศัยสมบัติของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วดังกล่าวข้างต้น

2.2.2 **แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบคอมพอสิต** (Composite plate) [12-13]

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วที่ทำจากแกรไฟต์มีสมบัติเด่นคือ สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าน้อยมาก แต่ข้อเสียของแกรไฟต์คือขึ้นรูปค่อนข้างยากเนื่องจากมีความเปราะอีกทั้งยังมีราคาสูง สำหรับวัสดุที่เรียกว่าวัสดุผสม (composite material) ก็คือวัสดุที่เกิดจากการนำเอาวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาผสมรวมกันเพื่อนำไปใช้ในการสร้าง สาเหตุที่ต้องมีการนำวัสดุมารวมกันนั้นก็เพราะสมบัติหรือข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน แต่เมื่อนำมารวมกันแล้ว ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติที่ดีขึ้นเหมาะสมในการนำมาสร้างเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว โดยการผสมนั้นจะต้องทำในสัดส่วนและวิธีการที่เหมาะสมกลายเป็นวัสดุคาร์บอนคอมพอสิตที่มีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น ซึ่งแบ่งตามวัสดุที่ใช้ดังนี้

2.2.2.1 **ชนิดที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบหลัก**

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วชนิดที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบหลักได้รับการพัฒนาโดย Los Alamos National Laboratory ซึ่งใช้ แกรไฟต์ที่มีรูพรุน (Porous graphite) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) และเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เนื่องจากแกรไฟต์สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ เหล็กกล้าไร้สนิมแก๊สไม่สามารถแพร่ผ่านได้และมีความแข็ง พอลิคาร์บอเนตทนต่อสารเคมีและสามารถขึ้นรูปได้หลากหลาย โดยกระบวนการทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว เริ่มจากเตรียมชั้นของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel layer) โดยการตัด (Shearing) หรือการกด (Stamping) จากนั้นนำแกรไฟต์ที่มีรูพรุนและพอลิคาร์บอเนตผสมกันในเครื่องผสมและขึ้นรูปด้วยเทคนิคอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding) หรือการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) นำแผ่นคอมพอสิตที่ได้ไปอบในเตาอบจากนั้นนำสารเกาะติดที่นำกระแสไฟฟ้า (Conductive adhesive) ให้ติดอยู่บนแผ่นคอมพอสิตด้วยวิธีการพิมพ์สกรีน (Screen-print method) นำชั้นของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เตรียมได้จากวิธีข้างต้นมาเชื่อมติดกับแผ่นคอมพอสิตด้วยกระบวนการอัดด้วยความร้อน (Hot-press)

ข้อเสียของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วชนิดที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบหลักคือต้องใช้กระบวนการหลายขั้นตอนในการทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว

2.2.2.2 ชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักใช้เทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Poly vinylidene fluoride) หรือเรซินของเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolics resin) อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) และ ไวนิลเอสเทอร์เรซิน (Vinyl ester resin) ผสมกับสารเติมแต่งซึ่งอาจเสริมแรงด้วยเส้นใย วัสดุที่นำมาใช้ทำคาร์บอนคอมพอสิต (Carbon composites) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1. วัสดุคาร์บอนคอมพอสิตสำหรับใช้ผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [3]

เรซิน	สารเติมแต่ง	เส้นใย
พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์	อนุภาคคาร์บอน/แกรไฟต์	-
พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์	อนุภาคคาร์บอน/แกรไฟต์	เส้นใยคาร์บอน/แกรไฟต์
ของผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและสารแอโรแมติกทำให้แข็ง	ผงแกรไฟต์	-
ฟีนิล-แอลดีไฮด์ รีซอล หรือ ฟีนิล-แอลดีไฮด์ โนโวแลก	ผงแกรไฟต์	เส้นใยแกรไฟต์ หรือ วิสเกอร์
ฟีนิล-แอลดีไฮด์ รีซอล หรือ ฟีนิล-แอลดีไฮด์ โนโวแลก	อนุภาคถ่านหิน-แกรไฟต์	-
Reichhold 24-655 ฟีนอลิกเรซิน	ผงแกรไฟต์	เส้นใยเซลลูโลส (ไม่ใช่เส้นใยเรยอง และเซลลูโลสอะซิเตท)
ฟีนอลิกเรซินฟูแรนเรซิน	ผงแกรไฟต์	เส้นใยเซลลูโลส (ไม่ใช่เส้นใยเรยอง และเซลลูโลสอะซิเตท)
ฟีนอลิกเรซิน		เส้นใยคาร์บอน (PAN-Based)
ไวนิลเอสเทอร์	ผงแกรไฟต์	คอทตอนฟล็อก (เส้นใยแกรไฟต์/คาร์บอน) เส้นใยแก้ว เส้นใยคอทตอน และพอลิเมอร์

ข้อดีของวัสดุคอมพอสิต

- ความแข็งแรงจำเพาะสูง เนื่องจากน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ
- ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุได้
- มีสมบัติหลากหลาย สามารถสร้างให้มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน
- ต้านทานการสึกหรอได้ดี อายุการใช้งานยาวนาน
- ทนทานต่อการล้าตัวได้ดี
- มีความเสถียรด้านรูปร่างสูง เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางด้านความร้อนต่ำ

ข้อเสียของวัสดุคอมพอสิต

- ต้นทุนด้านเครื่องมือการผลิตสูง
- สมบัติในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน เนื่องจากในตัวของวัสดุมีองค์ประกอบของสารหลายชนิด เช่น ส่วนเสริมแรงซึ่งเป็นวัสดุที่ทำให้คอมพอสิตมีความแข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase)
- เชื่อมติดกับวัสดุอื่นยาก เป็นผลมาจากองค์ประกอบภายในของวัสดุที่แตกต่างกัน
- การตรวจวิเคราะห์สมบัติค่อนข้างยาก
- การหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ยาก

อย่างไรก็ตาม วัสดุคอมพอสิตที่นำมาผลิตแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองแบบสองขั้วนั้น ไม่มีวัสดุชนิดใดที่จะเป็นไปตามเกณฑ์ของค่ามาตรฐานวัสดุที่จะใช้ทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วทั้งหมด จึงยังคงต้องมีการปรับปรุงต่อไป

2.2.3 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแบบโลหะ

การนำโลหะมาทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วเนื่องจากโลหะนำกระแสไฟฟ้าและความร้อนได้ดี แก๊สซึมผ่านเนื้อโลหะได้ยาก สามารถผลิตได้ในปริมาณมากในราคาถูกและให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตรสูง สำหรับข้อจำกัดของโลหะคือ ในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีภาวะเป็นกรดสูง มีผลให้เกิดการป้องกันตัวเองของโลหะโดยจะเกิดฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวโลหะเพื่อลดการกัดกร่อนของตัวโลหะ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “แพสสิเวชัน (Passivation)” ตัวอย่างของโลหะที่เกิดแพสสิเวชันได้ง่ายเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless) นิกเกิล (Nickel) ไทเทเนียม (Titanium) อะลูมิเนียม (Aluminium) และโลหะผสม (Alloy) ตัวอย่างของชั้นป้องกันที่อาจเกิดขึ้นได้แก่ ออกไซด์

ของโลหะและออกไซด์ของโลหะผสม เป็นต้น ซึ่งมีผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะสูงขึ้น ดังนั้น เพื่อให้เหมาะสมสำหรับใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง โลหะที่นำมาทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วต้องผ่านกระบวนการเคลือบโลหะ (Coating) ก่อน โดยวัสดุและกระบวนการที่ใช้เคลือบแสดงดังตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 วัสดุเคลือบสำหรับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วบนแผ่นโลหะชนิดต่างๆ [3]

ชนิดการเคลือบ (Coating types)	วัสดุที่ใช้เคลือบ (Coating materials)	วัสดุที่เป็นฐานในการเคลือบผิว			
		Al	SS	Ti	Ni
การเคลือบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า	พอลิเมอร์นำกระแสไฟฟ้า	ไม่ระบุ			
การเคลือบคาร์บอนคล้ายเพชร	คาร์บอนคล้ายเพชร	ไม่ระบุ			
การเคลือบชั้นบนด้วยทอง	ทองแดงเคลือบด้วยนิกเกิลและทองตามลำดับ	X			
การเคลือบด้วยฟอยล์แกรไฟต์	(1) ผิวชั้นล่าง-อนุภาคแกรไฟต์ถูกกระตุ้นด้วยเสียงในอิมัลชัน สารแขวนลอย หรือสี (เช่น อนุภาคแกรไฟต์ในอีพ็อกซีเรซินถูกทำให้บางลงด้วยสารละลายอินทรีย์ เช่น โทลูอีน) (2) การหลุดลอกของชั้นบนแกรไฟต์ในรูปของแผ่นที่ยืดหยุ่นและฟอยล์แกรไฟต์	X		X	X
การเคลือบชั้นบนด้วยแกรไฟต์	(1) ผิวชั้นล่าง-ไทเทเนียมเคลือบบนไทเทเนียม-อะลูมิเนียม-ไนไตรล์ (2a) ชั้นบน-ชั่วคราว ของชั้นโลหะของโครเมียม ที่คลุมอยู่ชั่วคราว (ไทเทเนียม นิกเกิล เหล็กและโคบอลต์) ตามด้วยกรดซัลฟุริก/กรดโครมิก หรือ(2b) ชั้นบน-แกรไฟต์	X	X	X	X
การเคลือบอินเดียมที่ถูกโด๊ปด้วยทินออกไซด์	อินเดียมถูกโด๊ปด้วยทินออกไซด์ ($Sn(In)O_2$)		X		
การเคลือบด้วยเลดออกไซด์ การเคลือบด้วยมอนอพอลิเมอร์อินทรีย์	(1) ผิวชั้นล่าง- เลด; (2) ผิวด้านบน- เลดออกไซด์ (PbO/PbO_2)สารอินทรีย์ที่ทำหน้าที่คล้ายมอนอพอลิเมอร์	ไม่ระบุ	X		
การเคลือบด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์	(1) n-Type ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC); (2) ทอง		X		
การเคลือบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม	(1) ผิวชั้นล่าง- โครเมียม/นิกเกิล/โมลิบดินัม-เหล็กกล้าไร้สนิมมากเกินพอ หรือ นิกเกิล-ฟอสฟอรัส อัลลอยด์ (2) ผิวชั้นบน-ไทเทเนียมไนไตรล์	X	X	X	
การเคลือบไทเทเนียม-อะลูมิเนียม-ไนไตรล์	ชั้นของไทเทเนียม-อะลูมิเนียม	X			
การเคลือบไทเทเนียม-ไนไตรล์	ชั้นของไทเทเนียม-ไนไตรล์ (TiN)			X	

ตารางที่ 2.3 กระบวนการเคลือบโลหะ (Coating process for metallic plates) [3]

ชนิดการเคลือบ (Coating types)	กระบวนการเคลือบ (Coating process)
การเคลือบผิวชั้นบนด้วยทอง	การเกาะติดด้วยกระแสไฟฟ้า
การเคลือบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม	การพอกพูนทางกายภาพด้วยไอ (Physical vapor deposition, PVD) ตัวอย่างเช่น การฉาบโลหะด้วยแมกนีตรอน หรือ การพอกพูนทางเคมีด้วยไอ (chemical vapor deposition, CVD) และการพอกพูนโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า (electroless deposition) สำหรับ Ni -P alloy
การเคลือบผิวชั้นบนด้วยแกรไฟต์	PVD
การเคลือบชั้นบนด้วยแกรไฟต์	PVD (closed-field, unbalance, magnetron sputter ion plating) และ การเคลือบสารเคมีด้วยเทคนิค anodization/oxidation
การเคลือบด้วยแกรไฟต์ฟอยล์	การทาหรือการกด
การเคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรล์	RF-ไดโอด สปัตเตอร์ริง
การเคลือบด้วยอินเดียมที่ถูกโด๊ปด้วยทินออกไซด์	การกลายเป็นไอของลำแสงอิเล็กตรอน
การเคลือบด้วยเลดออกไซด์	การสลายตัวด้วยไอและการสปัตเตอร์ริง
การเคลือบด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์	การสลายของประจุและการสลายของไอ
การเคลือบด้วยไทเทเนียม-อะลูมิเนียม-ไนไตรล์	RF-พานาร์เมกนีตรอน (สปัตเตอร์ริง)

โลหะที่ได้รับความสนใจนำมาทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว เช่น ไทเทเนียม สแตนเลสสตีล และอะลูมิเนียม สำหรับสแตนเลสสตีลมีการศึกษาและลองใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงทั้งแบบเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว

การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วทั้งสามชนิดที่ได้กล่าวมานั้น แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็น bipolar plate [14]

วัสดุ	สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	ข้อดี	ข้อเสีย
แกรไฟต์ (คาร์บอน- คาร์บอน)	200-300	- มีความเสถียร - ความหนาแน่นจำเพาะต่ำ - ความต้านทานสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าต่ำ - ความต้านทานการกัดกร่อนสูง	- ราคาแพง - เปราะ - มีความหนา
คอมพอสิต	50-200	- ความหนาแน่นต่ำ - อายุการใช้งานยาวนาน - มีสมบัติหลากหลาย	- ใช้เครื่องมือในการผลิตที่ซับซ้อน - สมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน - นำกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้
โลหะ	~$5.5x10^5$	- ค่าการนำความร้อนสูง - สามารถรีไซเคิลได้ - ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ	- ต้องการการเคลือบที่ทนการกัดกร่อนได้ - เป็นพิษต่อเยื่อแลกเปลี่ยน - เกิดฉนวนออกไซด์ที่พื้นผิว

จากข้อดี-ข้อเสียของแกรไฟต์ และโลหะนี้ จึงได้มีการวิจัยเพื่อที่จะพัฒนาและปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว ซึ่งแกรไฟต์มีข้อเสียทางด้านความเปราะ เมื่อได้รับแรงอัดขณะประกอบเป็นเซลล์จะแตกหักง่าย และยังมีกระบวนการขึ้นรูปที่ยุ่งยากทำให้มีราคาสูง ทำให้มีการหันมาใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะมากขึ้น เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่าย ราคาถูกกว่าแบบแกรไฟต์รวมถึงมีสมบัติเชิงกลและการนำกระแสไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากการใช้โลหะเป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วจะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายเนื่องจากภายในเซลล์มีสภาพเป็นกรด จึงมีการศึกษาทางด้านการเคลือบผิวแผ่นโลหะด้วยคอมพอสิตคาร์บอนเพื่อลดปัญหาการกัดกร่อน อย่างไรก็ตาม การเคลือบที่ภาวะไม่เหมาะสมยังเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนและค่าการนำกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าแกรไฟต์ [4] จึงมีการศึกษาพัฒนาองค์ประกอบของคาร์บอนคอมพอสิตให้มีความเหมาะสมมากขึ้น เช่น การเติมท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes, CNTs) ผสมกับผงคาร์บอนทำให้เกิดการทำงานร่วมกัน (synergistic) ทางด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนและการนำกระแสไฟฟ้าที่ดี [5] มาเคลือบผิวแผ่นโลหะ เพื่อที่จะสามารถนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.3 **เหล็กกล้าไร้สนิม** (Stainless Steel) [15]

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) นั้น ในทางโลหกรรมถือว่าเป็นโลหะผสมเหล็ก ที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุดร้อยละ 10.5 เนื่องจากโลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดเป็นฟิล์มบางๆ เคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมได้เป็นอย่างดี ปกป้องการเกิดการกัดกร่อน (Corrosion) และไม่ชำรุดหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป โดยแรกเริ่มเหล็กกล้าไร้สนิมได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาผลิตเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ในเวลาต่อมาได้มีการแพร่ขยายอย่างกว้างขวางครอบคลุมจนถึงชนิดและสมบัติหรือเกรดของเหล็กที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องสมบัติของความทนต่อการกัดกร่อน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจนกับสารอื่นอันเนื่องมาจากการใช้งานหรือสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

ปกติเหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่เป็นสนิมเพราะที่ผิวจะมีฟิล์มโครเมียมออกไซด์บางๆ เคลือบอยู่ การทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นสนิมคือ ฟิล์มโครเมียมออกไซด์ที่เคลือบผิวถูกทำลายออกไปในภาวะที่สามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น ถ้าเหล็กกล้าไร้สนิมถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรอยนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็กก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้

ข้อดีเนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมคือโลหะผสมที่มีความคงทนต่อการกัดกร่อน ดังนั้นจึงมีอายุการใช้งานยาว นานหลายทศวรรษที่ผ่านมา มากกว่าร้อยละ 90 ของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีขบวนการผลิตโดยนำเอาเศษโลหะที่ได้จากการรีไซเคิลมา ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หรืออาจกล่าวได้ว่าอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมขึ้นอยู่กับการรีไซเคิลก็ว่าได้ ถึงแม้ว่าราคาของเหล็กกล้าไร้สนิมจะค่อนข้างสูงในช่วงแรกๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวัฏจักรของต้นทุนในการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นให้ประโยชน์และผลกำไรมากกว่าวัตถุดิบประเภทอื่นๆ ดังตัวอย่าง เช่น มีความคงทนสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) หรือมีความแข็งแรงทนทานดีกว่า ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากสารโพลิเมอร์ (Polymer) อย่าง GRP นอกจากนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมยังมีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์อีกมากมาย ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม

2.3.1 **ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม** (Stainless Steel)

แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความโดดเด่นในเรื่องของความทนทานต่อการเป็นสนิมและการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติหรือที่มนุษย์สร้างขึ้นก็ตาม เราก็ยังจำเป็นที่จะต้องเลือกประเภทและคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างถูกต้องเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เนื่องจากมีอยู่หลายประเภทด้วยกันซึ่งแต่ละประเภทก็จะถูกนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป

การแบ่งแยกหรือจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการเพิ่มหรือลดจำนวนของส่วนผสมที่เป็นธาตุแต่ละตัว ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มนิกเกิล (Nickel) จะช่วยทำให้โครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenitic) ของเหล็กมีความมั่นคงยิ่งขึ้น จึงจัดว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทที่มีจำนวนนิกเกิล (Nickel) สูงจะมีโอกาสของการไม่เกิดเป็นแม่เหล็กเจือปนสูงตามไปด้วย ในขณะที่การเพิ่มคาร์บอน (Carbon) จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน อย่างไรก็ตามเราสามารถลดต้นทุนด้วยการเพิ่มแมงกานีส (Manganese) แทนนิกเกิล (Nickel) ซึ่งมีราคาสูงกว่า เพื่อให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีสมบัติดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้เช่นกัน

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) สามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่

1. เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกที่มีคุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก (Austenitic non-magnetic) ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ว่าจะเริ่มจากเครื่องมือเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารจนกระทั่งถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีคุณสมบัติที่มีความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มและการกัดกร่อนในที่อับ (Chloride pitting and Crevice corrosion) ส่วนใหญ่จะนิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้เนื่องจากมีคุณสมบัติสูง ธาตุประกอบสำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ประกอบ ด้วย 3 ธาตุ คือ คาร์บอน (Carbon) โครเมียม (Chromium) และนิกเกิล (Nickel) หรือแมงกานีส (Manganese) ถ้าต้องการคุณสมบัติของความคงทนและทนทานต่อการกัดกร่อนสูงๆ ออสเทนนิติก (Austenitic) หรือมากกว่าสามารถทำได้โดยการเพิ่มส่วนผสมของโมลิบดินัม (Molybdenum) ไนโตรเจน (Nitrogen) และนิกเกิล (Nickel) ให้มากขึ้น ดังนั้น จากออสเทนนิติก (Austenitic) ก็จะกลายเป็น “ซุปเปอร์ออสเทนนิติก” (Superaustenitic) ก็หมายถึงราคาที่สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้น ดูเพล็กซ์ (Duplex Steels) จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือก สำหรับผู้ที่ต้องการเหล็กกล้าไร้สนิมที่มี คุณสมบัติสูง แต่มีราคาที่ถูกกว่า เนื่องจากสมบัติของดูเพล็กซ์ (Duplex) นั้นมีความคล้ายคลึงกับออสเทนนิติกที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมมีดังนี้

- 304

  เป็นเกรดที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกเมื่อเทียบกับคุณภาพ โดยมีโครเมียมร้อยละ 18 และนิกเกิลร้อยละ 8 เป็นส่วนผสมโดยประมาณ มีคุณสมบัติดังนี้ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี สามารถขึ้นรูปเย็นและเชื่อมได้ดี ตัวอย่างการใช้งานคือเป็นอุปกรณ์ในกระบวนการเคมี ใช้งานในชีวิตประจำวัน และอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เช่น เครื่องใช้ในบ้าน ภาชนะเครื่องครัว เครื่องหุงต้มความดัน แทงค์น้ำ อ่าง ช้อน ส้อม และงานตกแต่ง เป็นต้น

- 316

  มีโครเมียมร้อยละ 16 ถึง 18 และนิกเกิลร้อยละ 11 ถึง 14 เป็นส่วนผสมโดยประมาณ และมีการเพิ่มโมลิบดีนัมเพื่อที่จะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศแบบเจาะเป็นรู (pit type attack) ให้กับเหล็ก ตัวอย่างการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 เช่น กระบวนการทางเคมีต่างๆ อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ และการผลิตเครื่องดื่มและอาหาร ในกรณีที่อยู่ภายใต้ภาวะสิ่งแวดล้อมกัดกร่อนอย่างรุนแรง ควรมีปริมาณโมลิบดีนัมอย่างน้อยร้อยละ 2.

2. เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเฟอริติกที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก (Ferritic magnetic) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลักและมีคาร์บอนกับนิกเกิลต่ำ ดังนั้นราคาก็จะถูกลงเช่นกัน

3. เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทมาร์เทนซิติก (Martensitic) เป็นประเภทที่มีส่วนผสมของโครเมียมโมลิบดินัมและคาร์บอนแต่ไม่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสม ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้จึงไม่มีคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน แต่ว่ามีคุณสมบัติในส่วนของความแข็งแรงและทนทาน เนื่องจากมีคาร์บอนเป็นตัวที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัตินี้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อเสียคือยิ่งแข็งมากขึ้นก็สามารถเปราะและแตกหักง่ายเช่นกัน

4. เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation-hardening martensitic) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีสูตรผสมง่ายๆ คือ โครเมียมและนิกเกิลหรือที่เรียกว่า “14/4PH” มีคุณสมบัติของการต้านทานการกัดกร่อนและความแข็งแรงทนทานได้ดีกว่าประเภทมาร์เทนซิติกธรรมดา

5. เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทดูเพล็กซ์เฟอริติก-ออสเทนนิติก (Duplex ferritic-austenitic) จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทที่มีโครงสร้างผสมระหว่างเฟอริติกกับออสเทนนิติก โดยพัฒนาขึ้นมาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงทนทานและต้านทานการกัดกร่อนให้ดียิ่งขึ้นกว่า ออสเทนนิติกเกรดธรรมดา เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้นิยมนำมาใช้ในงานประเภทที่ต้องการความบาง เพื่อลดน้ำหนักของชิ้นงานและต้นทุนในการผลิต

2.3.2 ธาตุและการให้คุณสมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีหลายเกรดซึ่งขึ้นอยู่กับการผสมธาตุต่างๆ ลงไปในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งานต่างๆ ได้ ซึ่งธาตุสำคัญที่ใช้ผสมมีดังนี้

- โครเมียม

  โครเมียมจะต้องผสมอยู่ในเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ต่ำกว่าร้อยละ 10.5 ซึ่งจะสามารถสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Passive film) บนผิวโลหะได้ ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานการกัดกร่อนไม่เกิดสนิมได้ง่ายในทุกๆ การใช้งาน ถ้าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตมาจากกระบวนการหล่อนั้น จะมีสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านกระบวนการรีดมา

- นิกเกิล

  เมื่อเติมธาตุนิกเกิลในปริมาณที่มากพอเข้าไปในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้โครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมให้เปลี่ยนเป็นแบบออสเตไนท์ ตัวอย่างเช่น เกรด 304 (โครเมียมร้อยละ 18, นิกเกิลร้อยละ 8) ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่นิยมใช้งานกันมากที่สุด ซึ่งถ้าปริมาณนิกเกิลไม่พอ จะทำให้โครงสร้างภายในเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์อย่างสมบูรณ์ไม่ได้ แต่จะมีโครงสร้างภายในเป็นแบบดูเพล็กซ์

- โมลิบดีนัม

  ธาตุโมลิบดีนัมมีสมบัติในการปรับปรุงการสร้างฟิล์มป้องกันการกัดกร่อน (Passive film) ทำให้เกิดการป้องกันได้ดีขึ้น โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบสนิมขุม (Pitting corrosion) และทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง

- คาร์บอน

  ธาตุคาร์บอนทำให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้นและสามารถรวมตัวกับธาตุอื่นเกิดเป็นคาร์ไบด์ ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานการสึกหรอ โดยปกติแล้วเหล็กกล้าไร้สนิมควรจะมีธาตุ

คาร์บอนผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก เนื่องจากองค์ประกอบของคาร์บอนสูงจะลดความยืดหยุ่น ความสามารถในการตีขึ้นรูป และความสามารถในการเชื่อมของเหล็ก แต่ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์จะมีคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 1.2 เพื่อที่นำเหล็กกล้าไร้สนิมไปชุบแข็งได้เพื่อให้มีความแข็งแรงสูงและสามารถนำไปใช้ในอุณหภูมิที่สูงได้

- ไทเทเนียม

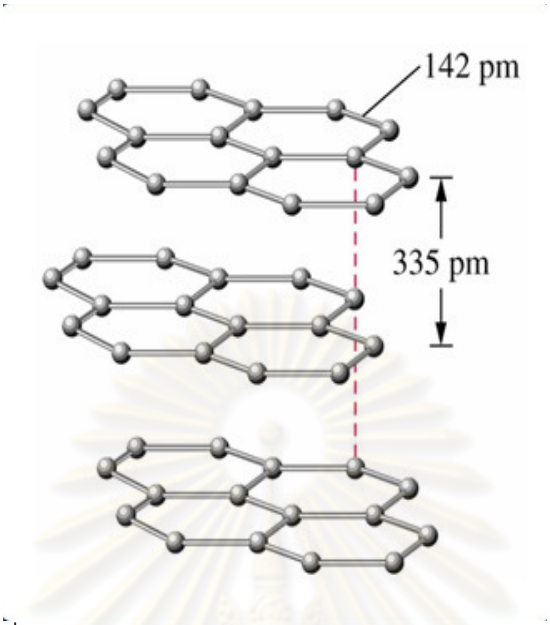
  เป็นธาตุที่ผสมในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อลดการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่เกิดจากการเชื่อม ที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนชนิดนี้ได้เนื่องจากคาร์บอนจะมารวมตัวเป็นไทเทเนียมเกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ นอกจากไทเทเนียมแล้ว ยังมีธาตุอื่นๆ เช่น ไนโอเบียม แทนทาลัม ซึ่งจะใช้ในลวดเชื่อม เป็นส่วนใหญ่เพื่อทดแทนไทเทเนียม

2.4 **คาร์บอน** [16]

ธาตุคาร์บอนจัดเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของสิ่งมีชีวิต ธาตุคาร์บอนมีหลายอัญรูปแต่อัญรูปหลัก ๆ ที่คนส่วนใหญ่รู้จักกันเป็นอย่างดี และถูกนำมาใช้ในชีวิตเป็นเรื่องปกติคือ ถ่านหรือแกรไฟต์ และเพชร แม้จะประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเหมือนกันแต่เมื่อมีการจัดเรียงตัวที่ต่างกัน ก็ส่งผลให้คุณสมบัติของอัญรูปทั้งสองนี้แตกต่างกันด้วย ปกติอะตอมของคาร์บอนจะสามารถเกิดพันธะได้ถึง 4 พันธะ หรือ 4 แขน สำหรับแกรไฟต์นั้น พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในชั้นเดียวกันนั้น จะเกิดพันธะแบบโควาเลนต์ซึ่งมีความแข็งแรงสูง และมีระยะสั้นมากคือ 142 พิโกเมตร แต่ระหว่างชั้นเชื่อมกันด้วยพันธะแวนเดอร์วาลส์ซึ่งมีความอ่อนแอและมีความยาวถึง 335 พิโกเมตร ซึ่งทำให้แกรไฟต์นั้นมีความเปราะมากเพราะพันธะระหว่างชั้นไม่แข็งแรงรูปทรงการสร้างพันธะในชั้นเดียวกันเป็นแบบ Hexagonal ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **แกรไฟต์**

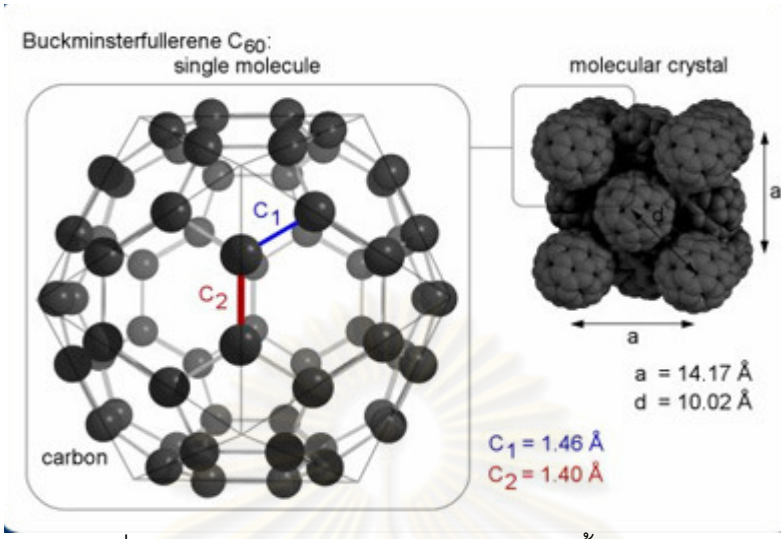


รูปที่ 2.3 แบบจำลองแสดงโครงสร้างของแกรไฟต์ [17]

สมบัติของแกรไฟต์คือมีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าตามแนวระนาบของชั้น เนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระที่ไม่เกิดพันธะทำให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ ความแข็งของแกรไฟต์วัดตามค่าของโมห์ (Mohs Scale) อยู่ที่ระดับ 1-2 แกรไฟต์หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 3652 – 3697 องศาเซลเซียส และเดือดที่อุณหภูมิ 4200 องศาเซลเซียส แกรไฟต์จัดเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ความหนาแน่น 2.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

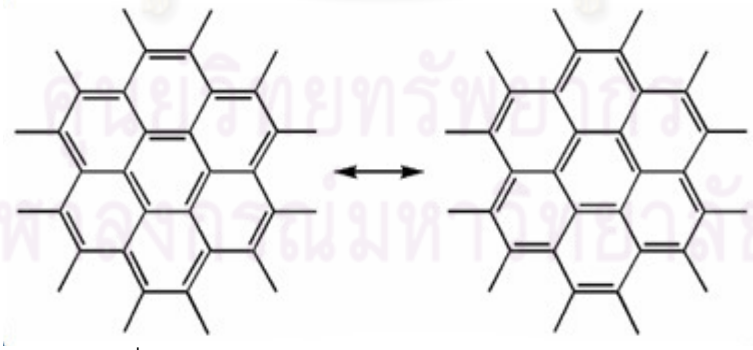
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **บัคกี้บอล หรือ บัคมินิสเตอร์ฟลูเลอรีน**



รูปที่ 2.4 แบบจำลองแสดงโครงสร้างของบัคกี้บอล [17]

โครงสร้างของบัคกี้บอล 1 โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 60 อะตอม เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และเกิดพันธะคู่วนไปตามแขนทั้งสามที่เรียกว่า resonance ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 รูปร่างโมเลกุลเหมือนกับลูกฟุตบอลประกอบด้วย วงห้าเหลี่ยม (pentagons) 12 วง และวงหกเหลี่ยม 20 วง (hexagons) เพนตากอน หรือ รูปห้าเหลี่ยมแต่ละวงจะถูกห้อมล้อมด้วยเฮกซากอนหรือวงหกเหลี่ยมจำนวน 5 วง เป็นโครงสร้างที่เรียกว่า Truncated icosahedron



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างแสดงโครงสร้าง resonance [17]

บัคกี้บอลมีความแข็งเทียบเท่าเพชร แต่ภายในเป็นช่องว่างสามารถบรรจุสารอื่น ๆ ไว้ภายในได้ มีจุดหลอมเหลวที่ 800 องศาเซลเซียส สามารถทนต่อแรงดันสูงได้ ความหนาแน่น 1.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ

นอกเหนือจากโครงสร้างแบบแกร์ไฟต์และแบบบัคมินิสเตอร์ฟลูเลอรีนหรือบัคกี้บอล นี้แล้ว นักวิทยาศาสตร์ยังพบโครงสร้างคาร์บอนอีกรูปแบบที่กำลังมีบทบาทสำคัญในอนาคต โดยจะถูกนำมาเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน โครงสร้างที่กล่าวมานี้คือท่อนาโนคาร์บอน

2.5 **ท่อนาโนคาร์บอน** (Carbon nanotubes) [17]

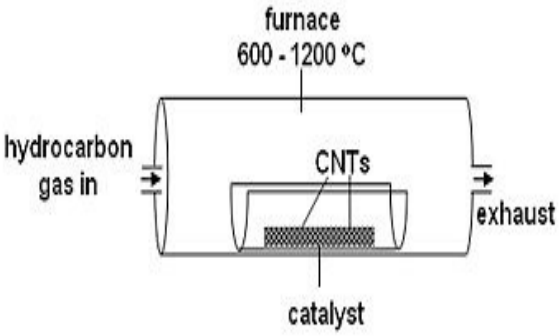
คือ วัสดุที่มีรูปทรงเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ผนังท่ออาจมีเพียงแค่ชั้นเดียว (Single-walled) หรือหลายชั้น (Multi-walled) ซึ่งประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเพียงธาตุเดียว ค้นพบครั้งแรกเมื่อปี 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Sumio Iijima ปัจจุบันพบว่ามีสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ทำเส้นใยเสริมความแข็งแกร่งในวัสดุคอมพอสิต ทำอิเล็กโทรดเพิ่มกำลังไฟและอายุการใช้งานในแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุ เป็นต้น ท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างและสมบัติหลากหลายซึ่งขึ้นกับวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์

2.5.1 **การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน**

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ทั้งในด้านของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ คุณภาพ และความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ โดยทั่วไปแล้วอาจแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้แก่

2.5.1.1 **ตกสะสมไอเคมี** (Chemical vapor deposition : CVD)

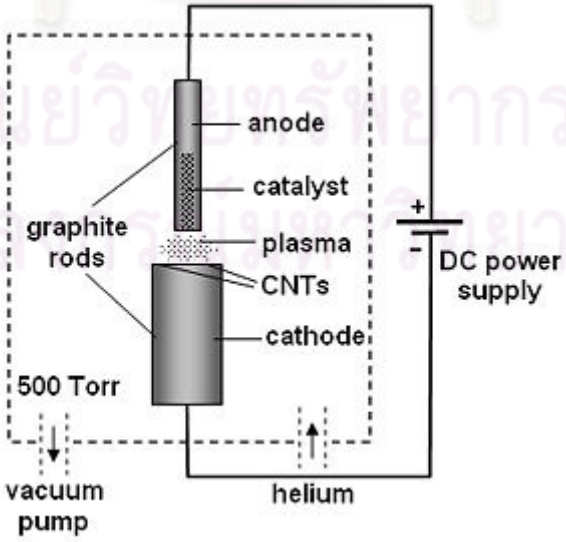
โดยการผ่านไอหรือแก๊สของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C_2H_2) และเอทานอล (C_2H_5OH) เป็นต้น เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณตั้งแต่ 600-1200 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องมีอนุภาคนาโนของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่บริเวณนั้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทำให้โมเลกุลของแก๊สให้แตกตัว (Decomposed) ออกเป็นอะตอมของคาร์บอน โดยการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของแก๊ส สัดส่วนอะตอมของธาตุ C:O:H ในระบบ การคุมขนาดของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาและระยะเวลาในการสังเคราะห์ สามารถกำหนดขนาด ความยาว ทิศทางการเติบโต และตำแหน่งที่ต้องการปลูกของท่อนาโนคาร์บอนได้ แต่อาจมีข้อเสียที่ปริมาณข้อบกพร่องหรือความไร้ระเบียบของโครงสร้างสูง ทำให้ท่อที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้มักเป็นท่อโค้งงอ



รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีตกสะสมไอเคมี [17]

2.5.1.2 **อาร์คดิสชาร์จ** (Arc-discharge)

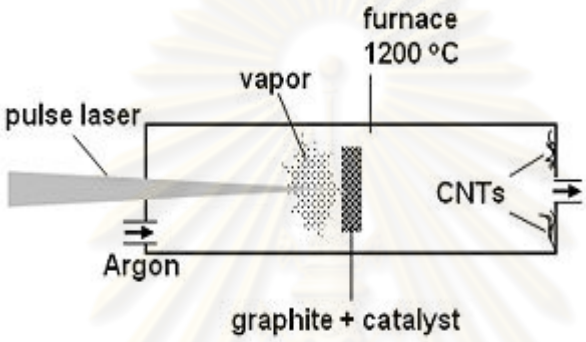
ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 20-200 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 20-40 โวลต์ ตกคร่อมแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางจ่อใกล้ๆ กัน โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายแท่งประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม หรือ อาร์กอน ที่ความดันต่ำระหว่าง 100-500 มิลลิเมตรปรอท จนทำให้เกิดเป็นสถานะพลาสมาและมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์ระเหยกลายเป็นไอแล้วมีการควบแน่นกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอน บริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ (Cathode) การควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำโดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อย เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode)



รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ [17]

2.5.1.3 **ระเหยด้วยเลเซอร์** (Laser vaporization)

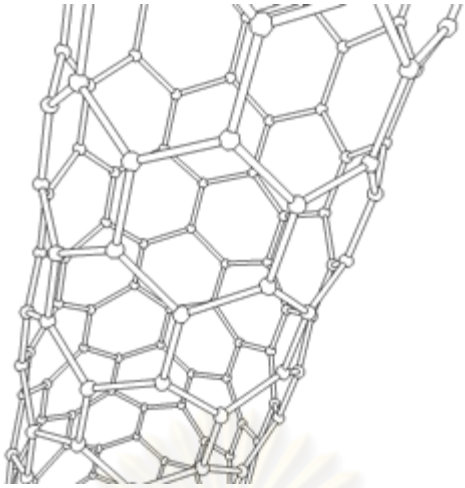
วิธีนี้จะใช้พัลส์แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ผสมกับผงโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยที่ความดันต่ำประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท และอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เทคนิคนี้คล้ายกับวิธีอาร์คดิสชาร์จซึ่งจะได้ปริมาณและคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนดีกว่า แต่มีข้อเสียที่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังสูง และมีราคาแพงมาก



รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีระเหยด้วยเลเซอร์ [17]

2.5.2 **รูปแบบและโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน**

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes : CNTs) เป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งมีโครงสร้างนาโนแบบทรงกระบอก ท่อนาโนนี้จะสร้างตัวขึ้นด้วยอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง 28,000,000 : 1 ขึ้นไป ซึ่งมีค่ามากกว่าวัสดุอื่นๆ อย่างยิ่ง โมเลกุลของคาร์บอนที่เรียงตัวเป็นทรงกระบอกเหล่านี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 มีสมบัติใหม่ที่ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย ทั้งในด้านนาโนเทคโนโลยี ด้านอิเล็กทรอนิกส์ ด้านทัศนศาสตร์ และสาขาอื่นๆ ในวัสดุศาสตร์ และถูกนำมาใช้ในสาขาสถาปัตยกรรมเช่นเดียวกัน ท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติเฉพาะตัวทางไฟฟ้า และเป็นตัวนำความร้อนที่มีประสิทธิภาพยิ่ง ประโยชน์ใช้สอยอีกประการหนึ่งก็คือใช้ในการรักษาแบบเคมีบำบัด ซึ่งต้องควบคุมปริมาณไม่ให้เป็นพิษต่อร่างกายและควบคุมการเปลี่ยนแปลงสมบัติของท่อด้วย

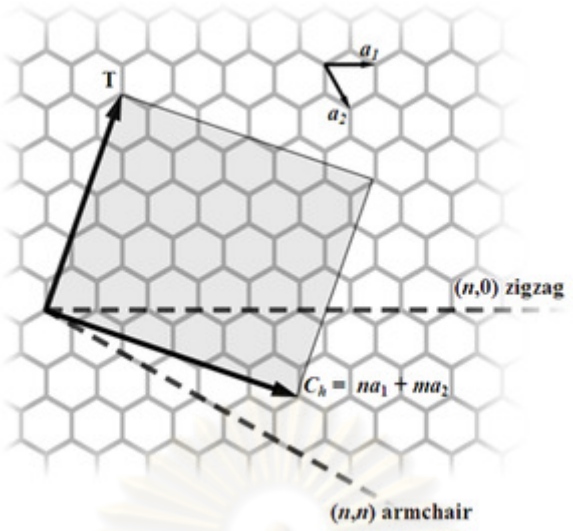


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน [17]

ท่อนาโนคาร์บอนก็จัดอยู่ในอัญรูปแบบฟลูเลอรีน (fullerene) ประเภทหนึ่ง โดยประกอบด้วยลูกบอลทรงกลมเรียกว่า “บัคกี้บอล (buckyballs)” ปลายสุดของท่อนาโนจะต้องจับอยู่กับครึ่งหนึ่งของโครงสร้างบักกี้บอล เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอนอยู่ในระดับไม่กี่นาโนเมตร (ประมาณ 1 ใน 50,000 ส่วนของความกว้างของเส้นผมมนุษย์) ขณะที่มีความยาวได้หลายมิลลิเมตร โดยท่อนาโนคาร์บอนจะจัดแบ่งออกได้ 2 รูปแบบก็คือ ท่อนาโนผนังชั้นเดี่ยว (single-walled nanotubes : SWNTs) และท่อนาโนผนังหลายชั้น (multi-walled nanotubes : MWNTs)

2.5.2.1 **ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว** (single-walled nanotubes : SWNTs)

โดยส่วนใหญ่แล้ว ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับ 1 นาโนเมตร ซึ่งความยาวของท่อสามารถยาวได้มากกว่านั้นหลายล้านเท่า โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวนั้น สามารถอาศัยความคิดที่ว่าเป็นการนำแผ่นเยื่อที่มีความหนา 1 อะตอมของแกรไฟต์ เรียกว่า แกรฟีน (graphene) มาห่อม้วนเข้าเป็นทรงกระบอกที่ไม่มีรอยต่อ ตำแหน่งของแผ่นแกรฟีนที่ม้วนเข้าด้วยกันนั้น แสดงได้โดยเลขดัชนีคู่หนึ่ง (n,m) เรียกว่า chiral vector จำนวนนับ n และ m นิยามถึงเวกเตอร์หน่วยของทิศทางสองทิศทาง ภายในผลึกแลตทิซรังผึ้งของแกรฟีน ถ้า m = 0 ท่อนาโนคาร์บอนจะถูกเรียกว่า “zigzag” ถ้า n = m ท่อนาโนคาร์บอนจะถูกเรียกว่า “armchair” ในกรณีอื่นๆจะเรียกว่า “chiral” ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ทิศทางผลึกในโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน [17]

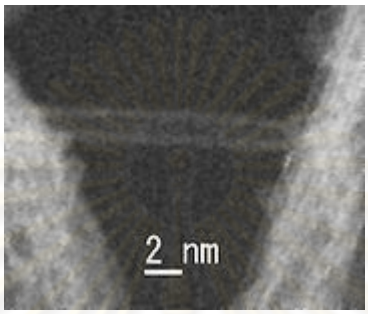
(n,m) ของท่อนาโนคาร์บอนสามารถคิดให้เป็นเวกเตอร์ Ch ในแผ่นแกรฟีนที่มีพื้นที่เป็นอนันต์ โดยจะอธิบายว่า แผ่นแกรฟีน "ม้วน" เป็นท่อนาโนคาร์บอนได้อย่างไร ลัญลักษณ์ T นิยามเป็นแกนของท่อ และ a_1 และ a_2 คือเวกเตอร์หน่วยของแกรฟีนใน real space

ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว เป็นท่อนาโนคาร์บอนคาร์บอนที่สำคัญประเภทหนึ่ง เพราะแสดงสมบัติทางไฟฟ้า ที่ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นไม่มี ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวเหมือนกับเป็นตัวแทนของอิเล็กทรอนิกส์ที่ย่อให้เล็กลง ยิ่งกว่าระดับไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่กำลังใช้อยู่ในปัจจุบัน การนำท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวไปใช้งานแบบพื้นฐานที่สุดก็คือ การใช้เป็นสายไฟ และท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวก็เป็นตัวนำที่ดีมากด้วย การนำมาประยุกต์ใช้ที่เป็นประโยชน์อย่างหนึ่งก็คือ การพัฒนา field effect transistors (FET) ในระดับโมเลกุลได้เป็นชิ้นแรก แนวคิดการสร้าง logic gate ในระดับโมเลกุลโดยใช้ FET ที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวก็มีโอกาสเป็นไปได้สูง การผลิต logic gate นั้นจะต้องมีทั้ง p-FET และ n-FET ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวจะประพฤติตัวเป็น p-FET เมื่ออยู่ในออกซิเจน และเป็น n-FET เมื่ออยู่ในภาวะอื่น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะป้องกันครึ่งหนึ่งของท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวจากออกซิเจน และอีกครึ่งหนึ่งให้อยู่ในออกซิเจน ผลลัพธ์ก็คือ ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวจะประพฤติตัวเป็น NOT logic gate ที่มี FETs p และ n-type ในโมเลกุลเดียวกัน

2.5.2.2 **ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น** (multi-walled nanotubes : MWNTs)

ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWNTs) ประกอบด้วยเยื่อที่วนรอบอยู่หลายชั้น (โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน) ของแกรไฟต์ มีแบบจำลองที่ใช้อธิบายโครงสร้างของ MWNT อยู่ 2 แบบ แบบ

แรกคือแบบจำลอง Russian Doll ซึ่งเป็นแผ่นของแกรไฟต์ที่จัดตัวเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ตัวอย่างเช่น ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (0,8) อยู่ภายในท่อนาโนคาร์บอน (0,10) ซึ่งใหญ่กว่า อีกแบบหนึ่งก็คือ แบบจำลอง Parchment โดยแผ่นของแกรไฟต์จะหมุนวนรอบตัวของมันเอง คล้ายกับม้วนกระดาษหนังหรือม้วนหนังสือพิมพ์ ระยะระหว่างแต่ละชั้นของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น จะใกล้เคียงกับระยะระหว่างชั้นแกรฟีนในแกรไฟต์ประมาณ 3.4 Å ดังแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 Electron micrograph แสดงให้เห็นถึงท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น [17]

ลักษณะพิเศษของท่อนาโนคาร์บอนผนังสองชั้น (double-walled carbon nanotubes : DWNT) น่าสนใจเนื่องจากมีสัณฐานวิทยา (morphology) และสมบัติคล้ายกับ SWNT แต่ความต้านทานทางเคมีดีกว่ามาก นี่เป็นสมบัติใหม่ที่สำคัญของ DWNT ในกรณีของ SWNT การสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนท่อโดยใช้พันธะโควาเลนต์จะทำลายพันธะคู่ C=C บางส่วน ก่อให้เกิด “hole” ภายในโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน และเปลี่ยนแปลงทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้า ในกรณีของ DWNT มีเพียงผนังชั้นนอกสุดเท่านั้นที่ถูกเปลี่ยนแปลง การสังเคราะห์ DWNT ออกมาในระดับกรัมทำสำเร็จเป็นครั้งแรกในปี 2003 ด้วยเทคนิค CCVD จากการ selective reduction ของสารละลายออกไซด์ในมีเทนและไฮโดรเจน [18]

2.5.3 **สมบัติต่าง ๆของท่อนาโนคาร์บอน**

2.5.3.1 **ความแข็งแรง** (Strength) [19]

คุณสมบัติเชิงกลที่พิเศษของท่อนาโนคาร์บอนนี้ คือเป็นโครงสร้างนาโนที่มีความแข็งแกร่ง น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นอย่างมาก โดยจากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์ได้กล่าวไว้ว่าท่อนาโนคาร์บอนนี้เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแกร่งมากกว่าเหล็กเกินกว่า 60 เท่า และท่อนาโนคาร์บอนมีน้ำหนักที่เบามาก อีกทั้งเป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสามารถ

ทนต่อแรงดึงได้มากกว่าเหล็กถึง 20 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 2.5 จึงได้มีการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลายชนิดอย่างเช่น อุปกรณ์กีฬากอล์ฟและเทนนิส เป็นต้น (และมีแนวโน้มในการใช้ผลิตเป็นโครงสร้างของเครื่องบินอีกด้วย)

ตาราง 2.5 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆ [19]

	Comparison of mechanical properties		
Material	**Young's modulus (TPa)**	**Tensile strength (GPa)**	**Elongation at break (%)**
SWNT	~1 (from 1 to 5)	13–53[E]	16
Armchair SWNT	0.94[T]	126.2[T]	23.1
Zigzag SWNT	0.94[T]	94.5[T]	15.6–17.5
Chiral SWNT	0.92	-	-
MWNT	0.27[E]–0.95[E]	11[E]–150[E]	-
Stainless steel	0.186[E]–0.214[E]	0.38[E]–1.55[E]	15–50
Kevlar–29&149	0.06[E]–0.18[E]	3.6[E]–3.8[E]	~2

[E]Experimental observation; [T]Theoretical prediction

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบจากสมบัติทางด้านความต้านแรงดึง(tensile strength) และมอดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ในปี ค.ศ. 2000 มีการทดลองวัดค่าความต้านแรงดึงของท่อนาโนคาร์บอน พบว่ามีค่าถึง 63 จิกะปาสคาล เทียบเท่ากับความต้านแรงดึงที่มีน้ำหนัก 6422 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตรบนสายเคเบิลซึ่งเป็นผลมาจากความแข็งแรงของพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมของคาร์บอนแต่ละอะตอม แต่ท่อนาโนคาร์บอนไม่ได้เป็นวัสดุที่แข็งแรงในกรณีที่ถูกบีบอัดเนื่องจากมีอัตราส่วนของความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดที่สูงมากและภายในท่อมีลักษณะกลวง จึงมีแนวโน้มที่จะแตกหักได้เมื่อได้รับแรงอัดหรือแรงบิด

2.5.3.2 **สมบัติเชิงไฟฟ้า** (Electrical property) [20]

สมบัติเชิงไฟฟ้าที่น่าสนใจสำหรับท่อนาโนคาร์บอนคือสามารถเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำหรือเซมิคอนดักเตอร์และเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้ายิ่งยวดหรือซูเปอร์คอนดักเตอร์ (คือตัวนำที่ไม่มีแรงต้านไฟฟ้าเลย) โดยขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนตามผนังของท่อ สัดส่วนองค์ประกอบ และวัตถุชนิดอื่นที่ผสมลงไปในโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน และเนื่องด้วยเป็นโครงสร้างที่เล็กมากในระดับนาโน ท่อนาโนคาร์บอนจึงมีคุณสมบัติควอนตัม คือสามารถควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง โดยอาจจะสามารถควบคุมการไหลทีละกลุ่มของอิเล็กตรอนหรือควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทีละตัวได้ จึงได้มีการนำมาใช้งานในการผลิตเป็นทรานซิสเตอร์ที่มีความเร็วสูงและมีความต้านทานต่ำมาก และมีการนำมาพัฒนาในการสร้างเกทพื้นฐานเชิงตรรกะ (logic gate) ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างระบบของคอมพิวเตอร์นาโน รวมทั้งมีการพัฒนาที่จะนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้แทนโลหะ ในส่วนที่เป็นขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำอิเล็กตรอนในการประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทด ที่ใช้ในจอทีวี หรือจอคอมพิวเตอร์ ด้วยคุณสมบัติที่เหนือกว่าคือสามารถให้ความสม่ำเสมอ ให้ปริมาณที่เพียงพอ และมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนั้นแล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศ และยังเป็นการประหยัดพลังงาน เนื่องจากสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง อย่างกรณีการใช้โลหะ

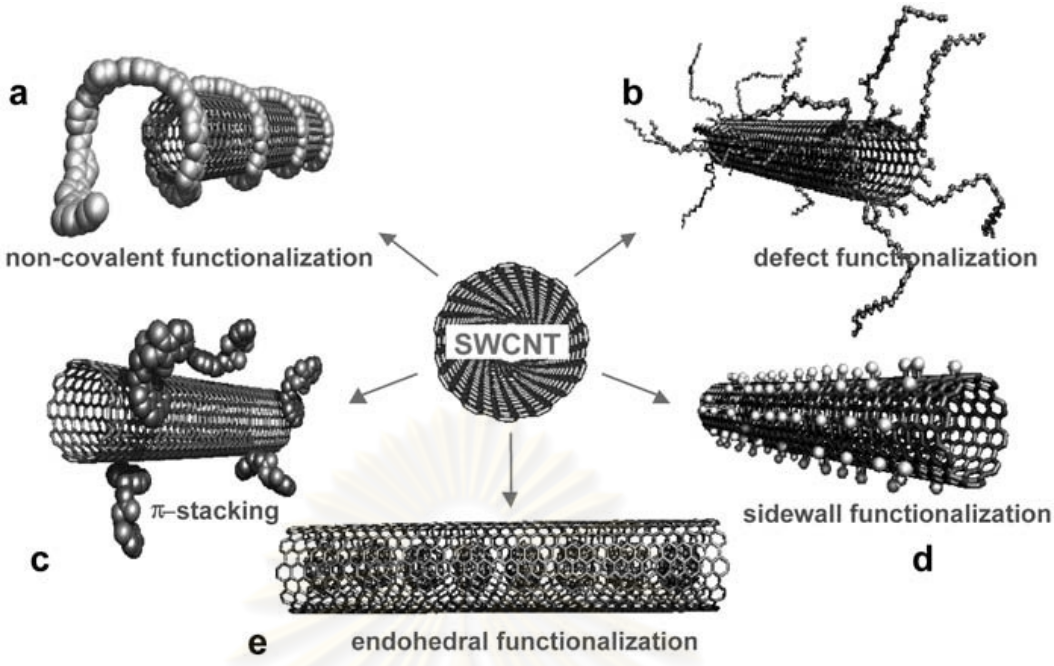
เนื่องจากโครงสร้างที่สมมาตรและมีความโดดเด่นทางด้านการนำกระแสไฟฟ้าของแกรฟีนเมื่อเปลี่ยนรูปร่างเป็นแบบท่อทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น สำหรับท่อนาโนคาร์บอน (*n*,*m*) ถ้า $n = m$ แล้ว ท่อนาโนคาร์บอนจะมีสมบัติเป็นแบบโลหะ แต่ถ้า n คูณกับ m แล้วมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ 3 ท่อนาโนคาร์บอนจะแสดงสมบัติแบบสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างระหว่างแถบ (band gap) ที่แคบ ถ้านอกเหนือจากกรณีที่กล่าวมา จะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบทั่วไป ดังนั้น ท่อนาโนคาร์บอนแบบอาร์มแชร์ ($n = m$) ทั้งหมดจะมีสมบัติแบบโลหะและท่อนาโนคาร์บอนแบบ (6, 4), (9, 1) และอื่นๆ จะมีสมบัติแบบสารกึ่งตัวนำ อย่างไรก็ตามกฎที่กล่าวมาก็มีข้อยกเว้นเพราะผลจากความโค้งในท่อนาโนคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะส่งผลต่อสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าอย่างมาก ทำให้ในท่อที่ควรจะมีสมบัติเป็นแบบกึ่งตัวนำจะสามารถแสดงสมบัติเป็นแบบโลหะได้ ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนแบบ zigzag และ chiral ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กก็จะแสดงสมบัติแบบโลหะได้ ส่วนแบบอาร์มแชร์ก็ยังคงสมบัติของโลหะอยู่ ในทางทฤษฎีท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ 4×10^9 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าโลหะ เช่น ทองแดงถึง 1,000 เท่า

2.6 **การสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันลงบนท่อนาโนคาร์บอน** (Functionalization of Carbon Nanotubes) [21]

โดยทั่วไปท่อนาโนคาร์บอนในทุกรูปแบบโครงสร้างจะมีสมบัติการกระจายตัวและละลายในน้ำหรือสารอินทรีย์ต่างๆได้ไม่ดี เนื่องจากมีค่าความต้านทานในการเข้ากับของเหลวสูง การสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนท่อนาโนคาร์บอนสามารถช่วยให้มีสมบัติการละลายดีขึ้นทำให้การนำไปใช้งานในกระบวนการต่างๆมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยพันธะเคมีสามารถใช้ปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและสารอื่นๆได้ เช่น ตัวทำละลาย พอลิเมอร์และท่อนาโนคาร์บอนด้วยกัน การที่ท่อนาโนคาร์บอนมีหมู่ฟังก์ชันจะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างจากกรณีที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการใช้งานในรูปแบบเฉพาะทางต่างๆ

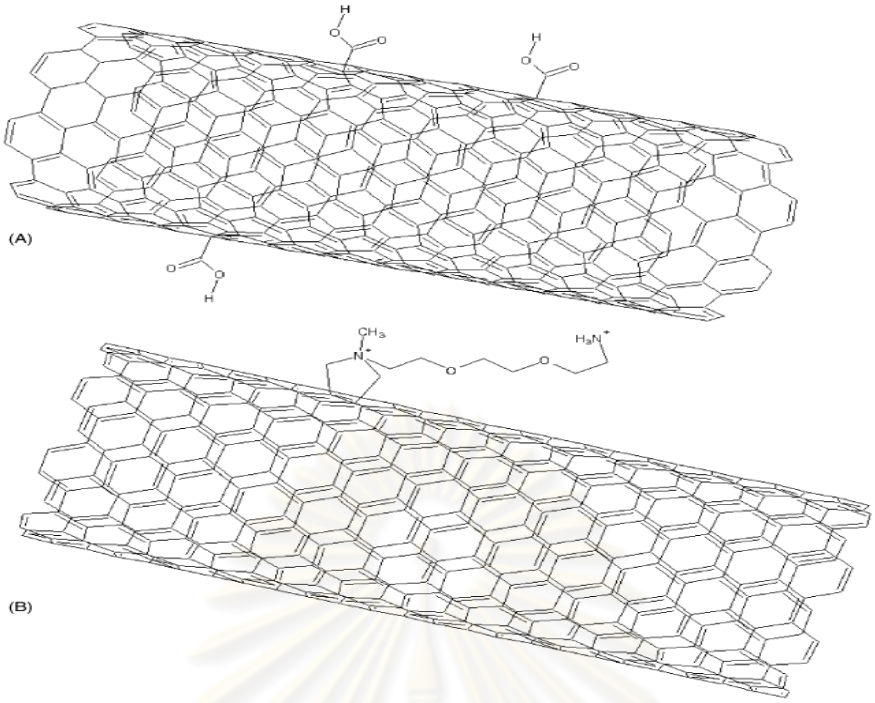
การสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันลงบนท่อนาโนคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือแบบใช้พันธะโควาเลนต์และแบบไม่ใช้ โดยแบบที่ใช้พันธะโควาเลนต์จะใช้แรงของพันธะเชื่อมหมู่ฟังก์ชันลงบนจุดต่างๆของท่อ เช่น ปลายท่อ บริเวณจุดที่บกพร่องบนท่อ (defect) หรือที่ผนังของท่อ ตัวอย่างของการสังเคราะห์แบบใช้พันธะโควาเลนต์คือ การสังเคราะห์หมู่คาร์บอกซีลิก ส่วนกรณีที่ไม่ใช้พันธะโควาเลนต์ในการสังเคราะห์จะเป็นการนำโมเลกุลต่างๆ ลงบนท่อนาโนคาร์บอน แรงที่ช่วยในการดูดซับ เช่น แรงแวนเดอวาลล์ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาจะเป็นการสังเคราะห์ลงบนท่อนาโนคาร์บอนภายนอก แต่จะมีรูปแบบที่พิเศษอีกรูปแบบหนึ่งคือการสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันให้เกิดภายในท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งการสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันลงบนท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นจะเกิดหมู่ฟังก์ชันที่ผนังชั้นนอกสุดเท่านั้นจึงเปรียบเทียบคล้ายกับการสังเคราะห์บนท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



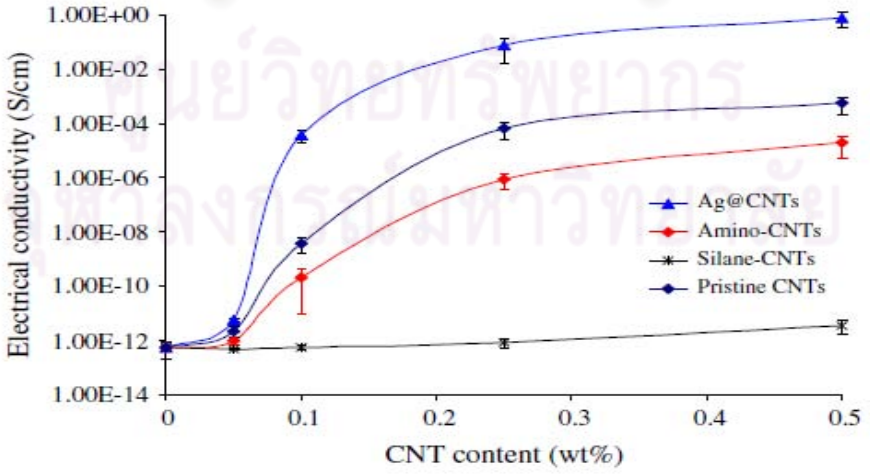
รูปที่ 2.12 รูปแบบต่างๆของการสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันลงบนนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว a) แบบไม่ใช้แรงจากพันธะโควาเลนต์ b) แบบสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันลงบนจุดบกพร่องบนท่อ c) แบบแต่ละจุดต่อเนื่องบนผนังท่อ d) แบบสม่ำเสมอบนผนังท่อและ e) แบบที่มีหมู่ฟังก์ชันภายในท่อ [21]

การสังเคราะห์โดยใช้พันธะโควาเลนต์นั้นกำลังได้รับความสนใจในการวิจัยและพัฒนาในปัจจุบันแต่มีความยุ่งยากในการควบคุมกระบวนการในการสังเคราะห์เนื่องจากต้องใช้ความร้อนสูงและภาวะในการเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงเพื่อสร้างพันธะโควาเลนต์ นอกจากนี้ยังเป็นเรื่องยากที่จะอธิบายลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นและการกำหนดตำแหน่งของการเกิดหมู่ฟังก์ชัน เทคนิคที่พบมากที่สุดคือการทำให้บริสุทธิ์โดยการออกซิเดชัน (Oxidative Purification) โดยทำการออกซิเดชันท่อนาโนคาร์บอนในขณะที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลวเพื่อที่จะสังเคราะห์หมู่คาร์บอกซีลิก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และหมู่ต่างๆ ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบลงบนท่อ เช่น หมู่คาร์บอนิล ไฮดรอกซิลและเอสเทอร์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าหมู่คาร์บอกซีลิกจะช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้มีการเกิดอันตรกิริยาที่ดีกว่ากรณีที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชัน 6-10 เท่า และการสังเคราะห์หมู่ 1,3-dipolar azomethine จะช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนละลายในตัวทำละลายอินทรียได้ดีขึ้น 50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร [23] ซึ่งโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่มีหมู่คาร์บอกซีลิกและหมู่ 1,3-dipolar azomethine แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่มี (A) หมู่คาร์บอกซีลิกและ (B) หมู่ 1,3-dipolar azomethine [22]

นอกจากนี้การสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันลงบนท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นการเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้แก่วัสดุคอมพอสิตเมื่อมีการนำท่อนาโนคาร์บอนไปผสมดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยมีการสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน 3 ชนิด ได้แก่ เงิน อะมิโนและไซเลน ซึ่งเมื่อใช้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีเงินเป็นหมู่ฟังก์ชันสามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าได้เมื่อเทียบกับท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชัน



รูปที่ 2.14 ผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่มีการสังเคราะห์หมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆต่อค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิต [23]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พรชัย [4] ได้ศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยใช้สารยึดเกาะติดคืออิพ็อกซีเรซินและซิงก์เรซิน ใช้วิธีการฉีดพ่นสารที่เตรียมจากผงแกรไฟต์กับตัวประสานในการเคลือบผิวโลหะ พบว่า การใช้อิพ็อกซีเรซินเป็นตัวช่วยยึดเกาะจะได้ค่าความต้านทานสัมผัสสูงกว่าซิงก์เรซิน ผงแกรไฟต์ชนิด BDH และผงแปรงถ่าน (CB) จะให้ค่าการนำกระแสไฟฟ้าในแนวแกนที่สูงแต่ผงแปรงถ่าน (CB) จะมีค่ากระแสกัดกร่อนต่ำที่สุด ปริมาณของผงคาร์บอนและความหนาในการเคลือบผิวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานการสัมผัสเพิ่มขึ้นและค่ากระแสกัดกร่อนลดลง เมื่อนำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตทดสอบในเซลล์เชื้อเพลิง พบว่า ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (382.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) น้อยกว่าเมื่อใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (422.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ เพราะผิวแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนสภาพ

Ma และคณะ [5] ได้ศึกษาการเสริมแรงวัสดุนาโนโดยใช้สารตัวเติมที่ผสมกันระหว่างท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) และเขม่าดำ (CB) เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการนำกระแสไฟฟ้าของวัสดุผสมและหาความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพของวัสดุโดยที่ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีราคาต่ำ วัสดุผสมนาโนซึ่งใช้ Epoxy resin เป็นตัวช่วยยึดเกาะเตรียมโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) และเขม่าดำ (CB) พบว่าวัสดุนาโนที่ผสมเขม่าดำ (CB) และท่อนาโนคาร์บอนจะมีสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและให้สมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเติมที่อัตราส่วนร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของสารตัวเติมทั้งสองชนิด ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเป็นผลมาจากการทำงานร่วมกัน (synergistic) ของเขม่าดำและท่อนาโนคาร์บอน

Lee และคณะ [24] ได้ศึกษาผลของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเป็นสารตัวเติมต่อเอกลักษณ์ของตัวต้านทานที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นบวก positive temperature coefficient (PTC) ของสารประกอบคาร์บอนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมสารโดยวิธีผสมในภาวะหลอม ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ค่า PTC intensity และ repeatability ของวัสดุผสมนาโนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่เหมาะสมที่สุดขึ้นกับปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนในสารตัวเติม และค่าความต้านทานของวัสดุจะลดลงเมื่อมี

องค์ประกอบของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเพิ่มขึ้นเพราะอนุภาคของคาร์บอนเกาะตัวกับท่อนาโนคาร์บอนเกิดเป็นโครงสร้างที่มีโครงข่ายนำกระแสไฟฟ้าขึ้น ทำให้ความต้านทานของวัสดุลดลง

Tomokazu และคณะ [25] ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทำเป็นฟิล์มบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งการเคลือบคาร์บอนจะเตรียมด้วยวิธี CVD และศึกษาลักษณะทั่วไปด้วย Raman Spectroscopy และ Atomic Force Microscopy จากนั้นนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบคาร์บอนแล้วทดสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยกรดซัลฟิวริก ดูค่าความต้านทานภายในก่อนและหลังการกัดกร่อน และดูความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ผลการทดลองแสดงว่าสารเคลือบคาร์บอนสามารถป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นกล้าไร้สนิมได้ แผ่นฟิล์มผสมกับโลหะออกไซด์ทำให้สามารถลดความต้านทานการสัมผัสระหว่างแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วและช่องการไหลของแก๊ส การลดความต้านทานและการกัดกร่อนจะทำให้สมบัติการนำกระแสไฟฟ้าของแผ่นโลหะดีขึ้น แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวจะให้ค่านำกระแสไฟฟ้ามากกว่าที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเคลือบผิว

Shigehiro และคณะ [26] ได้ทำการพัฒนาแผ่นโลหะที่ป้องกันการกัดกร่อนและนำกระแสไฟฟ้าได้ดี ซึ่งจะเคลือบที่ผิวด้วยคาร์บอนผสมเรซินบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม สารเคลือบจะประกอบด้วยผงแกรไฟต์ อิพ็อกซีเรซินและฟีนอล โดยหาส่วนผสมที่ดีที่สุดโดยการนำไปทดสอบค่าความนำกระแสไฟฟ้าและความต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นโลหะ พบว่าเมื่อนำแผ่นโลหะที่เคลือบไปทดสอบโดยการจุ่มในกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นานกว่า 2000 ชั่วโมง พบว่า แผ่นโลหะที่มีการเคลือบคาร์บอนผสมเรซินสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และพบสภาพต้านทานที่ผิวน้อยกว่า 13.8 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ที่ภาวะการเคลือบที่อุณหภูมิคงที่ 1053 องศาเคลวิน นาน 5 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงเหลือ 373 องศาเคลวิน นาน 1.5 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1.	ผงแปรงถ่าน	บริษัท สุธียูไนเต็ดคาร์บอน จำกัด
2.	ซิงก์เรซิน	บริษัท Research Product Int.
3.	โทลูอีน	บริษัท Sigma-Aldrich
4.	อะคริดิกเรซิน เกรด 52-204	บริษัท Aekyung chemical
5.	กรดไนตริกเข้มข้น 65%	บริษัท Sigma-Aldrich
6.	กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98%	บริษัท Sigma-Aldrich
7.	ท่อนาโนคาร์บอนชนิดการนำไฟฟ้าต่ำ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
8.	ท่อนาโนคาร์บอนชนิดการนำไฟฟ้าสูง	บริษัท Chengdu Organic Chem.
9.	ท่อนาโนคาร์บอนชนิดการนำไฟฟ้าสูงและมีหมู่คาร์บอกซิลิก	บริษัท Chengdu Organic Chem.
10.	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 12 โมลาร์	บริษัท Sigma-Aldrich.
11.	ซิลิโคน	บริษัท คีซิโมโต้ ซังกิโย
12.	น้ำกลั่น	
13.	เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304	
14.	ผ้าคาร์บอน (Carbon Cloth)	
15.	แผ่นทองแดง	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 μ3AUT70558 μAUTOLAB
5. เครื่องฉีดพ่น Model 175 Crescendo air brush เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร

ความดันปั๊มลม 10 lb/in^2

6. ปากกาหนีบชิ้นงาน

7. บีกเกอร์

8. ตู้อบ

9. นาฬิกาจับเวลา

10. เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว

การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิวจำเป็นต้องกำจัดออกไซด์บนผิวหน้าของชิ้นงานออก เนื่องจากออกไซด์บนผิวชิ้นงานทำให้ชิ้นงานมีค่าการนำไฟฟ้าที่ลดต่ำลง โดยมีลำดับขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานดังนี้

(1) นำแผ่นชิ้นงาน คือแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ไปแช่ในกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 เป็นเวลานาน 15 นาที

(2) ล้างออกด้วยน้ำสะอาดแล้วปล่อยให้ชิ้นงานแห้งที่อุณหภูมิห้อง

(3) นำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายจนผิวของชิ้นงานราบเรียบสม่ำเสมอจะได้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิว

3.3.2 กระบวนการเคลือบผิวโดยการใช้สารยึดเกาะซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน

กระบวนการเคลือบผิวโดยการใช้สารยึดเกาะซิงก์เรซิน มีลำดับขั้นตอนดังนี้

(1) นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบผิวแล้วทำการวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนา (Thickness gauge) โดยวัด 5 จุดของชิ้นงาน คือวัดที่มุมทั้ง 4 และตรงกลางของชิ้นงานอีก 1 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานก่อนการเคลือบผิว

(2) เตรียมผงแปรงถ่าน (CB) ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง ตามปริมาณที่ศึกษา ทำโดยเพิ่มปริมาณผงแปรงถ่านในสารเคลือบที่มีซิงก์เรซินเป็นสารช่วยยึดเกาะ โดยใช้ปริมาณผงแปรงถ่านเป็นร้อยละ 15, 18, 20 และ 23 โดยน้ำหนัก และ

เคลือบให้ความหนาอยู่ในช่วง 0.09 ถึง 0.11 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวัดค่าการต้านทานการกัดกร่อนและความต้านทานเชิงสัมผัส

(3) เตรียมท่อนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่ใช้เป็นสารตัวเติม โดยศึกษาปรับท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ซึ่งแทนที่ในส่วนของตัวทำละลาย (ชั่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง) และใช้ท่อนาโนคาร์บอน 3 ชนิด คือ ชนิดที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ ชนิดที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงและชนิดที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลิกเป็นองค์ประกอบ และนำมาผสมกับผงแปรงถ่านที่ได้เตรียมไว้ก่อนแล้ว

(4) เมื่อได้ผงแปรงถ่านที่ผสมกับท่อนาโนคาร์บอนตามน้ำหนักที่ต้องการ นำไปผสมด้วยสารช่วยยึดเกาะซิงก์เรซินตามปริมาณที่ศึกษาและผสมกับตัวทำละลายโทลูอีน ต่อจากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนสาร (Overhead stirrer) เป็นเวลานาน 30 นาทีโดยปรับใบพัดของเครื่องกวนสารให้อยู่ที่ระดับ 100 รอบต่อนาที เพื่อให้เกิดการกวนอย่างสม่ำเสมอทำให้สารเคลือบเป็นเนื้อเดียวกันจนได้สารเคลือบที่เหมาะสมในการเคลือบผิว

(5) ทำการฉีดพ่นสารเคลือบที่เตรียมไว้ลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ที่ความหนา 0.09-0.11 มิลลิเมตร [4] โดยทำการฉีดพ่นในตู้ดูดควัน ความหนาที่ได้จากการเคลือบผิวชิ้นงานจะถูกควบคุมด้วยปริมาณสารเคลือบที่ทำการฉีดพ่นในแต่ละครั้ง

(6) ปล่อยให้สารเคลือบผิวแห้งที่อุณหภูมิห้อง เมื่อสารเคลือบผิวแห้งที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการวัดความหนาหลังการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความหนาโดยวัด 5 จุดของชิ้นงานคือวัดที่มุมทั้ง 4 และตรงกลางของชิ้นงานอีก 1 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ยความหนาของชิ้นงานหลังการเคลือบผิวจะได้ความหนาในการเคลือบผิวของชิ้นงาน

(7) ทำขั้นตอนที่ 1-6 ซ้ำแต่เปลี่ยนเป็นการใช้สารยึดเกาะอะคริดิกเรซินแทนซิงก์เรซิน

(8) นำชิ้นงานที่ได้ไปศึกษาสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนและความต้านทานเชิงสัมผัสต่อไป

3.3.3 วัดค่าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยคาร์บอนคอมพอสิต [4]

เตรียมชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวจากนั้นทำการเคลือบผิวด้วยซิลิโคนเหลือบริเวณที่ไม่ถูกเคลือบเฉพาะบริเวณที่ต้องการศึกษาการกัดกร่อน โดยพื้นที่การกัดกร่อนจะใช้พื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรเมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จ ซึ่งการจัดอุปกรณ์ทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3.1 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) เมื่อได้กราฟที่ต้องการแล้วสามารถนำไปคำนวนหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้ต่อไป

3.3.3.2 คำนวนหาอัตราการกัดกร่อน

(1) เตรียมกราฟที่ได้มาจากการวัดการกัดกร่อน

(2) เลือกเมนู Analysis – corrosion rate แล้วกดปุ่ม Tafel plot

(3) ใส่ค่าที่จำเป็นต่อการคำนวณการหาค่าอัตราการกัดกร่อน คือ Surface area (cm^2) Equipvalent weight (g) และ Density (g/cm^2) 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) โปรแกรมจะคำนวนค่าอัตราการกัดกร่อนให้

รูปที่ 3.1 แสดงการวัดค่าการกัดกร่อนของชิ้นงาน

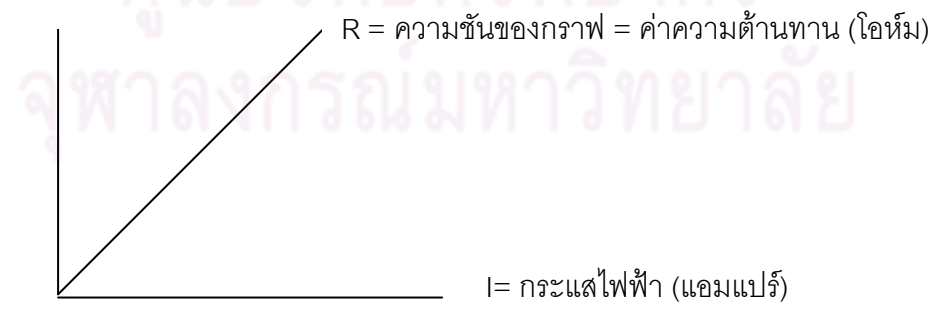
3.3.4 **วัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน** Interfacial Contact Resistance (ICR) [4]

แสดงอุปกรณ์การทดลองดังรูปข้างล่าง โดยให้กระแสไฟฟ้าเข้าด้านข้างของชิ้นงานโดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.5 แอมแปร์ และวัดค่าความต่างศักย์ของชิ้นงานได้ค่าความต่างศักย์ในช่วงกระแสไฟฟ้า 0.1 ถึง 0.5 แอมแปร์ นำไปพล็อตกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดยสมการกฎของโอห์ม V = IR

V = ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)

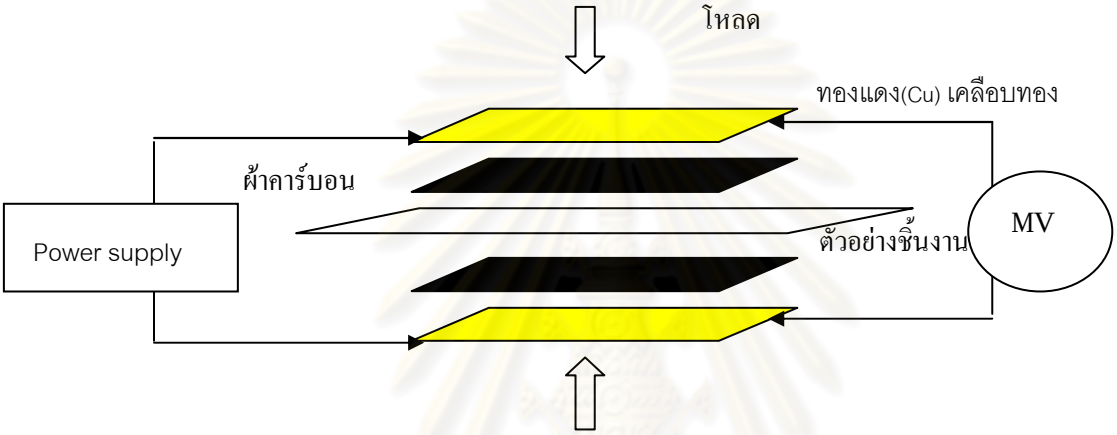
I = ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

R = ค่าความต้านทาน (โอห์ม)



รูปที่ 3.2 ค่าความต้านทานเป็นความชันของกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

ทั้งนี้ความต้านทาน (R) ที่ได้จะมีค่าเท่ากับความชันของกราฟ อีกทั้งความต้านทานยังมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า (A) ดังนั้นค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจะเท่ากับ R x A โดยวัดความต้านทานเชิงสัมผัสของเครื่องมือวัดโดยไม่มีชิ้นงานกำหนดให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเท่ากับ R_1 และวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสตอนมีชิ้นงานกำหนดให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเท่ากับ R_2 และหาค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR) ได้จากสมการการหาความต้านทานเชิงผิว จากรูปที่ 3.3 แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR) และในรูปที่ 3.4 แสดงการการวัดความต้านทานเชิงสัมผัส



รูปที่ 3.3 การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR)

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

R_1 = วัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของเครื่องมือวัด ($ohm.cm^2$)

R_2 = วัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสตอนมีชิ้นงาน ($ohm.cm^2$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 การการวัดความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR)

3.3.5 การทดสอบสมบัติเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบผิวเตรียมเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม

นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) ไปเซาะร่องให้เกิดช่องการไหลของแก๊ส จากนั้นทำการฉีดพ่นสารเคลือบลงแผ่นชิ้นงานโดยสารเคลือบที่ใช้เตรียมจะเลือกที่องค์ประกอบที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด โดยทำการฉีดพ่นสารเคลือบลงบนชิ้นงานที่ความหนาในการเคลือบผิวที่ 0.09-0.11 มิลลิเมตร โดยขนาดและช่องการไหลแก๊สจะยึดรูปแบบมาตราฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc ดำเนินการเซาะร่องโดยบริษัทสุธียูไนเต็ดคาร์บอน จำกัด

จากนั้นนำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตมาทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม โดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมม-เบรน (MEA) ที่มีแพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมมเบรนชนิด 115 และชั้นแพร่แก๊สเป็นผ้าคาร์บอนเปรียบเทียบผลกับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดแกร์ไฟต์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม

ขั้นตอนในการทดสอบประสิทธิภาพมีดังนี้

1. ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊ส (Flow field plate) ชนิดแกรไฟต์ของ Electrochem, Inc และแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร ประกบเข้าด้วยกันโดยใช้น็อต จากนั้นจึงใช้ประแจปอนด์เพื่อทำการอัดส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันโดยใช้โมเมนต์การหมุนที่ 40 ปอนด์แรง-นิ้วจะได้เซลล์เดี่ยวของเซลล์เชื้อเพลิง

2. ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงนั้น เมื่อตรวจสอบสภาพความเรียบร้อยของหน่วยทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์เชื้อเพลิงให้อยู่ในสภาพการทดสอบแล้ว ทดสอบหาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้กราฟโพลาไรเซชันและใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน 100 SCCM เท่ากัน ภาวะการให้ความชื้นอิ่มตัว อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง 60 องศาเซลเซียส

3. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-2 เปลี่ยนแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดแกรไฟต์ของ Electrochem, Inc เป็นแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดโลหะ และแผ่นช่องการไหลของแก๊สโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

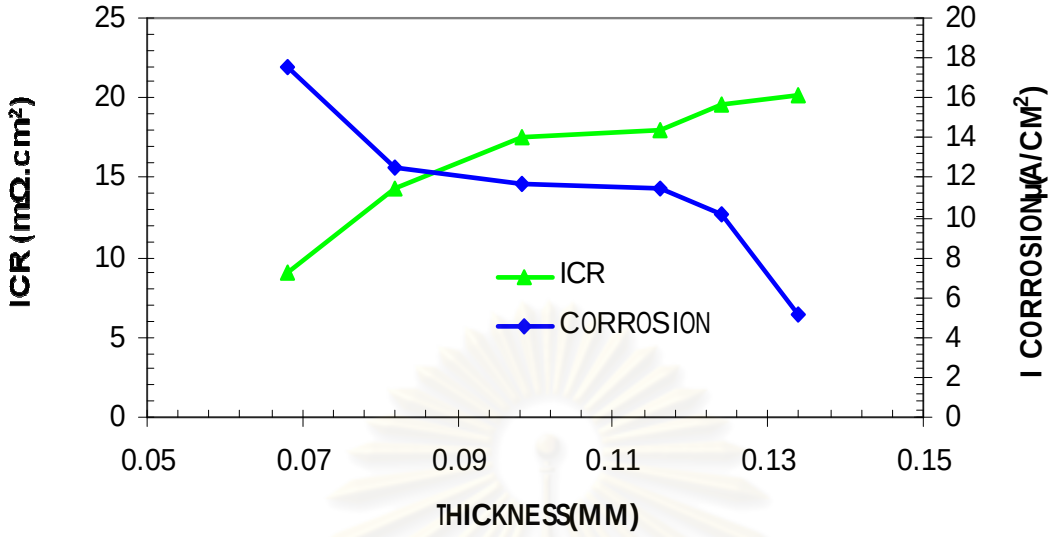
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต ซึ่งสารเคลือบจะประกอบด้วยสารนำกระแสไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบหลักเป็นผงแปรงถ่าน โดยศึกษาผลของปริมาณผงแปรงถ่าน ผลของสารช่วยยึดเกาะอะคริดิกเรซินและซิงก์เรซินชนิดและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติม และศึกษาสภาพนำกระแสไฟฟ้าในแนวทะลุผ่านด้วยวิธีการวัดเป็นค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR) ค่าการกัดกร่อนของชิ้นงาน และค่าการยึดติดของฟิล์มคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยสารเคลือบที่องค์ประกอบต่างๆ เพื่อใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของพรชัย [4] ได้ศึกษาสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่ความหนาต่างๆ กัน ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 โดยใช้องค์ประกอบของสารเคลือบคือผงแปรงถ่าน ซิงก์เรซินและตัวทำละลายโทลูอีนในอัตรส่วน 25:10:65 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อความหนาของสารเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานที่ผิวเชิงสัมผัสของแผ่นโลหะเคลือบเพิ่มขึ้นแต่ค่าการกัดกร่อนลดลง ทำให้ต้องกำหนดช่วงความหนาที่เหมาะสมเพื่อทำการทดลองที่องค์ประกอบของสารเคลือบต่างๆ ต่อไป ซึ่งช่วงความหนาที่มีสมบัติความต้านทานเชิงสัมผัสและการต้านทานการกัดกร่อนที่สมดุลกันคือช่วง 0.09-0.11 มิลลิเมตร ให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเท่ากับ 15-18 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร และค่ากระแสการกัดกร่อนประมาณ 12 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

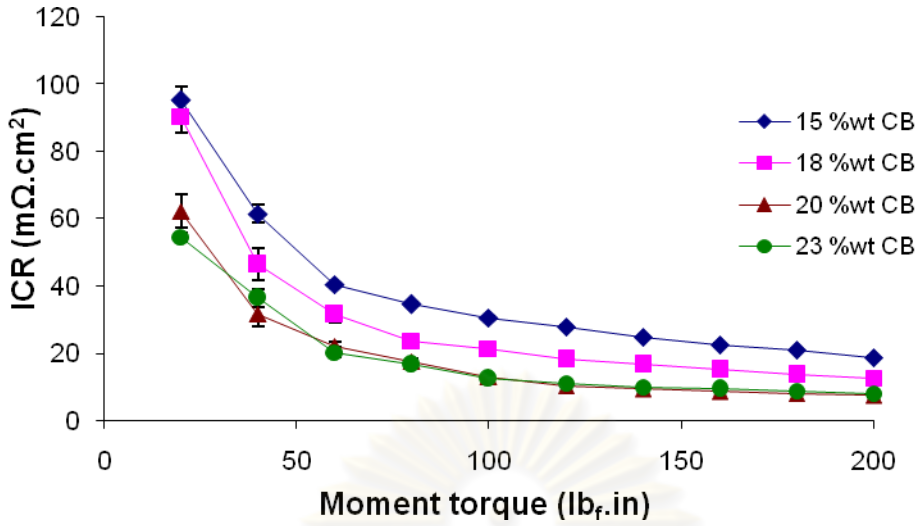
เมื่อนำภาวะการเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่ดีที่สุด ไปเคลือบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าและนำไปทดสอบใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็มพบว่า ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะที่ไม่ได้เคลือบซึ่งสารเคลือบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แผ่นโลหะโดยลดค่ากระแสกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับแผ่นโลหะได้ แต่ยังน้อยกว่าแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดแกรไฟต์ของ Electrochem, Inc ซึ่งการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเติมในวัสดุคาร์บอนคอมพอสิตอาจจะสามารถทำให้สมบัติการนำกระแสไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลดีขึ้นได้ จึงได้ทำการทดลองผสมท่อนาโนคาร์บอนกับผงแปรงถ่านและตัวประสานในการเคลือบแผ่นโลหะเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยสารเคลือบประกอบด้วยผงแปรงถ่าน (CB): ซิงก์เรซิน: ตัวทำละลายโทลูอีน ในอัตราส่วน 25:10:65 โดยน้ำหนักที่ความหนาในการเคลือบผิวต่างๆ [4]

4.1 การศึกษาผลของปริมาณผงแปรงถ่านในสารเคลือบต่อสมบัติของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน

ในการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานโดยใช้ผงแปรงถ่านเป็นองค์ประกอบหลักโดยกำหนดความหนาของฟิล์มให้อยู่ในช่วง 0.09-0.11 มิลลิเมตร และมีการเพิ่มท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมซึ่งแทนที่ในส่วนของตัวทำละลาย ต้องคำนึงถึงปริมาณรวมของคาร์บอนที่เกิดจากผงแปรงถ่านผสมกับท่อนาโนคาร์บอนด้วย เนื่องจากเมื่อองค์ประกอบรวมของคาร์บอนมากขึ้นจะทำให้สารเคลือบมีความหนืดสูงขึ้น เมื่อทำการฉีดพ่นสารหัวฉีดจะเกิดการอุดตัน ดังนั้น จึงศึกษาปริมาณของผงแปรงถ่านเพื่อหาช่วงที่มีสมบัติทางด้านการนำไฟฟ้าที่เหมาะสำหรับการฉีดพ่นสารและเตรียมการเพิ่มท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติม ดังแสดงในรูปที่ 4.2



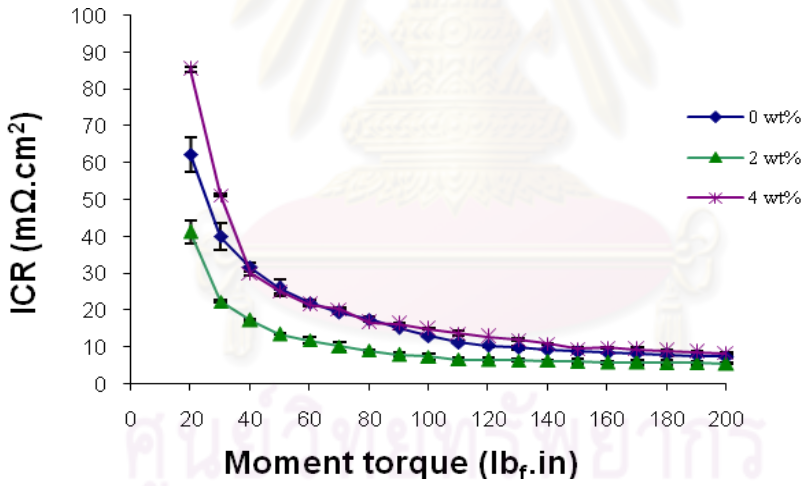
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต โดยใช้ผงแปรงถ่าน (CB) เคลือบในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน ที่โมเมนต์ทอร์กในการอัดชิ้นงานต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตจะลดลงในทุกภาวะการเคลือบเมื่อเพิ่มค่าแรงอัดให้แก่ชิ้นงานในช่วงแรกจากนั้นจึงเริ่มคงที่และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของผงแปรงถ่านเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15 - 20 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อปริมาณผงแปรงถ่านเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 20 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพรชัยและคณะ [4] ที่ทำการทดลองเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมที่ปริมาณผงแปรงถ่านร้อยละ 20 กับ 25 แล้วให้ผลค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ใกล้เคียงกัน จึงเลือกการใช้ผงแปรงถ่านที่ร้อยละ 20 ในการทดลองเพิ่มท่อนาโนคาร์บอน เพื่อลดโอกาสการอุดตันของหัวฉีด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดการนำไฟฟ้าต่ำเป็นสารตัวเติม

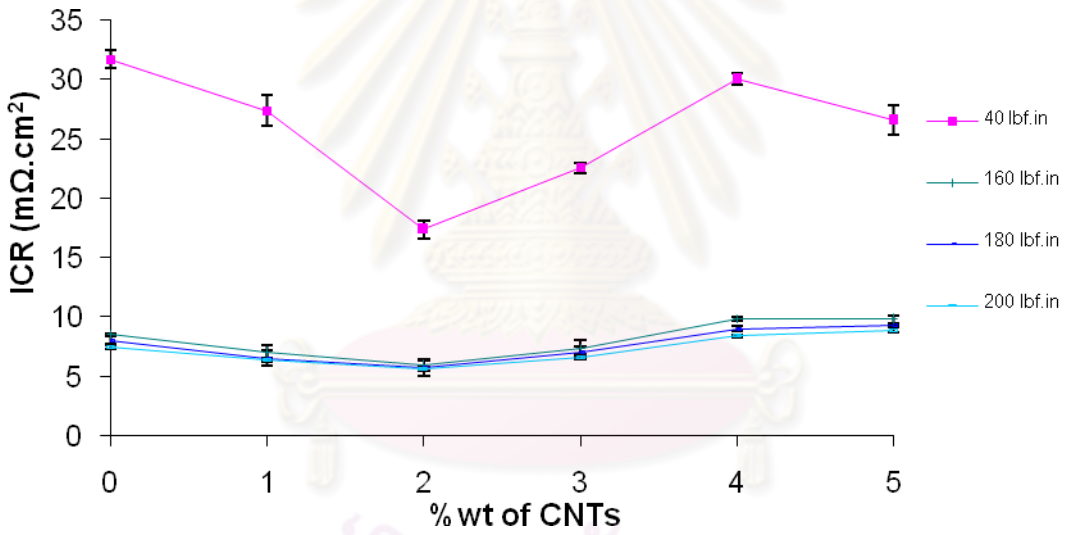
ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีและสามารถเข้ากันกับผงคาร์บอนได้ จึงได้มีการศึกษาการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าต่ำเป็นสารตัวเติมสำหรับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต ในรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน เมื่อใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารตัวเติมในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน โดยในการวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจะใช้โมเมนต์ทอร์กในการอัดชิ้นงานในช่วง 20-200 ปอนด์แรง-นิ้ว โดยองค์ประกอบหลักของสารเคลือบคือผงแปรงถ่าน ซิงก์เรซินและตัวทำละลายโทลูอีน ร้อยละ 20, 10 และ 70 ตามลำดับ การเพิ่มท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าต่ำนั้นเป็นการแทนที่องค์ประกอบของโทลูอีนที่ใช้เป็นตัวทำละลาย



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต กับโมเมนต์ทอร์กในการอัดชิ้นงานค่าต่างๆ โดยสารเคลือบมีซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าต่ำที่ร้อยละ 0, 2 และ 4 โดยน้ำหนัก

ผลการทดลองพบว่า เมื่อการเพิ่มโมเมนต์ทอร์กในการอัดชิ้นงานพบว่าค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงจนเริ่มคงที่ในช่วง 160-200 ปอนด์

แรง-นิ้ว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองตอนต้น (4.1) เนื่องจากการเพิ่มแรงอัดให้แก่ชิ้นงานเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่การสัมผัสของชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านได้มากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกค่าโมเมนต์ทอร์กที่ 200 ปอนด์แรง-นิ้ว ที่เป็นช่วงที่ความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นตัวอย่างมีค่าคงที่มากที่สุด เป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงสัมผัสในแต่ละตัวอย่างที่เตรียมได้ต่อไป ส่วนในกรณีที่มีการใช้สารตัวเติม พบว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสลดลง เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีการใช้สารตัวเติม จึงต้องทำการทดลองในช่วงที่ละเอียดขึ้น โดยทำการทดลองเติมสารตัวเติมตั้งแต่ร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4



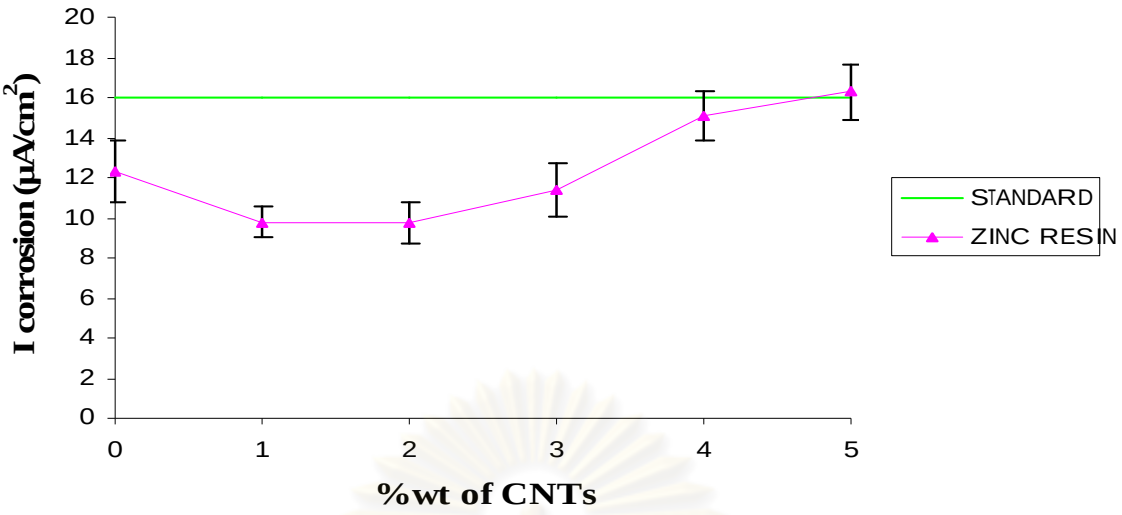
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต โดยสารเคลือบมีซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าต่ำที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ กับโมเมนต์ทอร์กในการอัดชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.4 เมื่อเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนในสารเคลือบเป็นร้อยละ 2 ทำให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสลดลงมากที่สุดในทุกๆ โมเมนต์ทอร์กที่ใช้อัดตัวอย่าง ซึ่งที่โมเมนต์ทอร์ก 40 ปอนด์แรง-นิ้ว เป็นภาวะที่จำลองมาจากการใช้งานจริงในเซลล์เชื้อเพลิง พบว่า ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเมื่อเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนในสารเคลือบ

เป็นร้อยละ 2 จะมีค่า 17.3 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ส่วนที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรง-นิ้ว ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจะลดลงจากกรณีที่ไม่มีการเติมจาก 7.47 เป็น 5.63 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร แต่เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นเกินกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะเกิดการเกาะตัวกันเอง เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติการกระจายตัวในสารละลายที่ต่ำ ทำให้สารเคลือบบนเหล็กกล้าไร้สนิมไม่เรียบส่งผลให้มีสมบัติที่ไม่ดีเท่ากับกรณีที่มีการเติมที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma และคณะ [5] ทำวัสดุผสมนาโนโดยใช้อีพอกซีเรซินเป็นตัวช่วยยึดเกาะเตรียมโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) และเขม่าดำ (CB) พบว่าวัสดุนาโนที่ผสมเขม่าดำ (CB) และท่อนาโนคาร์บอนให้สมบัติการนำกระแสไฟฟ้าที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและให้สมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเติมที่อัตราส่วนร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของสารตัวเติมทั้งสองชนิด ซึ่งความแตกต่างของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เติมน่าจะมาจากขนาดของผงคาร์บอนที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งในงานวิจัยของ Ma ขนาดของผงคาร์บอนอยู่ในระดับนาโนเมตร (20- 60 นาโนเมตร) เมื่อเทียบกับงานวิจัยนี้ซึ่งใช้ผงคาร์บอนที่มีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร (11 ไมโครเมตร) การเติมท่อนาโนคาร์บอนจะมีการกระจายตัวที่ดีกว่า แต่เมื่อปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนมากขึ้นสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าจะเริ่มคงที่

จากนั้นนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตโดยมีซิงก์เรซินเป็นตัวประสานไปทดสอบค่าอัตราการกัดกร่อนกับกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณน้อยๆ ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก สามารถช่วยลดค่ากระแสกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 9-11 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ค่ากระแสกัดกร่อนที่วัดได้มีแนวโน้มสูงขึ้นจนปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากระแสกัดกร่อนจะสูงกว่า 16 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานสำหรับวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว

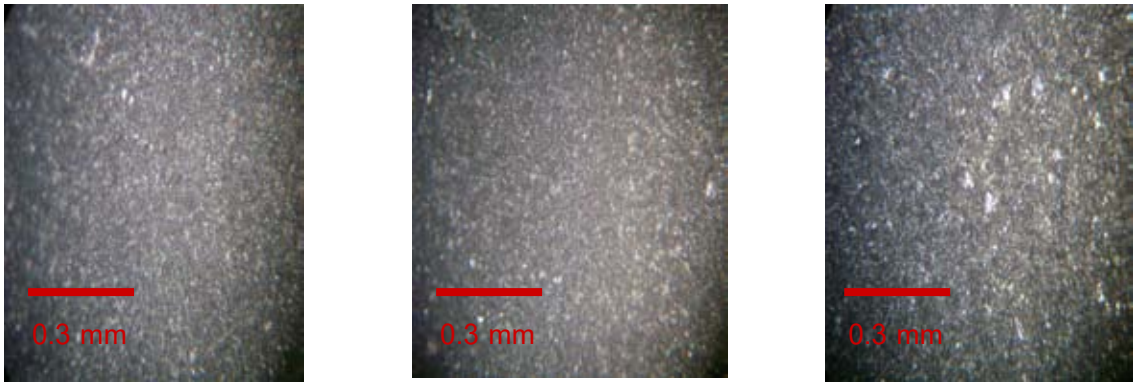
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต โดยสารเคลือบมีซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ

จากการศึกษาความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน พบว่า การใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่ำๆ สามารถปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าและการต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบให้ดีขึ้นกว่ากรณีที่ใช้ผงแปรงถ่านเพียงอย่างเดียว เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างกลุ่มของผงแปรงถ่าน เกิดเป็นโครงสร้างแบบโครงข่ายขึ้นทำให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าแบบสามมิติ [5] นอกจากนั้นท่อนาโนคาร์บอนยังทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวช่วยยึดเกาะอนุภาคภายในของสารเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตทำให้โครงสร้างภายในมีความแข็งแรงขึ้นส่งผลให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบมีค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น [25]

แต่เมื่อมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักส่งผลให้สมบัติของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบไม่ดีเนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติการกระจายตัวในสารละลายที่ต่ำ เมื่อมีปริมาณสูงจะเกิดการเกาะตัวกันเองเกิดเป็นช่องว่างในสารเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่เคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้ทางเดินของอิเล็กตรอนไม่ต่อเนื่องค่าการต้านทานเชิงสัมผัสที่ได้จึงมีค่าสูง และการเกาะตัวกันยังทำให้ผิวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบไม่เรียบสม่ำเสมอ มีลักษณะเป็นช่องว่างที่สามารถมองทะลุลงไปยังแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



(A) (B) (C)

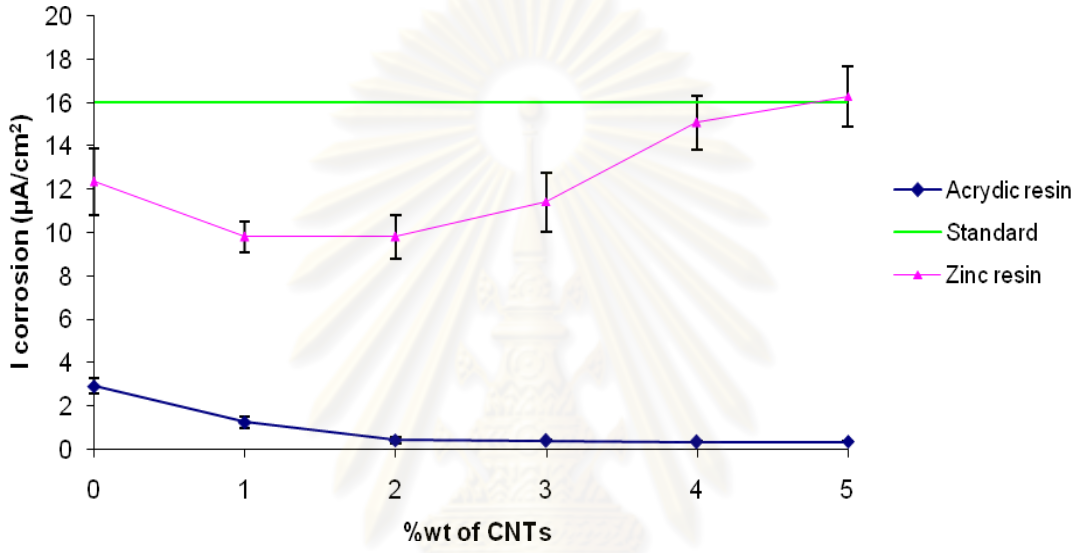
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์ (A) ไม่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน, (B) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักและ (C) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

เมื่อนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 4-5 โดยน้ำหนัก ไปทดสอบกับสารละลายกรดซัลฟิวริกผิวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมบริเวณช่องว่างของฟิล์มคาร์บอนคอมพอสิตที่เคลือบจะสัมผัสกับกรดโดยตรงทำให้ค่ากระแสกัดกร่อนที่ได้มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมและการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณน้อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และ Lim [27] เมื่อองค์ประกอบของคาร์บอนในคอมพอสิตมากเกินกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จะทำให้วัสดุคอมพอสิตเกิดรอยแตกระดับไมโครเมตร (Microcrack) ขึ้น ส่งผลให้สมบัติการต้านทานการกัดกร่อนแย่ลงเมื่อใช้องค์ประกอบของคาร์บอนเกินกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

ในงานวิจัยที่ผ่านมาของพรชัย [4] พบว่า ค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานและเมื่อนำมาทดสอบสมรรถภาพการใช้งานจริงกับเซลล์เชื้อเพลิงยังเกิดการหลุดลอกของฟิล์มคาร์บอนคอมพอสิตที่เคลือบและประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้ แต่เมื่อมีการใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้งานซ้ำ ดังนั้นการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมยังต้องการค่ากระแสกัดกร่อนที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน (16 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) มากกว่าการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน จึงได้มีการทดลองกับอะคริดิกเรซินที่มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่ามาใช้เป็นตัวประสานในการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมแทน

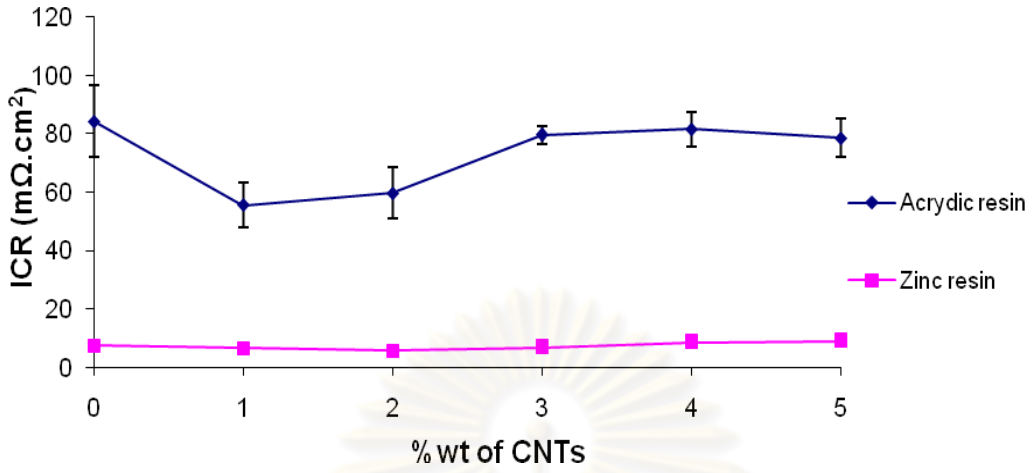
4.3 ผลของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสาน

อะคริดิกเรซินซึ่งเป็นสารอนุพันธ์ของอะคริลิก ถูกนำมาใช้เป็นตัวประสานในการเคลือบผิวโลหะแทนที่ซิงก์เรซินเพื่อลดค่ากระแสกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต และมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารตัวเติม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตกับร้อยละของท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าต่ำที่ใช้เป็นสารตัวเติม โดยใช้ตัวประสานที่ต่างกันคือ ซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน

จากรูปที่ 4.7 พบว่าการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานในการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าต่ำ Chiangmai (A) ให้ค่ากระแสกัดกร่อนอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 3 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและต่ำกว่าค่ามาตรฐานของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นนำกระแสแบบสองขั้วมาก เนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของอะคริดิกเรซินซึ่งทนต่อการกัดกร่อนได้ดี จึงคาดว่าเมื่อนำไปใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงจริงจะเกิดการหลุดลอกของฟิล์มน้อยลง นำไปสู่อายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นแต่ยังต้องคำนึงถึงสมบัติทางด้านการนำไฟฟ้าของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วย ซึ่งผลการทดลองค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีอะคริดิกเรซินเป็นตัวประสาน แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ตัวประสานต่างชนิดกันคืออะคริดิกเรซินและซิงก์เรซิน กับร้อยละการเติมท่อนาโนคาร์บอนโดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบที่ใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานอยู่ในช่วงมากกว่า 60 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานมาก เนื่องจากสมบัติการนำไฟฟ้าของอะคริดิกเรซินมีค่าต่ำ แต่การใช้อะคริดิกเรซินมีข้อดีคือต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีจึงได้มีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง (100 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) แทนที่ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ (1.25 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) เพื่อให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่ได้มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นและยังคงมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

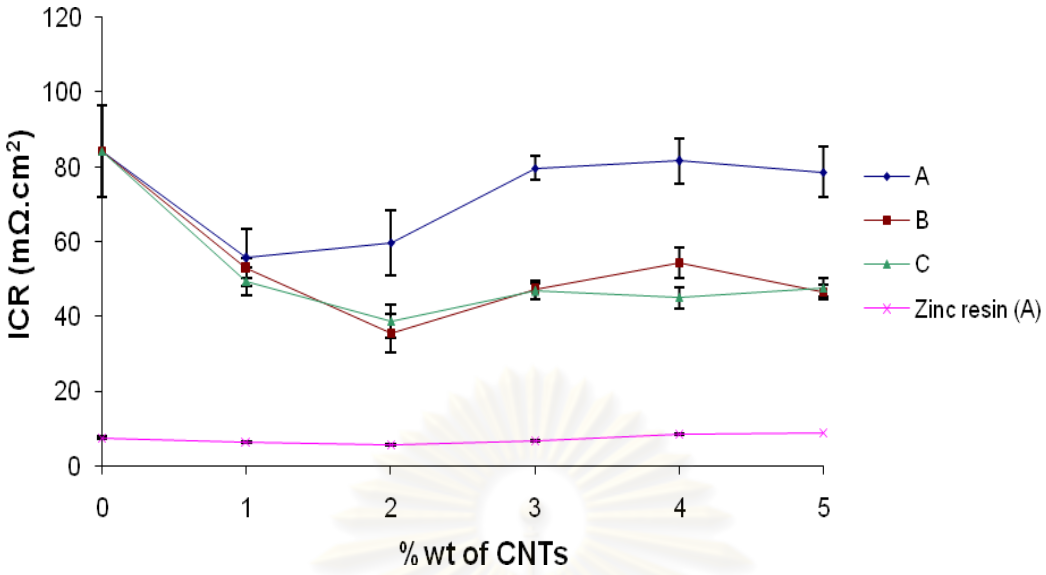
ตารางที่ 4.1 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆที่ใช้เป็นสารตัวเติม

	Chiangmai (A)	Timesnano 1 (B)	Timesnano 2 (C)
OD (nm)	20-50	30-50	30-50
Length (μm)	>10	10-20	10-20
EC (s/cm)	1.25	>100	>100
Purity(wt%)	90	95	95
-COOH Content (wt%)	-	-	0.73
Cost 1 g (baht)	10	90	130

ในตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมทั้งสามชนิดคือ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าต่ำ Chiangmai (A) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano 2 (C) ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลิกนี้จะช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนซึ่งมีค่าการกระจายตัวในสารละลายที่ต่ำสามารถกระจายได้ดีขึ้น [24] แต่การเติมท่อนาโนคาร์บอนมีข้อจำกัดเมื่อมีการเติมในปริมาณมากๆ การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนจะไม่ดี จึงต้องทำการทดลองหาปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้สมบัติทางด้านการนำไฟฟ้าและการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี

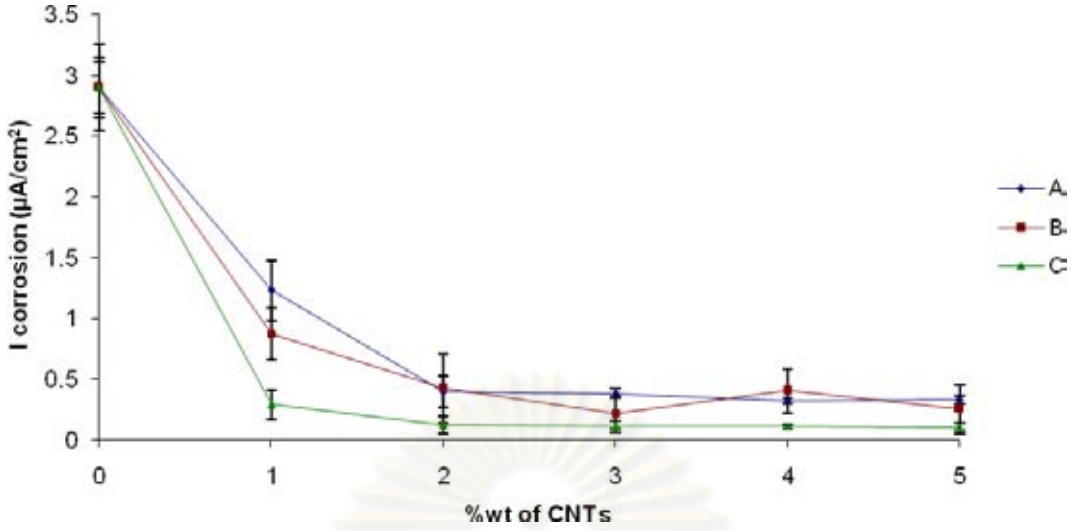
4.4 ผลของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงเมื่อใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสาน

เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติม เพื่อปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต โดยได้ทำการวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตกับชนิดของท่อนาโนคาร์บอนทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้เป็นสารตัวเติมในร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ

จากรูปพบว่าการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano 2 (C) เป็นสารตัวเติมในการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอนคอมพอสิต สามารถลดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบจากกรณีที่ไม่มีการใช้สารตัวเติมและกรณีที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าต่ำ Chiangmai (A) ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงทั้งสองชนิดให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตลดลงได้มากที่สุด คือลดลงจาก 59.6 มาเป็น 35.5 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร เมื่อใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) เป็นสารตัวเติมที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แต่การปรับปรุงสภาพนำไฟฟ้าของอะคริดิกเรซินโดยการใช้ใช้ท่อนาโนคาร์บอนทั้งสามชนิดยังไม่สามารถลดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสให้ใกล้เคียงกับการใช้ซิงก์เรซินได้ เนื่องจากค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเป็นผลมาจากสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าเฉพาะตัวของประสานแต่ละชนิดมากกว่าชนิดและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน

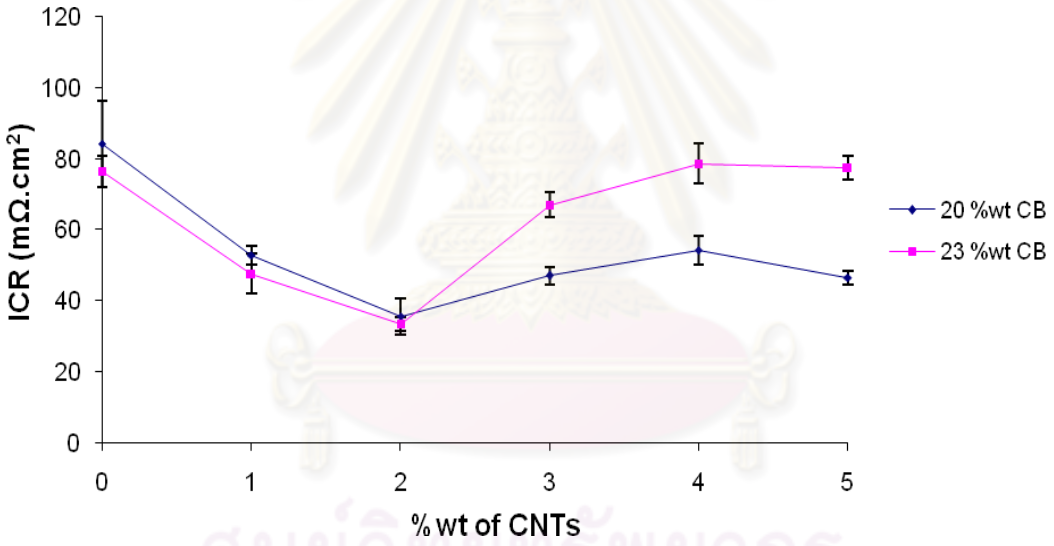


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตกับชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมในร้อยละการเติมโดยน้ำหนักต่างๆ

เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมในการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอนคอมพอสิต จึงได้นำไปทดสอบอัตราการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano (C) สามารถลดค่ากระแสกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตได้เพียงเล็กน้อย ส่วนกรณีของท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูงมีค่ากระแสกัดกร่อนใกล้เคียงกับท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าต่ำ (รูปที่ 4.10) ทั้งนี้เนื่องจากผลของตัวประสานส่งผลต่อค่ากระแสกัดกร่อนมากกว่าสารตัวเติม และท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติที่แตกต่างกันทางด้านการนำไฟฟ้ามากกว่าการต้านทานการกัดกร่อน จึงได้ทำการทดลองเพิ่มปริมาณผงแปรงถ่านเพื่อปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิต

4.5 ผลของการเพิ่มปริมาณผงแปรงถ่านต่อค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต

จากการทดลองเปลี่ยนชนิดของท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) เพื่อลดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสาน แต่ยังไม่ดีเท่ากับการใช้ซิงก์เรซิน จึงต้องมีวิธีการอื่นมาช่วยในการปรับปรุง ซึ่งวิธีการเพิ่มปริมาณผงแปรงถ่านมีความน่าจะเป็นไปได้ แต่การเพิ่มปริมาณของผงแปรงถ่านต้องคำนึงถึงองค์ประกอบรวมของคาร์บอนทั้งหมดในสารเคลือบเพื่อไม่ให้สารเคลือบมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อตัวประสานที่สูงเกินไป จึงเลือกการเติมที่ร้อยละ 23 โดยน้ำหนักเพื่อเหลือปริมาณในการเติมท่อนาโนคาร์บอนด้วย จากนั้นนำไปทดสอบค่าความต้านทานเชิงสัมผัส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตกับปริมาณของผงแปรงถ่านเมื่อมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ในร้อยละการเติมโดยน้ำหนักต่างๆ

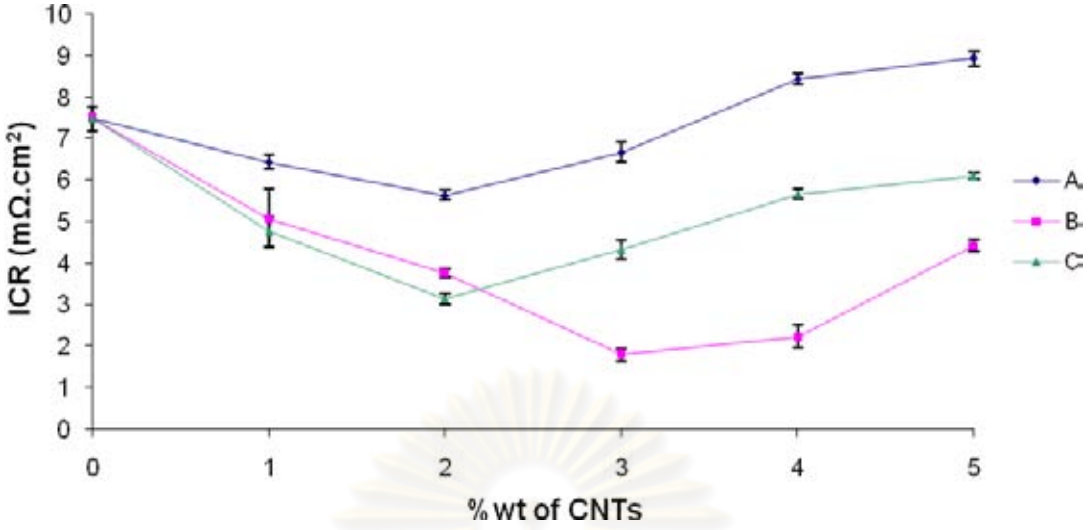
จากรูปที่ 4.11 พบว่าการเพิ่มปริมาณผงแปรงถ่านเป็นร้อยละ 23 โดยน้ำหนัก ในสารเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต สามารถลดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นโลหะเคลือบได้เพียงเล็กน้อย และการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบมีค่าไม่แตกต่างจาก

การใช้ผงแปรงถ่านร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ส่วนในช่วงที่มากกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบจะมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่มากขึ้น เนื่องจากปริมาณที่จำกัดของตัวประสาน เมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนของคาร์บอนต่อตัวประสาน เมื่อปริมาณคาร์บอนมากขึ้นแต่ปริมาณของตัวประสานเท่าเดิม ทำให้ตัวประสานที่ช่วยยึดเกาะระหว่างคาร์บอนกับผิวเหล็กกล้าไร้สนิมไม่เพียงพอ ผิวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบจึงมีช่องว่างเกิดขึ้น นำไปสู่สมบัติการนำไฟฟ้าที่ไม่ดี

อะคริดิกเรซินเมื่อใช้เป็นตัวประสานในการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอนคอมพอสิตแล้ว สามารถให้ค่าอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานสำหรับทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วมาก ซึ่งคาดว่าจะเหมาะสมกับการใช้งานจริงในเซลล์เชื้อเพลิง แต่ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสสูงจึงใช้วิธีต่างๆที่ได้ทำการทดลองมาข้างต้นในการปรับปรุงแต่ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสยังคงมีค่าสูงอยู่ จึงเปลี่ยนกลับมาใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน เพื่อศึกษาสมบัติทางด้านการต้านทานการกัดกร่อนและการนำไฟฟ้าเมื่อมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano 2 (C)

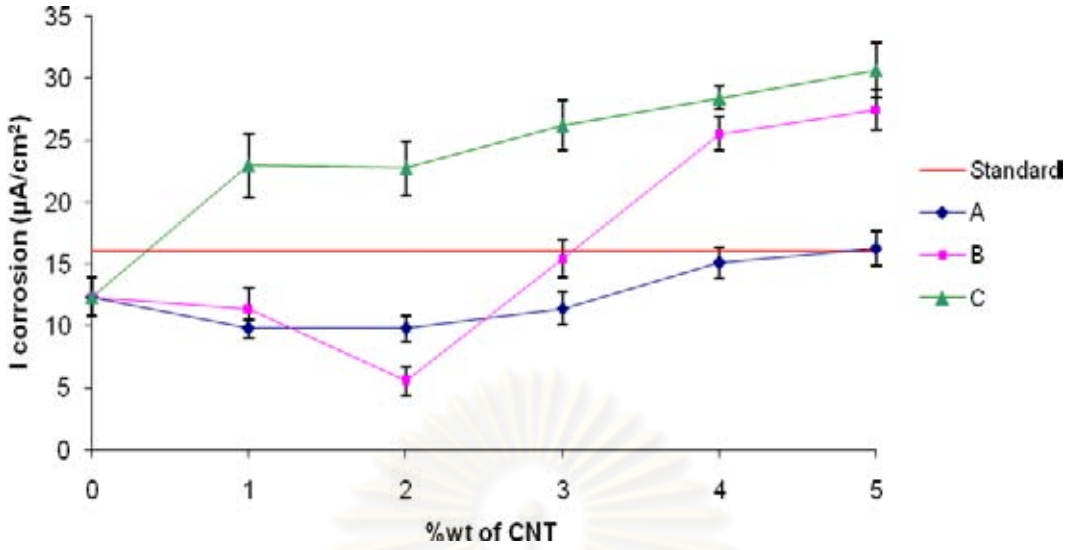
4.6 ผลของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงเมื่อใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน

การใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานในการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอนคอมพอสิตนั้น ให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ต่ำ แต่ค่ากระแสกัดกร่อนมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานจากการทดลองใน 4.3 พบว่า เมื่อมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารตัวเติมสามารถช่วยลดค่ากระแสกัดกร่อนลงมาได้ระดับหนึ่งจึงคาดว่าการหลุดลอกของฟิล์มหลังจากการทดสอบประสิทธิภาพในเซลล์เชื้อเพลิงจริงน่าจะลดลง จึงหันมาสนใจในการเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นโลหะเคลือบโดยการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงทั้งสองชนิด เพื่อให้ประสิทธิภาพของการใช้งานจริงในเซลล์เชื้อเพลิงสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานกับชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมในร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 พบว่า การใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano 2 (C) ในกรณีที่ใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน สามารถช่วยลดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสได้จากกรณีที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำเป็นสารตัวเติม โดยการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano 2 (C) ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานเชิงสัมผัส 3.12 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร และการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานเชิงสัมผัส 1.78 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ซึ่งภาวะที่ดีที่สุดนี้เปลี่ยนมาจากการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้มีสภาพการนำไฟฟ้าที่สูง ถึงแม้ว่าการเติมที่ปริมาณร้อยละ 3 และ 4 โดยน้ำหนัก อาจจะเกิดการเกาะตัวกันขึ้นภายในสารเคลือบ ฟิล์มที่เคลือบแผ่นโลหะก็ยังคงมีสภาพการนำไฟฟ้าที่สูงอยู่



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยสารเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานกับชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้เป็นสารตัวเติมในร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ

จากนั้นนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงเป็นสารตัวเติมและใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน มาทดสอบอัตราการกัดกร่อน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า การเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) สามารถช่วยลดค่ากระแสกัดกร่อนได้ เมื่อเติมในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยได้ค่ากระแสกัดกร่อนที่ 5 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนที่สามารถเข้าผสมกับผงแปรงถ่านได้จะช่วยเชื่อมโยงกับกลุ่มของผงแปรงถ่านจะทำให้เกิดโครงสร้างแบบตาข่ายขึ้นทำให้การเคลือบได้ดีและสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยป้องกันกรดที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยากับผิวโลหะได้ดีขึ้น แต่เมื่อมีการเติมในช่วงที่มากกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะทำให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบมีแนวโน้มของค่ากระแสกัดกร่อนที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนของคาร์บอนต่อเรซินที่มากขึ้น ส่วนในกรณีของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano (C) เป็นสารตัวเติม พบว่า เมื่อมีการเติมจะทำให้ค่ากระแสกัดกร่อนมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานในทุกปริมาณของการเติม เนื่องจากอาจจะมีการหลุดหรือแตกตัวออกมาของหมู่คาร์บอกซิลิกที่มีการสังเคราะห์ลงบนท่อนาโนคาร์บอน จึงได้มีการทดสอบวัดค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์หลังจากที่มีการจุ่มแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ เมื่อจุ่มแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารตัวเติมที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ

ร้อยละของการเติมท่อนาโนคาร์บอนโดยน้ำหนัก	0	1	2
H_2O + CNTs	7.20	7.21	7.21
H_2O + CNTs -COOH	7.23	7.21	7.19
H_2SO_4 0.1 M + CNTs	1.23	1.26	1.27
H_2SO_4 0.1 M + CNTs –COOH	1.21	1.07	0.97

จากตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อทำการทดสอบกับน้ำบริสุทธิ์พบว่าค่าความเป็นกรดเบสมีแนวโน้มเปลี่ยนไปทางความเป็นกรดเล็กน้อย เมื่อมีการจุ่มแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano 2 (C) เป็นสารตัวเติม แต่เมื่อนำแผ่นโลหะเคลือบมาจุ่มในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ จะทำให้ค่าความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มขึ้นจึงเป็นผลให้ค่ากระแสกัดกร่อนที่ได้ในรูปที่ 4.13 มีค่าสูงขึ้นในทุกกรณีที่มีการเติม ส่วนการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายมากนัก

4.7 ผลของสมบัติการยึดติดของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงเมื่อใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน

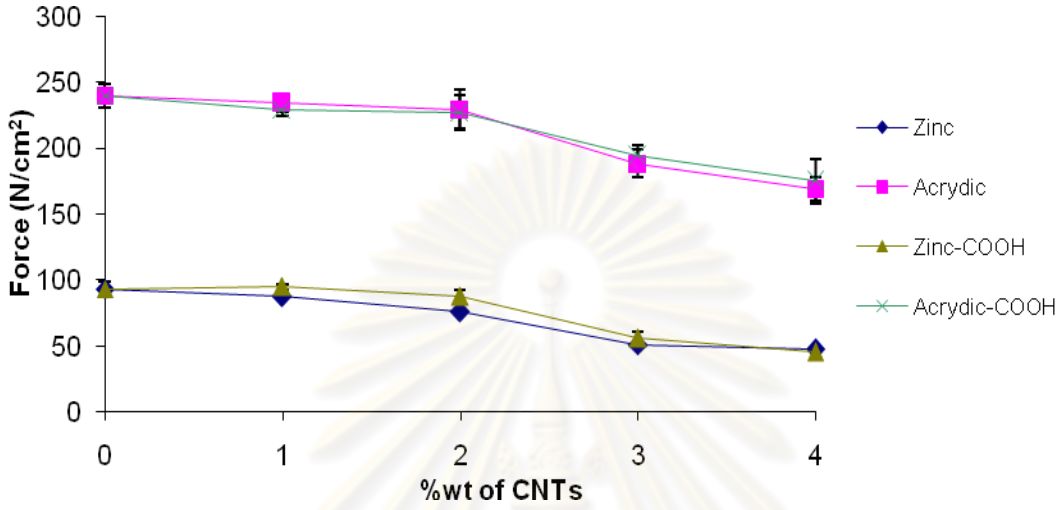
สมบัติการยึดติดของฟิล์มคาร์บอนคอมพอสิตมีความสำคัญต่อการเคลือบผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการนำไปใช้งานจริงในเซลล์เชื้อเพลิงเนื่องจากต้องรับแรงอัดในการประกอบเซลล์ ค่าการยึดติดที่ดีของฟิล์มจะแสดงถึงความเสถียรของแผ่นโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต เมื่อถูกนำไปใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง

(A) (B) (C)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ปริมาณต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์ (A) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก, (B) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและ (C) เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก หลังจากการทดสอบค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว

จากรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ผิวฟิล์มที่เคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมยังคงมีสภาพที่ดีหลังจากการทดสอบค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว แต่เมื่อปริมาณคาร์บอนที่ใช้เติมสูงขึ้นที่ร้อยละ 3 (B) และ 4 (C) หลังจากทำการทดสอบ ผิวฟิล์มจะเกิดการแตกและหลุดลอกขึ้นจนเห็นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมว่าไม่ถูกยึดเกาะด้วยตัวประสาน การเติมที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการเติมท่อนาโนคาร์บอนเพื่อนำไปเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อใช้งานจริงในเซลล์เชื้อเพลิง

จากนั้นได้ทำการทดสอบการต้านแรงดึงของฟิล์มคาร์บอนคอมพอสิตที่เคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงทั้งสองชนิด และเปรียบเทียบแรงดึงระหว่างซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน โดยจะวัดค่าเมื่อฟิล์มคาร์บอนคอมพอสิตถูกดึงจนหลุด ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าแรงที่ใช้ดึงฟิลม์ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) โดยสารเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ตัวประสานชนิดต่างๆกับการเติมท่อนาโนคาร์บอนในร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ

จากผลการทดลองการต้านแรงดึงของฟิล์มพบว่าการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานในการเคลือบผิวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมฟิล์มคาร์บอนคอมพอสิตจะทนต่อแรงดึงได้สูงกว่าการใช้ซิงก์เรซิน โดยให้ผลไม่แตกต่างกันเมื่อใช้ท่อนาคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงทั้งที่มีและไม่มีหมู่คาร์บอกซิลิก ในการเติมท่อนาโนคาร์บอนในช่วงร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อค่าแรงดึงมาก แต่แนวโน้มการทนต่อแรงดึงของฟิล์มคาร์บอนคอมพอสิตจะลดลงเมื่อปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้ง 2 ตัวประสาน ทั้งนี้ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองในการวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่แรงกดอัดที่สูงขึ้น (รูปที่ 4.14) ที่พบว่าเมื่อร้อยละของการเติมท่อนาโนคาร์บอนสูงขึ้น การเคลือบจะยึดติดไม่ดี

4.8 ผลของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้ตัวประสานที่มีการผสมกันระหว่างซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า ซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซินที่ใช้เป็นตัวประสานข้อดีคนละอย่างคือซิงก์เรซินมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ต่ำและมีค่าอัตราการกัดกร่อนที่ดีปานกลาง ส่วนอะคริดิกเรซินมีค่าอัตราการกัดกร่อนที่ดีมาก จึงมีแนวคิดที่จะนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้ซิงก์เรซิน และมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นภาวะที่มีค่าการต้านทานเชิงสัมผัสที่ต่ำที่สุด (1.7881 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ในรูปที่ 4.12) แต่ยังมีค่ากระแสกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน 15.4 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร นำมาเติมอะคริดิกเรซินเพื่อปรับปรุงค่าอัตราการกัดกร่อนให้ดีขึ้น ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตมีการใช้ตัวประสานที่มีการผสมกันระหว่างซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน

% Addition of acrydic	ICR ($m\Omega.cm^2$)	Corrosion rate ($\mu A/cm^2$)
0	1.78 ± 0.15	15.4 ± 1.48
3	9.15 ± 0.14	140 ± 15.25
6	12.50 ± 0.55	260 ± 35.15
9	15.28 ± 0.53	136 ± 12.24

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอะคริดิกเรซิน ซึ่งแนวโน้มเป็นไปตามสมบัติของอะคริดิกเรซิน แต่ค่ากระแสกัดกร่อนไม่ได้ลดลงตามอะคริดิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจาก

ปริมาณที่มากเกินไปของอะคริดิกเรซิน จึงได้ทำการทดลองลดปริมาณของอะคริดิกเรซินลงมาก ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าการความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตมีการใช้ตัวประสานที่มีการผสมกันระหว่างซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน เมื่อมีการเติมอะคริดิกเรซินในปริมาณต่ำ

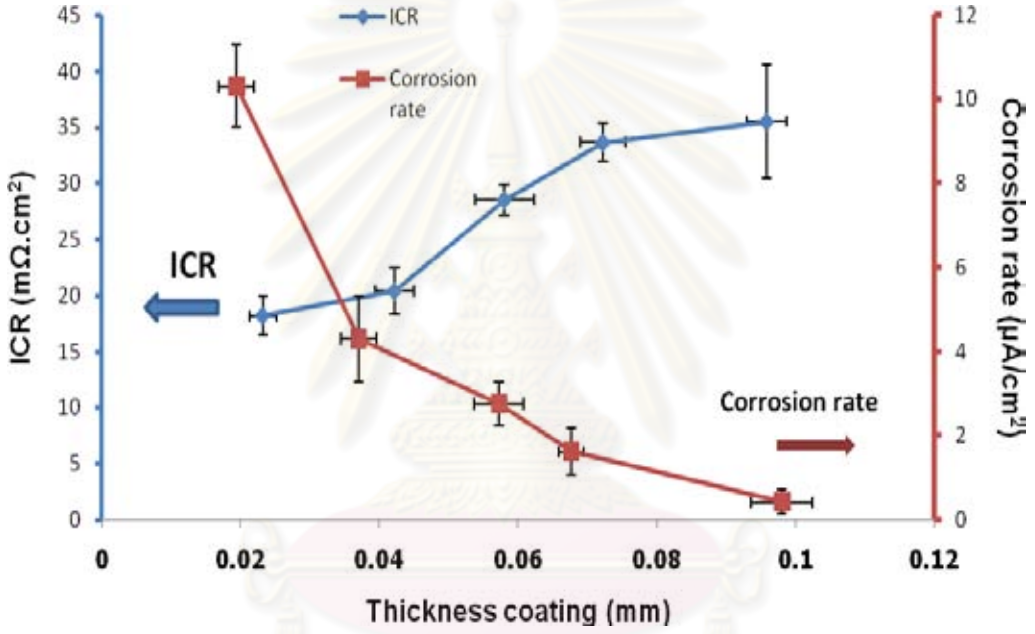
% Addition of acrydic	ICR ($m\Omega.cm^2$)	Corrosion rate μA/cm2
0	1.78 ± 0.15	15.4 ± 1.48
0.05	2.39 ± 0.31	16.6 ± 2.36
0.1	5.73 ± 0.78	25.3 ± 3.49
0.25	6.43 ± 1.32	35.8 ± 5.24
0.5	8.91 ± 1.39	40 ± 8.27
1	9.12 ± 0.55	48 ± 10.18

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอะคริดิกเรซินซึ่งเหมือนกับกรณีที่เติมในปริมาณมาก แต่ค่ากระแสกัดกร่อนยังคงไม่ได้ลดลงตามอะคริดิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลที่มาจากการไม่เข้ากันของเรซินทั้งสองชนิด จึงไม่ได้ผลของกระแสกัดกร่อนที่ลดลงตามที่ตั้งสมมติฐานไว้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.9 ผลของความหนาของการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานต่อค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อน

การลดความหนาของการเคลือบฟิล์มคาร์บอนคอมพอสิตที่มีการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นวิธีที่จะช่วยลดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นโลหะเคลือบได้ จึงได้ทำการทดลองที่ความหนาในช่วงที่ต่ำกว่า 0.09 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับซิงก์เรซิน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.16

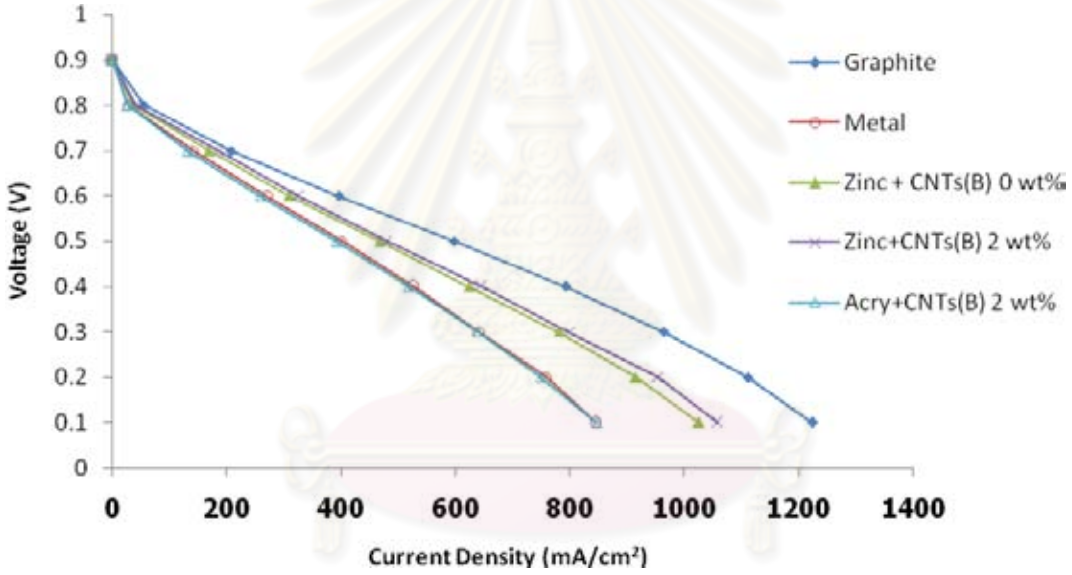


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความหนาของการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอนคอมพอสิตเมื่อมีการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานต่อค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและอัตราการกัดกร่อน

ผลการทดลองพบว่า ค่ากระแสกัดกร่อนจะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อความหนาของการเคลือบแผ่นโลหะต่ำกว่า 0.035 มิลลิเมตร เนื่องจากฟิล์มที่เคลือบบางเกินไปทำให้กรดทะลุเข้ามาทำปฏิกิริยากับแผ่นโลหะได้ง่าย และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจะมีค่าที่ต่ำใกล้เคียงกัน เมื่อความหนาอยู่ในช่วง 0.022-0.043 มิลลิเมตร แต่ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสยังมีค่าสูงกว่าการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานอยู่ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปทดสอบประสิทธิภาพในเซลล์เชื้อเพลิง

4.10 การทดสอบสมรรถนะเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตจากงานวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตในเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEM ใช้แผ่นช่องการไหลของแก๊ส ชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ได้จากงานวิจัย 2 แผ่นและแผ่นอิเล็กโทรดประกอบเมมเบรน (MEA) ขนาดพื้นที่ทำปฏิกิริยา 5 ตารางเซนติเมตร แพลทินัม 0.4 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมมเบรนชนิด 115 เปรียบเทียบกับแผ่นช่องการไหลของแก๊สชนิดแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc โดยแสดงผลเป็นกราฟโพลาไรเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.17



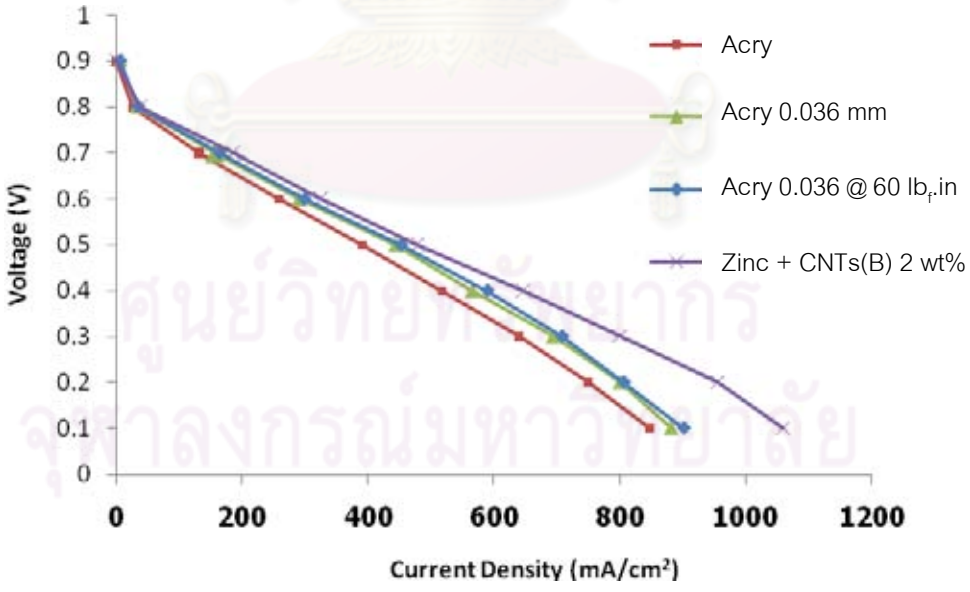
รูปที่ 4.17 โพลาไรเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะ เปรียบเทียบกับชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc

จากรูปที่ 4.17 พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและไม่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน จะให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (310.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) น้อยกว่าเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc (395.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) แต่มีค่ามากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะ (270.4

มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของพรชัย [4] เมื่อทำการทดสอบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบโดยใช้ภาวะการเคลือบที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่า ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 325.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และ 259 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อใช้ซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานตามลำดับ

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิต พบว่า เมื่อมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อยในกรณีของการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานซึ่งเป็นผลมาจากค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน (รูปที่ 4.12) แต่ในกรณีของอะคริดิกเรซินพบว่าค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่สูง (รูปที่ 4.9) ทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยกว่าการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน

จากการทดลองหาความหนาที่เหมาะสมของการเคลือบโดยใช้อะคริดิกเป็นตัวประสานในหัวข้อ 4.9 พบว่า ที่ความหนา 0.036 มิลลิเมตร ให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่ากระแสกัดกร่อนต่ำ (รูปที่ 4.16) ดังนั้นจึงทดสอบสมรรถนะของแผ่นเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตโดยใช้อะคริดิกเป็นตัวประสานที่ความหนาดังกล่าว ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 โพลาไรเซชันของชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานที่ความหนาในการเคลือบแผ่นโลหะและแรงอัดเซลล์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.18 พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เมื่อลดความหนาของการเคลือบลงมาที่ 0.036 มิลลิเมตร ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 290.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ที่ความหนาของการเคลือบอยู่ในช่วง 0.09-0.11 มิลลิเมตร (259 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ลดลงเมื่อความหนาในการเคลือบแผ่นโลหะลดลง ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มแรงอัดให้แก่เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวจาก 40 เป็น 60 ปอนด์แรงนิ้ว ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 299.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แม้ว่าจะเพิ่มแรงอัดแก่เซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวเพื่อลดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านได้มากขึ้น แต่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ยังน้อยกว่าการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดสภาพนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักในการเคลือบแผ่นโลหะ (325.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของอะคริดิกเรซินที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ต่ำ ทำให้การเพิ่มแรงอัดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวส่งผลต่อค่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ต่างกันของตัวประสานทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงดังในรูปที่ 4.9 และ 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเคลือบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคาร์บอน/เรซินคอมพอสิตโดยมีการใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารตัวเติมที่ความหนาของการเคลือบ 0.09-0.11 มิลลิเมตร และใช้ตัวประสานเป็นซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซิน

เมื่อทำการศึกษาค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของสารเคลือบที่ประกอบด้วย ผงคาร์บอน ซิงก์เรซิน และ ตัวทำละลายโทลูอีน ศึกษาปริมาณผงแปรงถ่าน (CB) ที่ใช้ พบว่าค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงแปรงถ่านจนคงที่ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดลองเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณร้อยละต่างๆ พบว่า การเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดค่าการนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano 2 (C) จะทำให้แผ่นโลหะเคลือบคาร์บอนคอมพอสิตมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสต่ำกว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดค่าการนำไฟฟ้าต่ำ Chiangmai (A) และการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักจะให้ผลที่ดีของค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่ากระแสกัดกร่อน แต่เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นเกินกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะทำให้สมบัติของแผ่นโลหะเคลือบไม่ดี เนื่องจากเมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนสูงขึ้น จะเกิดการเกาะตัวกันเองทำให้สารเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมไม่เรียบส่งผลให้มีสมบัติที่ไม่ดีเท่ากับกรณีที่มีการเติมที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

ในส่วนของการใช้อะดิกเรซินเป็นตัวประสาน พบว่าสามารถลดค่ากระแสกัดกร่อนของแผ่นโลหะเคลือบได้แต่ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าสูง จึงใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงคือ Timesnano 1 (B) และท่อนาโนคาร์บอนชนิดค่าการนำไฟฟ้าสูงที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano 2 (C) มาช่วยปรับปรุงสมบัติการนำกระแสไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าสามารถลดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นโลหะเคลือบที่มีการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานได้แต่ยังไม่ดีเท่ากับการใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสาน

การเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่มากเกินกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนักจะทำให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เคลือบแผ่นโลหะลดลง โดยเมื่อทำการทดสอบค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่

โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว ผิวฟิล์มจะเกิดการแตกและหลุดลอกขึ้นจนเห็นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมว่าไม่ถูกยึดเกาะด้วยตัวประสาน

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกัดกร่อนของสารเคลือบที่มีซิงก์เรซินและอะคริดิกเรซินเป็นองค์ประกอบ พบว่า อัตราส่วนสารเคลือบที่เหมาะสมคือผงแปรงถ่าน (CB) ซิงก์เรซิน และตัวทำละลายโทลูอีนเท่ากับ 20:10:70 โดยน้ำหนัก และมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงคือ Timesnano 1 (B) ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความต้านทานสัมผัสและค่ากระแสการกัดกร่อนที่ดีที่สุดคือ 4 และ 35 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร กับ 6 และ 0.5 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งจะใช้ภาวะนี้ในการเคลือบแผ่นนำกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็ม

จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม พบว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ใช้ซิงก์เรซินเป็นตัวประสานและไม่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 310.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 325.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนการใช้อะคริดิกเรซินเป็นตัวประสานให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 259 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งการใช้ตัวประสานทั้งสองชนิดให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดแกรไฟต์เชิงพาณิชย์ของ Electrochem, Inc (395.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) โดยที่การใช้ซิงก์เป็นตัวประสานจะให้ค่ามากกว่าชุดเซลล์เชื้อเพลิงเดี่ยวที่ใช้แผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะ (270.4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่ความต่างศักย์ 0.6 โวลต์

5.2 **ข้อเสนอแนะในงานวิจัย**

1. การฉีดพ่นสารโดยใช้มือจะทำให้ความหนาของฟิล์มไม่สม่ำเสมอกัน ควรจะเปลี่ยนเป็นการใช้เครื่องในการฉีดพ่นเพื่อทำการเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมแทน

2. ในการแผ่นนำกระแสไฟฟ้าชนิดโลหะเคลือบด้วยคาร์บอนจากกระบวนการ CVD หรือ PVD จะให้ค่า ICR ที่ต่ำกว่าเพราะว่าสารเคลือบยึดติดดีกว่า

รายการอ้างอิง

[1] Stimming, U. Electrochemical Versus Heat-Engine Energy Technology. Angewandte Chemie International Edition, 48 (2009): 9230–9237.

[2] Lee, J.S., Quan, N.D., and Hwang, J. M. Polymer Electrolyte Membrane for Fuel cells. Journal of Industrial & Engineering Chemistry. 12 (2006): 175-183.

[3] Metha, V. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. Journal of power sources, 114 (2003): 32-53.

[4] พรชัย ชิณสา, การเตรียมแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดคาร์บอนคอมพอสิตเคลือบโลหะ, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[5] Ma, P.C., et al. Enhanced Electrical Conductivity of Nanocomposites Containing Hybrid Fillers of Carbon Nanotubes and Carbon Black. ACS Applied Materials & Interfaces, 5 (2009): 1090–1096.

[6] Ahmed, S. and Krumpelt, M. Hydrogen from hydrocarbon fuels for fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy, 26 (2001): 291-301.

[7] Shah, R. Fuel cell science and technology, chapter introduction. New Delhi: Springer, New York and Anamaya Publishers; 2007.

[8] Dupuis, A. Proton exchange membranes for fuel cells operated at medium temperatures: Materials and experimental techniques. Progress in Materials Science, 56 (2011): 289–327

[9] Hermann, A., Chudhuri, T., and Spagnol, P. Bipolar plate for PEM fuel cells: A review. Journal of Hydrogen Energy, 30 (2005): 1297-1302.

[10] Middelman, E., Kout, W., and Vogelaar, B. Bipolar plates for PEM fuel cells. Journal of Power Sources 118 (2003): 44-46.

[11] Pylkkanen, T., and Scherer, G. Fuel cell with flexible graphite bipolar plate (online). Available from: http//ene.web.psi.ch/Annex5_PDF/Electrochemistry [2010, August 17]

[12] Mark, V.B. Composites Materials, the University of Alabama in Huntsville,Huntsville, Alabama, 2000.

[13] Hull, D., and Clyn, T.W. An Introduction to composite materials, 2nd edition : Cambridge University Press, 1996.

[14] Lee, S.H., Huang, C.H., and Chen, Y.P. Investigation of PVD coating on corrosion resistance of metallic bipolar plates in PEM fuel cell. Journal of Materials Processing Technology,140 (2003): 688-693.

[15] Pecker, D., and Bernstein, I.M., Handbook of Stainless Steel. New York: Mc Graw Hill,1977

[16] Pierson, H.O. Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes Properties, Process and Applications. Noyes Publications, 1993.

[17] Joselevich, E. Carbon Nanotube Synthesis and Organization. Carbon Nanotubes Topics Appl. Physics, 111(2008): 101–164.

[18] Hiraoka , T., Kawakubo, T., and Kimura, J. Selective synthesis of double-wall carbon nanotubes by CCVD of acetylene using zeolite supports. Chemical Physics Letters, 382 (2003): 679–685.

[19] Yu, M.F., Lourie, O., and Dyer, M. Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load. Science 287 (2000): 637–640.

[20] Collins, P. Nanotubes for Electronics . Scientific American, (2000): 67–69.

[21] Hirsch, A., and Vostrowsky, O. Functionalization of Carbon Nanotubes. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005

[22] Kuzmany, H., Kukovecz, A., and Simon, F. Functionalization of carbon nanotubes. Synthetic Metals 141 (2004): 113–122.

[23] Ma, P.C., Siddiqui, A., and Marom, G. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. Composites: Part A 41 (2010): 1345–1367.

[24] Lee, J. H., Kima, S. K., and Kim, N. H., Effects of the addition of multi- walled carbon nanotubes on the positive temperature coefficient characteristics of carbon-black-filled high-density polyethylene nanocomposites. Scripta Materialia, 55 (2006): 1119–1122.

[25] Tomokazu, F., et al. Carbon-Coated stainless steel as PEFC bipolar plate material. Journal of Power Sources, 174 (2007): 199-205.

[26] Shigehiro, K., Hiroyuki, U., and Masahiro, W. Metal separator coated with carbon/resin composite layers for PEFCs. Electrochimica Acta, 53 (2007): 2025-2033.

[27] Lee, Y.B., and Lim, D.S. Electrical and corrosion properties of stainless steel bipolar plates coated with a conduction polymer composite. Current Applied Physics, 10 (2010): 18-20.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ก-1 สมบัติของผงคาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัย

ตาราง ก1 สมบัติของผงคาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัย

	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
ผงแปรงถ่าน	18.64±0.13	0.728

องค์ประกอบของผงคาร์บอนชนิดผงแปรงถ่าน

คาร์บอนคงที่ ร้อยละ	79.7
เถ้า ร้อยละ	17.8
องค์ประกอบที่ระเหยได้ ร้อยละ	2
ความชื้น ร้อยละ	0.5

ก-2 สมบัติของท่อคาร์บอนนาโนชนิดค่าการนำไฟฟ้าต่ำ Chiangmai (A) (Multi-wall Carbon nanotubes, MWNTS)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (นาโนเมตร)	20-50
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (นาโนเมตร)	5-20
ความยาว (ไมโครเมตร)	10
ความบริสุทธิ์ (ร้อยละ)	90
สภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	1.25

แหล่งข้อมูล : ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ก-3 สมบัติของท่อคาร์บอนนาโนชนิดค่าการนำไฟฟ้าสูง Timesnano 1 (B) (High conductivity multi-wall Carbon nanotubes, MWNTS)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (นาโนเมตร)	30-50
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (นาโนเมตร)	5-20
ความยาว (ไมโครเมตร)	10-20
ความบริสุทธิ์ (ร้อยละ)	95
สภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	> 100

แหล่งข้อมูล : บริษัท Chengdu Organic Chem.

ก-4 สมบัติของท่อคาร์บอนนาโนชนิดค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีหมู่คาร์บอกซิลิก Timesnano 2 (C) (High conductivity multi-wall Carbon nanotubes with carboxylic group, MWNTS-COOH)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (นาโนเมตร)	30-50
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (นาโนเมตร)	5-20
ความยาว (ไมโครเมตร)	10-20
ความบริสุทธิ์ (ร้อยละ)	95
สภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	>100
หมู่คาร์บอกซิลิก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.73

แหล่งข้อมูล : บริษัท Chengdu Organic Chem.

ก-5 ซิงค์เรซิน

คุณสมบัติ

ประกอบด้วยสังกะสีบริสุทธ์ ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

เป็นตัวรองพื้นที่ดีสำหรับโลหะ

เพื่อป้องกันสนิมและการกัดกร่อน

แห้งเร็วมาก ภายใน 5-10 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แหล่งข้อมูล : บริษัท รีเสิร์จโปรดัก อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

ก-6 อะคริดิกเรซิน

สมบัติ

เป็นสารอนุพันธ์ของอะคริลิก

มีสมบัติการยึดเกาะและความแข็งที่ดีเยี่ยม

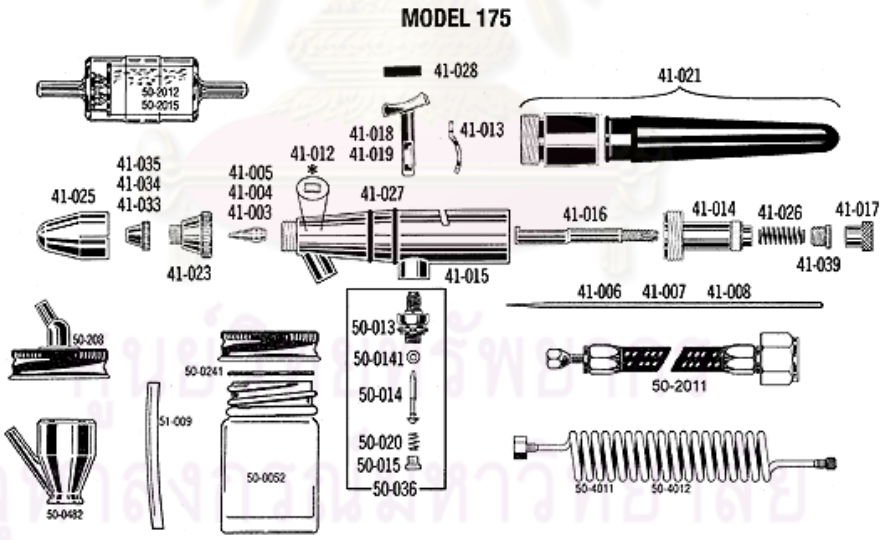
ป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี

แห้งเร็ว

ตัวทำละลายที่เข้ากันได้ : โทลูอีนและบิวทานอล

แหล่งข้อมูล : บริษัท Aekyung chemical

ก-7 เครื่องฉีดพ่น Model 175 Crescendo air brush



ปั๊มลม : ชนิด Oil Reciprocating Piston

กำลังม้า : 1/4 แรงม้า (HP.)

แรงดันลมสูงสุด : 6 บาร์ (BAR)

ระดับเสียง : 30 dB

ความจุถังลม : 3 ลิตร

กระแสไฟฟ้า : 220 V. 50 Hz.

หัวฉีดพ่น หมายเลข 41- 005 ขนาดใหญ่ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร

ความดันปั๊มลมที่ใช้ในการทดลอง 10 lb/in^2

แหล่งข้อมูล : บริษัท True International co., Ltd.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ข-1 การคำนวณค่าความต้านทานเชิงสัมผัส

ข้อมูลการทดลอง ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม (SUS 304) เคลือบด้วยคาร์บอนคอมพอสิตที่ประกอบด้วยสารผงแปรงถ่าน (CB): โทลูอีน: ซิงค์เรซิน ในอัตราส่วนร้อยละ 20:70:10 โดยน้ำหนัก ที่ความหนาในการเคลือบผิว 0.09 มิลลิเมตร

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

R_1 = วัดค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด (mohm.cm^2)

R_2 = วัดค่าความต้านทานผิวสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (mohm.cm^2)

วัดค่าความต้านทานสัมผัสเครื่องมือวัด R_1

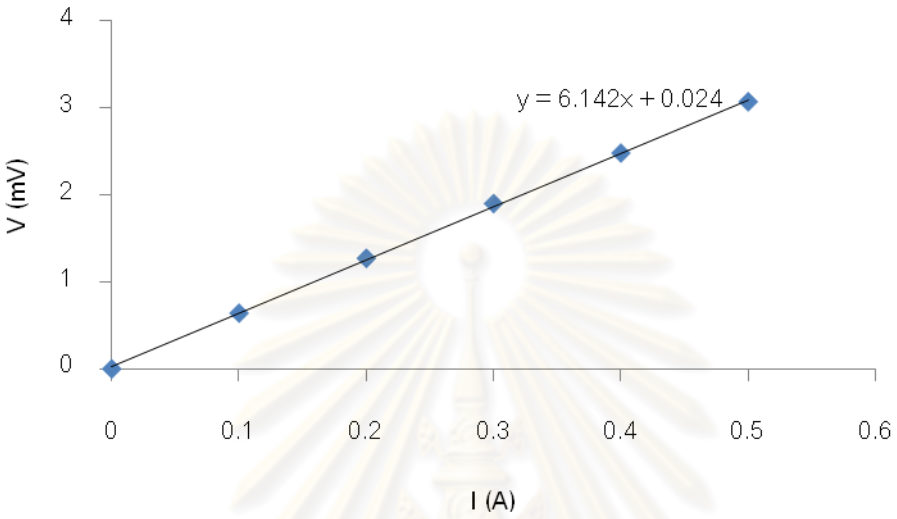
A คือพื้นผิวสัมผัสระหว่างผ้าคาร์บอน, A = 1.7 cm^2

ที่โมเมนต์ทอร์ก 60 ปอนด์แรงนิ้ว

I(A)	V(mV)
0	0
0.1	0.64
0.2	1.27
0.3	1.9
0.4	2.48
0.5	3.07

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นำไปพล็อตกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดยสมการกฎของโอห์ม V = IR



ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของเครื่องมือ

ค่าความต้านทาน $R = 6.142$ mohm

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของเครื่องมือวัด $R_1 = RxA$

$R_1 = 6.142x1.7$

$R_1 = 10.44$ mohmcm^2

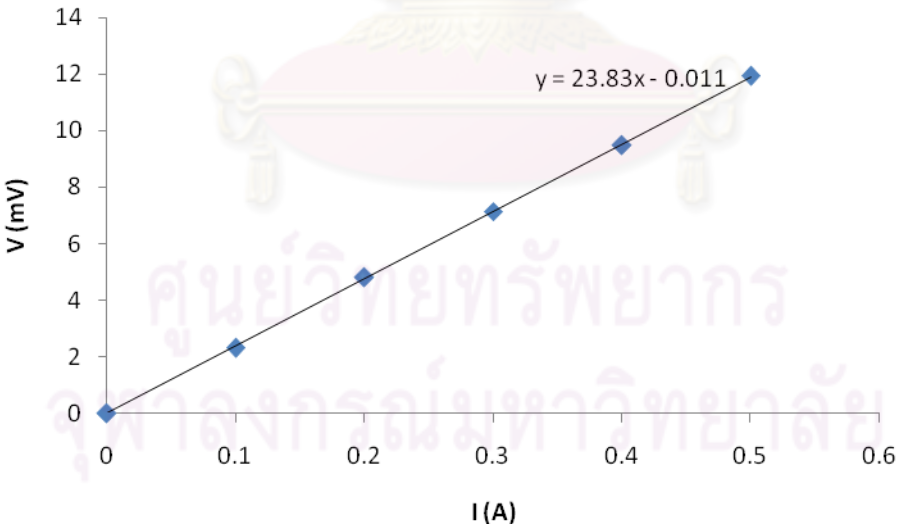
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสชิ้นงาน R_2

A คือพื้นผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานและผ้าคาร์บอน, A = 1.4 cm^2

I(A)	V(mV)
0	0
0.1	2.32
0.2	4.81
0.3	7.15
0.4	9.48
0.5	12.28

นำไปพล็อตกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดยสมการกฎของโอห์ม V = IR



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่แสดงค่าความต้านทานของชิ้นงาน

ค่าความต้านทาน $R = 23.83$ mohm

ค่าความต้านทานสัมผัสของชิ้นงาน $R_2 = RxA$

$R_2 = 23.83x1.4$

$R_2 = 33.362$ $mohmcm^2$

หาค่าความต้านทานสัมผัสรวมตามสมการสมการหาค่าความต้านทานเชิงสัมผัส

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

$$(ICR) = (33.362 - 10.44)/2$$

$$(ICR) = 11.46 \text{ mohmcm}^2$$

ข-2 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่โมเมนต์ทอร์ก 40 ปอนด์แรงนิ้ว (ICR) = 8.77 $mohmcm^2$

ที่โมเมนต์ทอร์ก 200 ปอนด์แรงนิ้ว (ICR) = 1.41 $mohmcm^2$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย จักรพงศ์ ศิริประสมทรัพย์ เกิดวันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษา จากโรงเรียนบุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2551

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย